ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(12–1):167–182
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831.327 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167

ОЦЕНКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОРУДНОГО МАССИВА ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА УДАРООПАСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

М. И. Рассказов[1], А. А. Терёшкин[1], Д. И. Цой[1], А. В. Константинов[1], А. В. Сидляр[1]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук,

Аннотация: Рассмотрены особенности удароопасности на подземных рудниках Кольского полуострова и Дальнего Востока, где регистрируются весь спектр динамических проявлений горного давления и техногенная сейсмичность. Данные исследования проводились с применением специального комплекса технических средств, включая автоматизированную сейсмоакустическую систему контроля горного давления «Prognoz-ADS» и локальный геоакустический прибор «Prognoz L», разработанные в Институте горного дела ДВО РАН. По результатам измерения и анализа геомеханических процессов в разрабатываемом горном массиве были выделены зоны концентрации напряжений и построены карты сейсмоакустической активности и горно-геологическая модель рудника с результатами сейсмоакустического мониторинга. С помощью данных инструментов появляется возможность оценивать удароопасность на опасных и склонных к горным ударам месторождениях, а также определять на ранней стадии очаги подготовки опасных геодинамических событий, что позволяет заблаговременно принять необходимые меры безопасности по их предотвращению.

Ключевые слова: горные удары, прогноз, техногенная сейсмичность, геодинамическая безопасность, горно-геологическая модель, сейсмоакустический мониторинг, геомеханические процессы.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки, соглашение № 075–15–2021–663.

Для цитирования: *Рассказов М. И., Терёшкин А. А., Цой Д. И., Константинов А. В., Сидляр А. В.* Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 12–1. — С. 167–182. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167.

Assessment of geomechanical behavior of rock mass by the data of seismic monitoring with acoustic sensing at rockburst-hazardous deposits

M. I. Rasskazov[1], A. A. Tereshkin[1], D. I. Tsoi[1], A. V. Konstantinov[1], A. V. Sidlyar[1]

[1] Mining Institute of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract: This study analyzes rockburst hazard in underground mines on the Kola Peninsula and in the Far East of Russia. In these areas, the whole spectrum of dynamic events caused

© М. И. Рассказов, А. А. Терёшкин, Д. И. Цой, А. В. Константинов, А. В. Сидляр. 2021

by rock pressure and the induced seismicity are recorded. The research was implemented using dedicated instrumentation for ground control, including acoustic sensing and seismic monitoring system Prognoz-ADS and local geoacoustic sensing device Prognoz L, both designed at the Institute of Mining of the Far East Branch, Russian Academy of Sciences. After recording and analysis of geomechanical processes in rock mass, the zones of stress concentration were delineated, the acoustic and seismic activity maps were plotted, and the geological model of the test mine was constructed on this base. The instrumental measurement data enable rockburst hazard assessment and early detection of initiation sources of hazardous geodynamic events at mineral deposits, which ensures prompt implementation of the required prevention and precaution.

Key words: rock bursts, prediction, induced seismicity, geodynamic safety, geological model, acoustic sensing and seismic monitoring, geomechanical processes.

For citation: Rasskazov M. I., Tereshkin A. A., Tsoi D. I., Konstantinov A. V., Sidlyar A. V. Assessment of geomechanical behavior of rock mass by the data of seismic monitoring with acoustic sensing at rockburst-hazardous deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12–1):167–182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_167.

Введение

Подземное освоение недр и горное строительство на больших глубинах сопряжены с необходимостью проводить работы в условиях опасных проявлений горного давления как в статистической, так и в динамической его формах. Отличительной чертой динамических проявлений горного давления, особенно горных и горно-тектонических ударов, является их внезапность и большая разрушительная сила. Они наносят большой материальный и социальный урон горнодобывающим предприятиям, приводят к длительным остановкам добычи полезного ископаемого. Это связано с необходимостью выполнения масштабных восстановительных работ на больших площадях шахтного поля. По степени тяжести и негативным последствиям мощные горные удары могут быть отнесены к техногенным катастрофам [1 – 13].

В России находится целый ряд рудных месторождений, склонных и опасных по горным ударам. Объектом исследования стали месторождения Апатитовый цирк, Кукисвумчоррское (Кольский полуостров) и Николаевское (Приморский край). Данные месторождения — это сложно-структурные геологические объекты, на которых добываются апатит-нефелиновые и полиметаллические руды.

Постановка проблемы и проведение первых целенаправленных комплексных геомеханических исследований на Дальнем Востоке и Кольском полуострове были обусловлены необходимостью борьбы с участившимися случаями внезапных выбросов угля, породы и газа, а впоследствии и горными ударами в середине прошлого века.

Проблема геодинамической безопасности при ведении горных работ в сложных горногеологических и удароопасных условиях на подземных рудниках Дальнего Востока и Кольского полуострова

Высокий уровень геодинамического риска сохраняется в последние годы на рудниках АО «ГМК «Дальполиметалл», город Дальнегорск, где регистрируются многочисленные случаи техногенной сейсмичности. Они сопровождаются звуковыми проявлениями, щелчками и треском в массиве, падением заколов на различных участках рудничного поля.

Рис. 1. Разрывные нарушения в массиве Николаевского месторождения, образованные в результате проявления техногенной сейсмичности 25.03.2016 г.
Fig. 1. Discontinuities ruptures in the massif of the Nikolaevsk field, formed as a result of the manifestation of technogenic seismicity on 03/25/2016

Геомеханическая обстановка на Николаевском руднике значительно усложнилась в 2016 г., когда 25 марта в 00 ч 57 мин в районе рудной залежи Восток-1 (блока 40) зарегистрировано мощное геодинамическое явление, сопровождавшееся мощным звуковым проявлением и сотрясением всего шахтного поля, а также сейсмическими колебаниями, отмеченными на поверхности [14—16]. В результате этого явления разрушены крепь и контур горных выработок на четырёх горизонтах (–375 м, –390 м, –406 м и –420 м). Объем разрушенной горной массы составил 400 м^3. В первые несколько часов после регистрации явления сейсмоакустическая активность горного массива на два порядка превышала средний уровень. Описываемое явление совпало по времени с землетрясением магнитудой 4 балла в пос. Каменка на побережье Японского моря и привело к поднятию почвы на 10–12 см и образованию в массиве открытых разрывов и трещин (рис. 1) протяженностью десятки метров, пространственно совпавших с элементами тектонической структуры месторождения.

Также в ноябре 2016 года были регистрированы проявления техногенной сейсмичности, включая толчок, который произошёл 25 ноября в 11:32 в глубине массива с энергией 9 325 Дж. Работниками маркшейдерской службы он был отмечен на гор. –406 м и –420 м как сильное звуковое проявление с сотрясательным эффектом. В IV и I

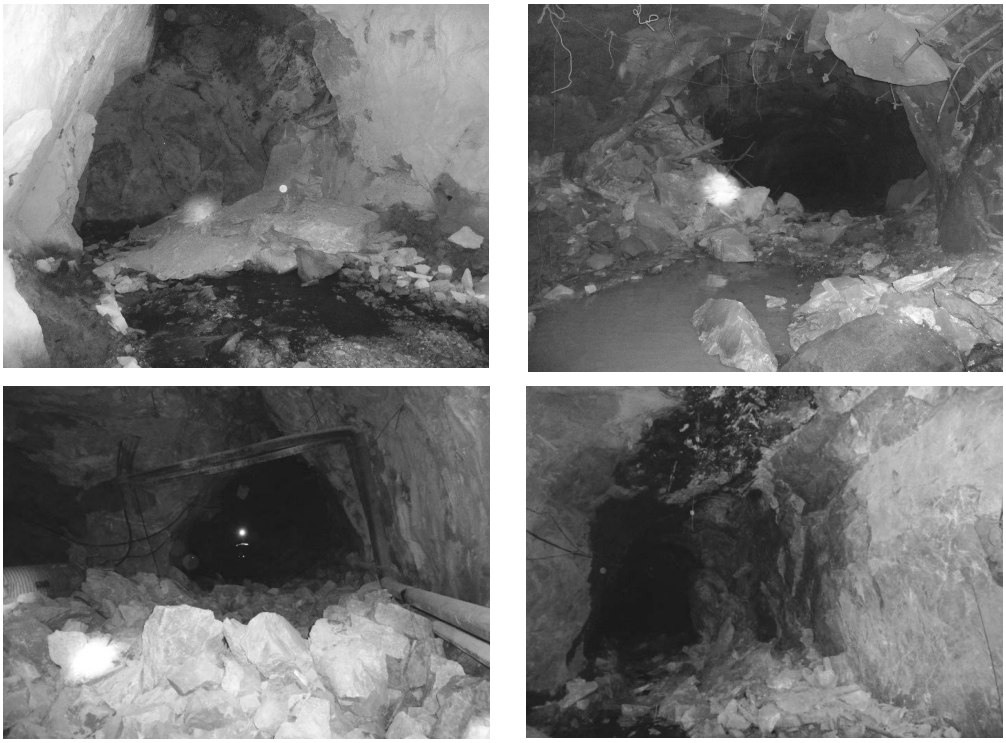

Рис. 2. Последствия геодинамических явлений, зарегистрированных 30.10.2015 и 25.03.2016 на Николаевском месторождении
Fig. 2. Consequences of geodynamic phenomena recorded on 10/30/2015 and 03/25/2016 at the Nikolaevsk field

квартале 2015 и 2016 годов на месторождении отмечено 25 динамических проявлений горного давления, включая серию разрушительных толчков. Последствия наиболее крупных из них, зарегистрированных в октябре 2015 и марте 2016 года, представлены на рис. 2.

Также сложная геодинамическая обстановка обстоит и на месторождении Кукисвумчоррское, (АО «Апатит», г. Кировск). Интересные и важные результаты были получены на Кировском руднике в блоке 7/10. Перед толчком 26.01.2016 08:47 была зарегистрирована крупная акустически активная зона (ААЗ), в которой зарегистрировано 2 497 АЭ-событий с суммарной энергией 159,7 тыс. Дж. Период активности ААЗ составлял 14 часов. В дальнейшем в этом месте проводились профилактические мероприятия по предотвращению горных ударов, бурение разгрузочных скважин (рис. 3).

В целом анализ удароопасности на подземных рудниках дальневосточного региона и Кольского полуострова указывает на усложнение горнотехнической ситуации и увеличение геодинамического риска при ведении горных работ вследствие увеличения выработанных пространств и глубины разработки. Наблюдается активизация геодинамических процессов, сопровождающихся смещениями и подвижками вдоль тектонических нарушений различного масштабного уровня, выделением значительной упругой энергии

Рис. 3. Разрушение межскважинных перемычек разгрузочных скважин в 5 откаточном штреке блока 7/10 Объединенного Кировского рудника
Fig. 3. Destruction of cross-well bridges of unloading wells in the 5 haul road of block 7/10 of the United Kirovsk mine

и проявлением техногенной сейсмичности.

В сложившихся условиях необходимы более углубленные комплексные геодинамические исследования, включающие:

1) оценку геодинамической, сейсмической обстановки и напряженно-деформированного состояния массивов горных пород;

2) изучение закономерностей геодинамических полей и процессов в области техногенного влияния горных работ с использованием сейсмических, сейсмоакустических, геодезических методов;

3) выделение региональных предвестников динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах.

Методы и специальные технические измерительные средства контроля удароопасности массива горных пород

Важное значение для прогноза и предупреждения опасных проявлений горного давления имеет достоверная и оперативная информация о геомеханическом состоянии массива горных пород, которая может быть получена с помощью геофизических методов и измерительных средств, из них наиболее разработанными и включенными в нормативные документы являются микросейсмический, геоакустический, ультразвуковой, электрометрический. Широко распространены микросейсмический (сейсмоакустический) и геоакустический методы. С помощью сейсмоакустического и геоакустического методов, в зависимости от применяемых технических средств, можно производить как локальный, так и регио-

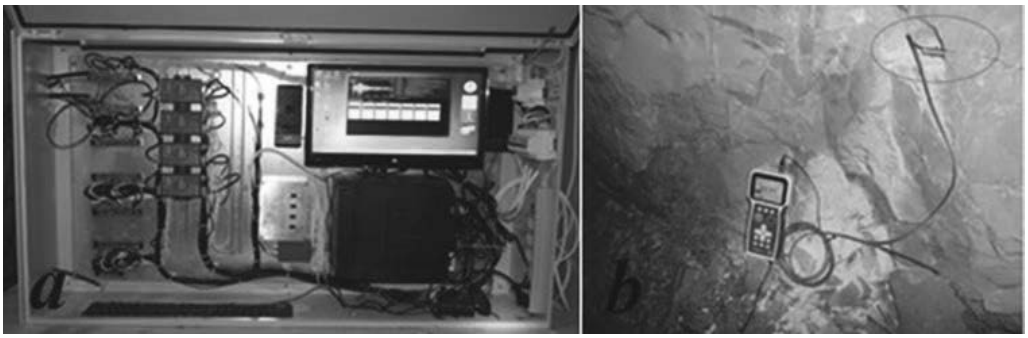

Рис. 4. Технические средства для оценки удароопасности: a — подземные модули автоматизированной сейсмоакустической системы контроля горного давления «Prognoz-ADS»; *b* — портативный прибор «Prognoz L»
Fig. 4. Technical means for assessing the burst hazard: a — underground modules of the automated seismoacoustic system for monitoring rock pressure “Prognoz-ADS”; *b* — portable device “Prognoz-L”

нальный контроль состояния массива горных пород. Данные методы базируются на экспериментально наблюдаемом и теоретически изученном явлении акустической эмиссии (АЭ) [17 — 20].

Для контроля горных выработок на данных месторождениях применяются различные методы и средства, в том числе разработанная в Институте Горного Дела сейсмоакустическая система контроля горного давления «Prognoz-ADS» и локальный прибор «Prognoz-L» (рис. 4).

Оценка геомеханического состояния массива горных пород по данным сейсмоакустического контроля с применением автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS» является одним из наиболее перспективных направлений предупреждения и прогнозирования внезапных разрушений горного массив, а также горных и горно-тектонических ударов (техногенных землетрясений) [21 — 25]. АСКГД «Prognoz-ADS» предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород импульсов сейсмоакустической эмиссии в частотном диапазоне 0,5...12 кГц, определения их параметров (энергии, координат, спектральных и иных характеристик акустических событий) и представления результатов мониторинга в форме каталогов, карт, графиков с применением современных программных средств 3D-визуализации [26 — 31].

АСКГД состоит из подземной и поверхностной частей. В состав поверхностного комплекса входит высокопроизводительный персональный компьютер оператора с производительной системой управления базами данных, который обеспечит сбор и обработку информации, а также удаленное управление по локальной сети. В состав программного обеспечения входят программные комплексы «GeoControl» и «GeoAcoustics-ADS».

Также на данном месторождении применяются портативные приборы «Prognoz L», которые предназначены для локальной экспресс-оценки геомеханического состояния краевых частей горного массива и приконтурных участков подземных горных выработок. Данные приборы используются как самостоятельно, так и совместно со стационарными автоматизированными многоканальными системами контроля горного давления для верификации результатов регионального прогноза горных ударов и техногенной сейсмичности [32 — 34].

В приборе локального контроля «Prognoz L» реализован ряд алгоритмов, обеспечивающих идентификацию импульсов естественной акустической эмиссии на фоне техногенного шума. Импульсы естественной акустической эмиссии обладают перечнем характеристик сигнала по сравнению с фоновыми техногенными сигналами, что позволяет на аппаратном уровне прибора реализовать гибкую селекцию.

Прибор «Prognoz L» осуществляет регистрацию импульсов упругих колебаний, излучаемых в процессе необратимого деформирования горных пород (процесс естественной акустической эмиссии), определение параметров АЭ и расчет показателей и критериев удароопасности с выдачей прогнозных оценок о состоянии массива горных пород.

За время эксплуатации горнодобывающими предприятиями системы «Prognoz-ADS» и портативного прибора «Prognoz L» наш институт получает актуальные данные проведенных измерений в выработках действующих рудников с признаками наличия горного давления. В процессе обработки данных регулярно корректируются критерии удароопасности, которые зависят

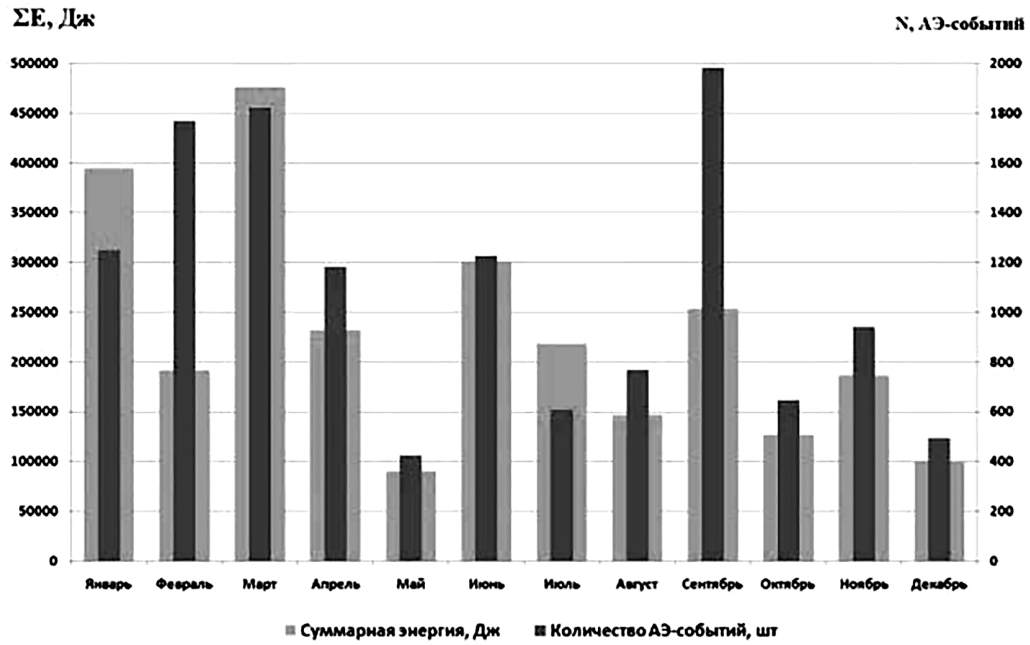

Рис. 5. График помесячного распределения количества и суммарной энергии АЭ-событий, зарегистрированных в 2020 г.
Fig. 5. Graph of the monthly distribution of the number and total energy of AE events registered in 2020

от параметров, учитывающих свойства горных пород, которые способны к накоплению потенциальной энергии и высвобождению ее в форме хрупкого, лавинообразного разрушения.

Результаты исследования удароопасности горного массива по данным сейсмоакустического мониторинга

В настоящее время наблюдательная сеть АСКГД включает в себя 32 цифровых приемных преобразователя (ЦПП), установленных в скважинах, пробуренных из горных выработок на следующих горизонтах рудника «Николаевский»: –307 м, –323 м, –348 м, –360 м, –380 м, –390 м, –406 м, –420 м и –433 м.

В 2020 г. на горизонтах рудника Николаевский зарегистрировано 19 465 сейсмоакустических событий. Наибольшая акустическая активность массива наблюдалась с января по март, а также в июне и сентябре (рис. 5).

В 2020 г. на Николаевском руднике в зоне контроля АСКГД зарегистрировано 20 акустически активных зон (ААЗ). Наибольшее количество акустически активных зон было выявлено в первом и третьем квартале. Наиболее крупные ААЗ были сформированы в августе и сентябре.

В первом квартале 2020 г. на Николаевском руднике произошло два толчка. Первый толчок был зарегистрирован 11 января 2020 г. в районе блока Нижнего в 12:20 в глубине массива на пересечении субширотного разлома и ТН-3. Энергия толчка составила 18 526 Дж. Очаг геодинамического события зафиксирован на отметке –517 м (рис. 6).

Второй толчок был зарегистрирован 28 марта 2020 г. в районе уклона

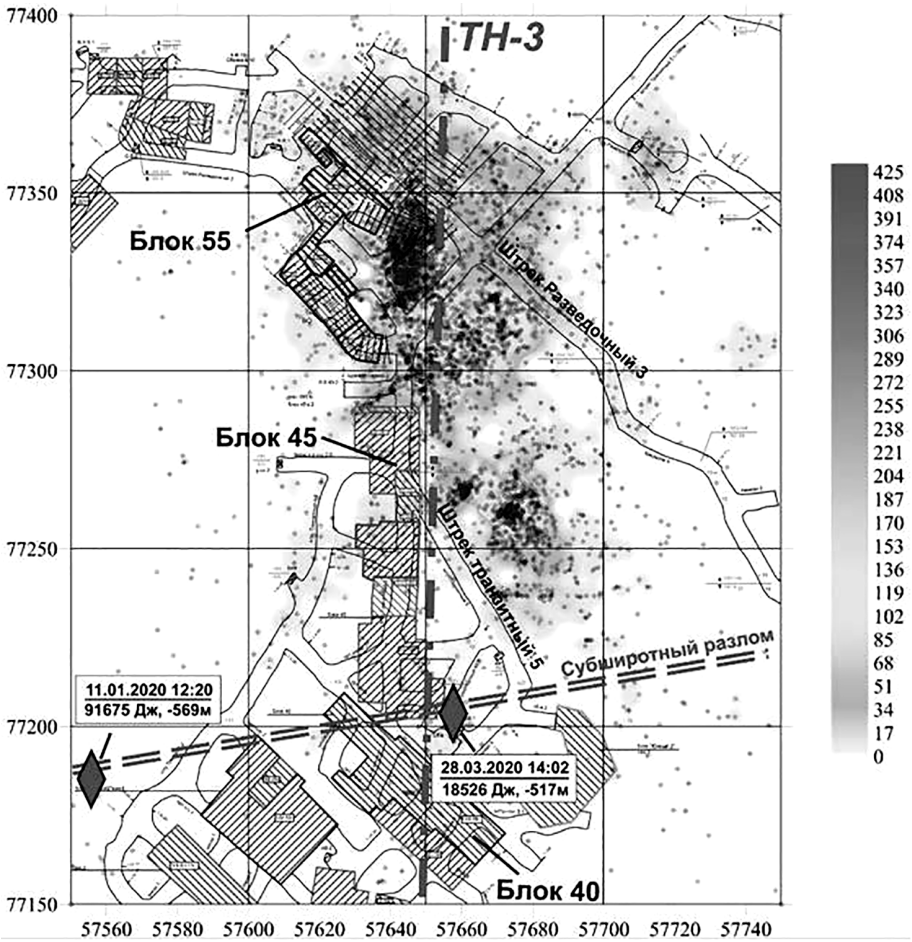

Рис. 6. Карта акустической активности и очаги АЭ-событий, зарегистрированных в 1 квартале 2020 г. (в проекции на горизонт 390 м)
Fig. 6. Map of acoustic activity and foci of AE events registered in the 1st quarter of 2020 (projection of 390 m horizon)

Буровой-1 в 14:02 в глубине массива известняков. Динамическое проявление отмечалось работниками рудника от гор. –320 м до подэтажа -446 м. Энергия толчка составила 19 675 Дж. По результатам расчета координат это геодинамическое событие зафиксировано на отметке –569 м (рис. 6).

Наибольшая акустическая активность в 1 квартале наблюдалась в феврале и марте на горизонте -390 м. Суммарно здесь было зарегистрировано 10 акустически активных зон в целике между разломом ТН-3 и отрабатываемым блоком 55, а также на сопряжении между штреками Разведочный 3 и Транзитный 5. Еще одна крупная акустически активная зона зарегистрирована 12 марта 2020 г. с восточной стороны отрабатываемого блока 45 в районе штрека Транзитный 5 (рис. 6).

В третьем квартале 2020 г. наибольшая акустическая активность наблюдалась на горизонте -420 м (рис. 7). В этот же период зарегистрированы две круп-

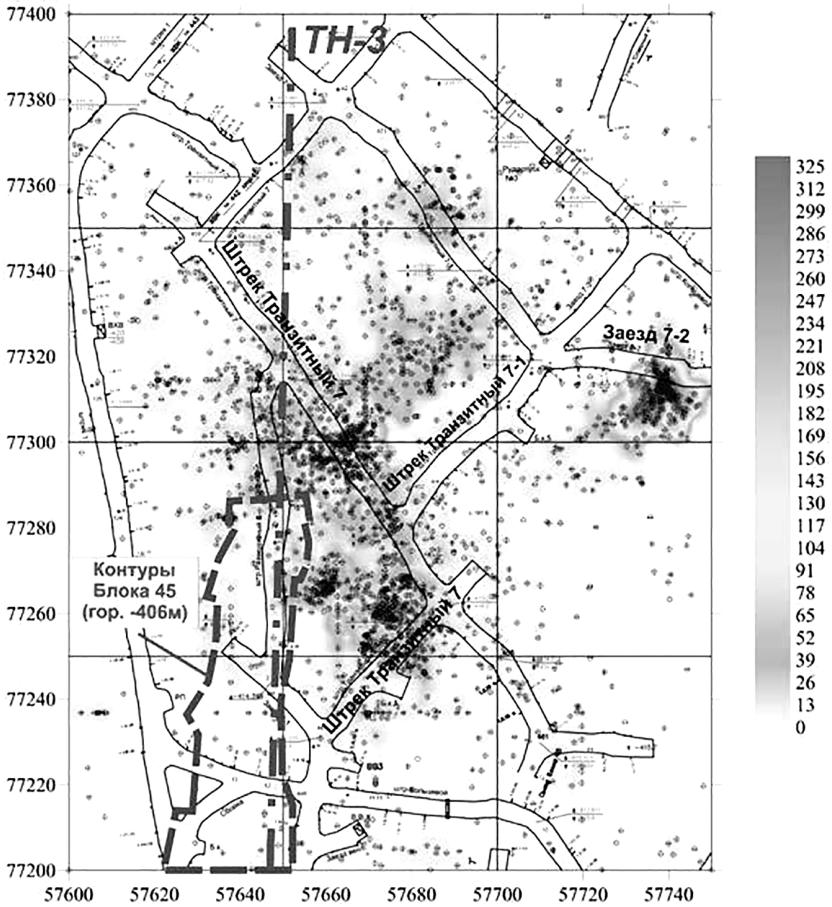

Рис. 7. Карта акустической активности и очаги АЭ-событий, зарегистрированных в 3 квартале 2020 г. (в проекции на горизонт 420 м)
Fig. 7. Map of acoustic activity and foci of AE events registered in the 3rd quarter of 2020 (projection of 420 m horizon)

нейшие в текущем году по количеству событий акустически активные зоны.

Акустическая активность в первой зоне наблюдалась после проведения взрывных работ в районе блока 55 с 30 августа 06:15 по 3 сентября (период активности 92 часа). Зона расположена в области опорного давления блока 45 в кровле штрека Транзитный 7 (рис. 7). Всего здесь было зарегистрировано 327 АЭ-событий с суммарной энергией 26 131 Дж.

Вторая крупная акустически активная зона зарегистрирована 18 сентября 2020 г. на гор. -420 м в районе заезда 7 — 2 (рис. 7). Суммарно в течение 10 часов здесь было зарегистрировано 204 АЭ-событий с суммарной энергией 3 991 Дж.

В конце 2019 г. сейсмоакустическая система «Prognoz-ADS» была установлена на месторождении Апатитовый цирк, отработку которого ведет Расвумчоррский рудник [35 — 37]. В настоящее время наблюдательная сеть АСКГД на данном руднике включает в себя 16 цифровых приемных преобразователей (ЦПП), установленных в скважи-

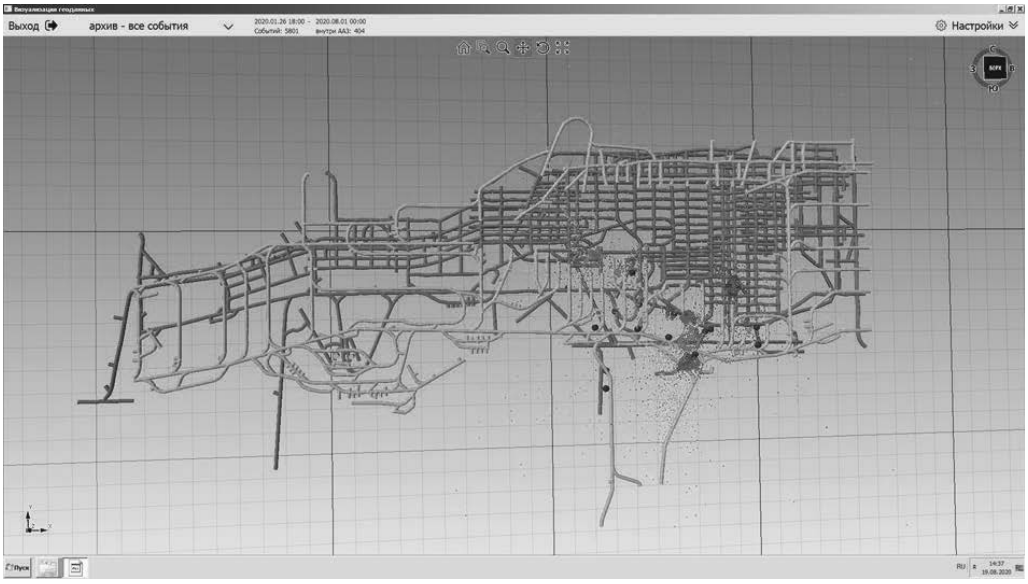

Рис. 8. Объёмная горно-геологическая модель Расвумчоррского рудника с результатами сейсмоакустического мониторинга
Fig. 8. Volumetric mining and geological model of the Rasvumchorr mine with the results of seismoacoustic monitoring

нах, пробуренных из горных выработок на следующих горизонтах рудника «Расвумчоррский»: –425 м, –450 м, –475 м.

По данным сейсмоакустического контроля в период с февраля по июль 2020 г. в рудничном поле были выделены 4 ААЗ. Одна из наиболее крупных ААЗ, в которой уже зарегистрировано 413 АЭ–событий, находится на горизонте +450 м. Конфигурация этих зон отражена на объёмных горно–геологических моделях месторождения и картах акустической активности (рис. 8).

Обсуждение результатов

Результаты сейсмоакустического мониторинга на глубоких горизонтах Николаевского месторождения в 2015 — 2020 гг. свидетельствуют об усложнении геомеханической обстановки. Наибольшее количество АЭ–событий наблюдалась в зонах ведения добычных работ на горизонтах –390, –406 и –420 м (вдоль тектонически активного разлома ТН–3 в районе блоков 45 и 55). При этом большинство крупных сейсмоакустических событий (с энергией 5 000 Дж и более) регистрировались ниже гор. –440 м (в том числе и на пересечении с неактивным в предыдущие годы субширотным разломом), что свидетельствует об активизации геодинамических процессов. Полученные результаты показывают необходимость расширения зоны мониторинга и проведения дальнейших комплексных исследований с использованием сейсмических, деформационных и иных методов.

Результаты сейсмоакустического мониторинга на месторождении Апатитовый цирк показали, что на горизонте -425м с февраля по май 2020 г. наблюдалась акустическая активность после проведения взрывных работ на пересечении Южного транспортного штрека и вентиляционного квершлага. Всего

здесь были зарегистрированы четыре акустически активные зоны. Высокая акустическая активность наблюдалась в районе выработок БДШ 11а-г. Наиболее низкая акустическая активность наблюдалась на горизонте 470 м, где за исследуемый период суммарно было зарегистрировано 723 АЭ-событий. Подавляющее большинство зарегистрированных АЭ-событий лоцируются на пересечении или в непосредственной близости с разломными структурами.

Выводы

1. С помощью современного измерительного комплекса появляется возможность оценивать удароопасность на данных месторождениях и определять на ранней стадии формирование очагов подготовки опасных геодинамических событий, что позволяет заблаговременно принять необходимые меры безопасности по их предотвращению.

2. Рост интенсивности опасных динамических проявлений горного давления на данных месторождениях обусловлен нарушением естественного равновесия природно-технической системы вследствие горных работ.

3. Для снижения удароопасности и риска динамических проявлений горного давления были предложены следующие организационно-технические меры безопасности на Николаевском месторождении: 1) погашение остроугольных целиков с целью образования прямого угла между очистной камерой и разломом ТН-3, что позволяет снизить величину максимальных горизонтальных растягивающих напряжений более чем в 3 раза; 2) осуществление частичной закладки твердеющими смесями камер, расположенных под углом менее 57° к тектонически активному разлому ТН-3; 3) изменение порядка отработки камер с первоочередной выемкой потенциально удароопасных камер, расположенных на пересечении с разломом ТН-3, а затем камер, расположенных за пределами разлома ТН-3.

4. В ходе проведённых геомеханических исследований на месторождении Апатитовый цирк были предложены следующие организационно-технические мероприятия по обеспечению безопасности введения горных работ: 1) бурение разгрузочных скважин; 2) сотрясательное взрывание; 3) «отстой» забоев выработок в течение одной или нескольких смен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья / Трубецкой К. Н. Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. — М.: Наука, 2010. — 438 с.
2. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.
3. *Макаров А. Б.* Практическая геомеханика / А. Б. Макаров. — М.: Издательство «Горная книга», 2006. — 391 с.
4. *Секисов Г. В.*, *Чебан А. Ю.*, *Соболев А. А.*, *Якимов А. А.* Система основных категорий комплексной оценки горных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — №4. — С.187—198.
5. *Шабаров А. Н.*, *Цирель С. В.*, *Морозов К. В.*, *Рассказов И. Ю.* Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах // Горный журнал. — 2017. — №9. С. 59—64.

6. *Рассказов И. Ю.*, *Курсакин Г. А.*, *Потапчук М. И.*, *Мирошников В. И.*, *Фрейдин А. М.*, *Осадчий С. П.* Геомеханическая оценка условий разработки глубоких горизонтов полиметаллического месторождения «Южное» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — №5. — С.125—134.

7. Chen XJ, Li, LY, Wang, L, Qi, LL. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China // Safety Science, 2019, Vol. 115, pp. 229—236, DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.010.

8. *Чебан А. Ю.* Технология разработки сложноструктурного месторождения Апатитов и выемочно-сортировочный комплекс для её осуществления // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 399—404.

9. Geomechanics in mining: basic and applied research / *Sashurin A. D.* // Eurasian Mining. — 2012. — № 1. — P. 17—19.

10. *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. — С. 425—433.

11. *Протосеня А. Г.*, *Багаутдинов И. И.* Прогноз напряжённо-деформированного состояния трещиноватости рудного массива вокруг выработки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 4. С. 45—50.

12. *Протосеня А. Г.*, *Багаутдинов И. И.* Прогноз области вывалообразования при пересечении выработкой зоны тектонического нарушения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — №2. — С.54—59.

13. *Леоненко Н. А.*, *Секисов Г. В.*, *Чебан А. Ю.*, *Шемякин С. А.*, *Кузьменко А. П.*, *Силютин И. В.* Исследование процессов разрушения горных пород лазерным излучением // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — №5. — С.80—90.

14. *Рассказов И. Ю.*, *Курсакин Г. А.*, *Фрейдин А. М.*, *Черноморцев В. Н.*, *Осадчий С. П.* Методы контроля и управления горным давлением на рудниках ОАО «ГМК «Дальполиметалл» // Горный журнал. — 2006. — №4. — С.35—38.

15. *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. — С. 13—19.

16. *Рассказов И. Ю.*, *Курсакин Г. А.*, *Потапчук М. И.*, *Рассказов М. И.* Геомеханическая оценка технологических решений при проектировании горных работ в удароопасных условиях // Записки Горного института. — 2012. — Т 198. — С. 80—85.

17. *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.

18. *Гиляров В. Л.*, *Дамаскинская Е. Е.*, *Кадомцев А. Г.*, *Рассказов И. Ю.* Анализ статистических параметров данных геоакустического мониторинга на месторождении «Антей» Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — №3. — С.40—45.

19. *Кулаков Г. И.*, *Яковицкая Г. Е.* Акустическая эмиссия и стадии процесса трещинообразования горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1993. — № 2.

20. *Искра А. Ю.*, *Калинов Г. А.*, *Рассказов И. Ю.*, *Болотин Ю. И.* Совершенствование систем геоакустического контроля при проведении подземных горных работ // Горный журнал. — 2006. — №6. — С.72—77.

21. *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 Объединённого Кировского рудника АО «АПАТИТ» // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 4 (102). С. 52 — 56.

22. Rasskazov, M. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula / M. Rasskazov, A. Tereshkin, D. Tsoi, A. Konstantinov, V. Miroshnikov, I. Bagautdinov, K. Kozhogulov // E3S Web of Conferences.2020. С. 01009. — https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019201009.

23. *Raskazov M. I.*, *Gladyr A. V.*, *Tereshkin A. A.*, *Tsoy D. I.* Seismic acoustic monitoring system of mining pressure at the underground mine MIR. Problemy nedropolzovaniya. 2019;(2):56–61. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313 — 1586.2019.02.056.

24. *Лукичев С. В.*, *Наговицын О. В.*, *Свинин В. С.*, *Егоров В. Ф.*, *Коробов Б. Л.*, *Ивановский Е.*В Система автоматизированного планирования и проектирования горных работ GEOTECH-3DАПАТИТ // Горный журнал. — 2000. — №3. — С.56 — 58.

25. *Рассказов И. Ю.*, *Саксин Б. Г.*, *Шабаров А. Н.*, *Святецкий В. С.*, *Просекин Б. А.* Контроль динамических проявлений горного давления при разработке месторождения Антей // Горный журнал. — 2009. — №12. — С.11 — 14.

26. *Bar N.*, *Nicoll S.*, *Reynolds M.*, *Bran D.* Geotechnical data management and visualization systems: Meeting the data challenge of the 21st century and maximizing value for open pit mines. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: CRC Press, 2018. Vol. 2. pp. 973–978.

27. *Константинов А. В.*, *Гладырь А. В.*, *Ломов М. А.* Разработка алгоритма автоматической идентификации сейсмоакустических сигналов средствами локального мониторинга // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2. — С. 43 — 51. — DOI: 10.25635/2313 — 1586.2019.02.043. — ISSN 2313 — 1586 (РИНЦ).

28. *Лукичёв С. В.* Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. — 2021. — №4. — С.73 — 79.

29. *Лукичев С. В.*, *Наговицын О. В.* Цифровое моделирование при решении задач открытой и подземной горной технологии // Горный журнал. — 2019. — №6. — С.51 — 55.

30. *Гладырь А. В.*, *Курсакин Г. А.*, *Рассказов М. И.*, *Константинов А. В.* Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень — 2019. — № 8. — С. 21 — 32.

31. *Ломов М. А.*, *Гладырь А. В.* Графическое представление результатов сейсмоакустического мониторинга на Расвумчоррском и Объединённом Кировском рудниках // Проблемы недропользования. 2020. — № 2 (25). — С. 154 — 159.

32. *Panteleev I. A.*, *Mubassarova V. A.*, *Zaitsev A. V.*, *Shevtsov N. I.*, *Kovalenko Y. F.*, *Karev V. I.* Kaiser effect in sandstone in polyaxial compression with multistage rotation of an assigned stress ellipsoid // Journal of Mining Science. — 2020. — Т.56 — №3. — С.370 — 377.

33. *Лавров А. В.*, *Шкуратник В. Л.* Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал — 2005. — Т. 51. — № 5. — С. 6 — 18.

34. *Прохоров К. В.*, *Гладырь А. В.*, *Рассказов М. И.* Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» // Горная промышленность. — 2020. — №4. — С.120 — 126.

35. *Rasskazov M.*, *Rasskazov I.*, *Gladyr A.*, *Tereshkin A.*, *Tsoi D.*, *Rasskazova A.* Research and assessment of the rock burst hazardous of the Kola Peninsula mineral deposits by seismic-acoustic monitoring data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. “Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice” 2021. С. 012126.

36. *Куранов А. Д.*, *Сидоров Д. В.* Оценка напряжённого состояния междуштрековых целиков на рудниках ОАО «АПАТИТ» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2011. — №1. — С.308—312.

37. *Bagautdinov I.*, *Kuranov A.*, *Belyakov N.*, *Streshnev A.* The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state // E3S Web of Conferences. 2018. С. 01019. ГИАБ

REFERENCES

1. Trubetskoy K. N. Chanturia V. A., Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. *Kompleksnoe osvoenie mestorozhdenij i glubokaya pererabotka mineral'nogo syr'ya* [Integrated development of deposits and deep processing of mineral raw materials]. Moscow: Science, 2010. 438 p. [In Russ]

2. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kasparyan E. V. *Osnovy mekhaniki gornyh porod* [Basics of Rock Mechanics]. Leningrad: Bosom, 1989. 488 p. *[In Russ]*

3. Makarov A. B. *Prakticheskaya Geomekhanika* [Practical geomechanics]. Moscow: Publisher «Gornaya kniga», 2006. 391 c. [In Russ]

4. Sekisov G. V., Cheban A.Yu., Sobolev A. A., Yakimov A. A. System of the main categories of comprehensive assessment of mining technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no. 4. p. 187—198. [In Russ]

5. Shabarov A. N., Tsirel S. V., Morozov K. V., Rasskazov I. Yu. The concept of complex geodynamic monitoring in underground mining operations. *Gornyi Zhurnal*. 2017. no. 9. pp. 59—64. [In Russ]

6. Rasskazov I.Yu., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., Miroshnikov V. I., Freidin A. M., Osadchiy S. P. Geomechanical assessment of the conditions for the development of deep horizons of the Yuzhnoye polymetallic deposit. *Physical and technical problems of the development of useful minerals*. 2012. no. 5. pp. 125 134. [In Russ]

7. Chen XJ, Li, LY, Wang, L, Qi, LL. The current situation and prevention and control countermeasures for typical dynamic disasters in kilometer-deep mines in China. *Safety Science*, 2019, Vol. 115, pp. 229—236, DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.010.

8. Cheban A.Yu. Development technology of the Apatity complex field and the extraction and sorting complex for its implementation. *Notes of the Mining Institute*. 2019. T. 238. C. 399—404. [In Russ]

9. Geomechanics in mining: basic and applied research. Sashurin A. D. *Eurasian Mining*. 2012. no. 1. pp. 17—19.

10. Melnikov N. N., Kozyrev A. A., Panin V. I. Technogenic seismicity is a dangerous anthropogenic factor during mining operations in highly stressed massifs. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2015. no. 5. pp. 425—433. [In Russ]

11. Protosenya A. G., Bagautdinov I. I. Prediction of the stress-strain state of fracturing of the ore massif around the working. Proceedings of higher educational institutions. *Gornyi Zhurnal*. 2015.no. 4. pp. 45—50. [In Russ]

12. Protosenya A. G., Bagautdinov I. I. Forecast of the area of fall formation at the intersection of the mine with a tectonic fault zone. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavod. Mining Journal*. 2016. No. 2. p. 54 59. [In Russ]

13. Leonenko N. A., Sekisov G. V., Cheban A.Yu., Shemyakin S. A., Kuzmenko A. P., Silyutin I. V. Investigation of the processes of destruction of rocks by laser radiation. *Physical and technical problems of the development of useful minerals*. 2013. no. 5. pp. 80—90. [In Russ]

14. Rasskazov I.Yu., Kursakin G. A., Freidin A. M., Chernomortsev V. N., Osadchiy S. P. Methods for monitoring and controlling rock pressure at the mines of OJSC MMC Dalpolymetal. *Gornyi Zhurnal*. 2006. no. 4. pp. 35—38. [In Russ]

15. Rasskazov I. Yu., B. G. Saksin B. G., Usikov V. I., Potapchuk M. I. Geodynamic state of the rock massif of the Nikolaevskoe polymetallic deposit and features of the manifestation of rock burst hazard during its development. *Gornyi Zhurnal*. 2016. no. 12. pp. 13—19. [In Russ]

16. Rasskazov I. Yu., Kursakin G. A., Potapchuk M. I., Rasskazov M. I. Geomechanical assessment of technological solutions in the design of mining operations in rockburst hazardous conditions. *Notes of the Mining Institute*, 2012, no. 198, pp. 80—85. [In Russ]

17 Rasskazov I.Yu., Petrov V. A., Gladyr A. V., Tyurin D. V. Geodynamic test site of the Streltsovskoe ore field: practice and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2018. no. 7. pp. 17—21. [In Russ]

18. Gilyarov V. L., Damaskinskaya E. E., Kadomtsev A. G., Rasskazov I.Yu. Analysis of statistical parameters of geoacoustic monitoring data at the Antey deposit. *Physical and technical problems of mining*. 2014. no. 3. pp. 40—45. [In Russ]

19. Kulakov G. I., Yakovitsky G. E. Acoustic emission and process stages of fracture-forming of rocks. Journal of Mining Scienc. 1993. no. 2. [In Russ]

20. Iskra A.Yu., Kalinov G. A., Rasskazov I.Yu., Bolotin Yu.I. Improvement of geoacoustic control systems during underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2006. no. 6. pp. 72—77. [In Russ]

21. Gladyr A. V., Korchak P. A., Streshnev A. A., Rasskazov M. I., Tereshkin A. A. Installation of an automated rock pressure monitoring system "PROGNOZ ADS" at the pilot site of the United Kirovsky mine of JSC "APATIT". *Mine surveying and subsoil use*, 2019, no. 4 (102), pp. 52—56. [In Russ]

22. Rasskazov M., Tereshkin A., Tsoi D., Konstantinov A., Miroshnikov V., Bagautdinov I., Kozhogulov K. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula. E3S Web of Conferences.2020. C. 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf /202019201009.

23. Raskazov M. I., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Tsoy D. I. Seismic acoustic monitoring system of mining pressure at the underground mine MIR. *Problemy nedropolzovaniya*. 2019;(2):56–61. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313—1586.2019.02.056.

24. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Svinin V. S., Egorov V. F., Korobov B. L., Ivanovskiy E. V. Computer-aided planning and design of mining operations GEOTECH-3DAPATIT. *Gornyi Zhurnal*. 2000. no. 3. p. 56—58. [In Russ]

25. Rasskazov I.Yu., Saksin B. G., Shabarov A. N., Svyatetsky V. S., Prosekin B. A. Control of dynamic manifestations of rock pressure during the development of the Antey deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2009. no. 12. pp. 11—14. [In Russ]

26. Bar N., Nicoll S., Reynolds M., Bran D. Geotechnical data management and visualization systems: Meeting the data challenge of the 21st century and maximizing value for open pit mines. Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. London: CRC Press, 2018. Vol. 2. pp. 973–978.

27. Konstantinov A. V., Gladyr A. V., Lomov M. A. Development of an algorithm for automatic identification of seismoacoustic signals by means of local monitoring. *Problems of Subsurface Use*. 2019. no. 2. pp. 43—51. DOI: 10.25635/2313—1586.2019.02.043. ISSN 2313—1586. [In Russ]

28. Lukichev S. V. Digital past, present and future of mining enterprises. *Gornaya promyshlennost'*. 2021. no. 4. pp. 73—79. [In Russ]

29. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Digital modeling in solving problems of open and underground mining technology. *Gornyi Zhurnal*. 2019. no. 6. pp. 51—55. [In Russ]

30. Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., Konstantinov A. V. Development of the identification of hazardous areas in the rock mass according to seismoacoustic observations. *Mining News and Analysis Bulletin*, 2019, no. 8, pp. 21—32. [In Russ]

31. Lomov M. A., Gladyr A. V. Graphical representation of the results of seismic acoustic monitoring at Rasvumchorrsky and United Kirovsky mines. *Problems of Subsurface Use* 2020. no. 2 (25). pp. 154—159. [In Russ]

32. Panteleev I. A., Mubassarova V. A., Zaitsev A. V., Shevtsov N. I., Kovalenko Y. F., Karev V. I. Kaiser effect in sandstone in polyaxial compression with multistage rotation of an assigned stress ellipsoid. *Journal of Mining Science.* 2020. Vol. 56. no. 3. pp. 370—377.

33. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L. Acoustic emission during deformation and destruction of rocks (review). Acoustical Physics 2005. Vol. 51. no. 5. pp. 6—18. [In Russ]

34. Prokhorov K. V., Gladyr A. V., Rasskazov M. I. Shared Use Center "Mineral Resources Research Center". *Gornaya promyshlennost'*, 2020, no. 4, pp. 120—126. [In Russ]

35. Rasskazov M., Rasskazov I., Gladyr A., Tereshkin A., Tsoi D., Rasskazova A. Research and assessment of the rock burst hazardous of the Kola Peninsula mineral deposits by seismic-acoustic monitoring data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice" 2021. pp. 012126.

36. Kuranov A. D., Sidorov D. V. Assessment of the stress state of inter-road pillars at the mines of JSC "APATIT". *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences.* 2011. no. 1. pp. 308—312. [In Russ]

37. Bagautdinov I., Kuranov A., Belyakov N., Streshnev A. The reasoning of mining methods parameters toward development of the apatite-nepheline ore deposits based on results of forecast of massif stress state. E3S Web of Conferences. 2018. C. 01019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рассказов Максим Игоревич[1] — науч. сотр., rasm.max@mail.ru;
Терешкин Андрей Александрович[1] — науч. сотр., andrey.tereshkin@bk.ru;
Цой Денис Игоревич[1] — науч. сотр., denis.tsoi@mail.ru;
Константинов Александр Викторович[1] — науч. сотр., alex-sdt@yandex.ru;
Сидляр Александр Владимирович[1] — науч. сотр., alex-igd@mail.ru;
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rasskazov M. I.[1], researcher;
Tereshkin A. A.[1], researcher;
Tsoi D. I.[1], researcher;
Konstantinov A. V.[1], researcher,
Sidlyar A. V.[1], researcher,
[1] Mining Institute of the Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 19.10.2021; принята к печати 10.11.2021.
Received by the editors 18.07.2021; received after the review 19.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.