

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ ОЦЕНКИ И МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

К. В. Морозов¹, Д. Н. Демёхин¹, Е. В. Бахтин¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия

Аннотация: Обеспечение безопасного состояния горных выработок на удароопасных месторождениях базируется на основе применения различных систем сейсмического мониторинга, которые в настоящее время не дают надёжного результата. Для повышения достоверности прогноза динамических проявлений горного давления предлагается использовать комплексные системы мониторинга. В настоящей статье рассмотрены основные положения методики использования многокомпонентных датчиков деформаций как части комплексной системы мониторинга деформаций, а также для первичной оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Методики включают аппаратные средства, такие как многокомпонентные датчики деформаций, автономные комплексы контроля, буровое и вспомогательное оборудование для первоначальной оценки напряженно-деформированного состояния и обустройства деформационных станций мониторинга, программное обеспечение для проведения наблюдений и обработки результатов, предварительные критерии наступления опасных состояний и методические рекомендации для проведения соответствующих работ. Пороговые значения деформаций на автономных комплексах контроля в совокупности с пороговыми данными других видов мониторинга должны заверяться локальными методами контроля и, в случае подтверждения, обуславливать необходимость проведения технических мероприятий по приведению массива в безопасное состояние. Также в статье приведены примеры некоторых результатов совместного деформационного, сейсмического и технологического мониторингов при оценке напряженно-деформированного состояния исследуемого массива.

Ключевые слова: Напряженно-деформированное состояние, методы оценки, многокомпонентный датчик деформаций, системы мониторинга деформаций, автономный комплекс контроля, сейсмическая активность, прогноз, динамические проявления.

Для цитирования: Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Бахтин Е. В. Методика использования многокомпонентных датчиков деформаций для первичной оценки и мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11-1. — С. 25–38. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_25.

The method of using multicomponent strain sensors for the primary assessment and monitoring of the stress-strain state of a rock mass

K. V. Morozov¹, D. N. Demekhin¹, E. V. Bahtin¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Russia

Abstract: Ensuring the safe condition of mining operations in high-impact deposits is based on the use of various seismic monitoring systems, which currently do not provide reliable results. To increase the reliability of the forecast of dynamic manifestations of mountain pressure, it is proposed to use integrated monitoring systems. The article discusses the main provisions of the methodology for using multicomponent strain sensors for the initial assessment and monitoring of the stress-strain state of a rock mass. The methods include hardware such as multicomponent strain sensors, autonomous control systems, drilling and auxiliary equipment for the initial assessment of stress-strain state and the arrangement of deformation monitoring stations, software for conducting observations and processing the results, preliminary criteria for the occurrence of dangerous conditions and methodological recommendations for carrying out relevant work. Threshold values of deformations on autonomous control complexes in combination with threshold data of other types of monitoring must be certified by local control methods and, if confirmed, necessitates technical measures to bring the array to a safe state. Examples of some results of joint deformation, seismic and technological monitoring when assessing the stress-strain state of the studied massif are given.

Key words: Stress-strain state, methods of end unloading, multicomponent strain gauges, deformation monitoring systems, autonomous monitoring complex, seismic activity, forecast, dynamic manifestations.

For citation: Morozov K. V., Demekhin D. N., Bahtin E. V. The method of using multicomponent strain sensors for the primary assessment and monitoring of the stress-strain state of a rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):25–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_25.

Введение

Проблема мониторинга состояния массива горных пород при добыче полезных ископаемых так же стара, как само горное дело. Уже первые горные выработки требовали от горняков наблюдений за сохранностью кровли и боков выработки, целостностью крепи, процессами образования трещин с возможностью затопления выработок и многих других.

В настоящее время, при достижении глубин разработки в несколько километров, достоверная оценка и контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) массива является, наверное, главной задачей геомеханики, без решения которой невозможно обе-

спечить безопасную и эффективную добычу полезного ископаемого.

Знание и контроль параметров НДС необходимы при решении широкого круга задач:

- определение параметров системы разработки [1] (направление развития горных работ, размеры выработок и охраняемых целиков, выбор способов крепления и поддержания горных выработок);

- обеспечение сохранности конструктивных элементов системы разработки при ведении подземных горных работ [2–4];

- прогнозирование [5, 6] и предупреждение геодинамических явлений (горные удары, выбросы) при отработке удароопасных месторождений [7, 8];

– расчет деформаций элементов водозащитной толщи при отработке месторождений под водоносными комплексами;

– выбор надежных способов консервации и рекультивации месторождений;

– численное моделирование широкого круга задач, в основе которого лежат принципы обеспечения устойчивого состояния горнотехнических объектов [9];

– оценка рисков при проектировании и эксплуатации геотехнических сооружений [10].

В общем случае, контроль НДС подразумевает решение двух принципиальных задач:

1. Оценка величин и направлений действия сил, оказывающих воздействие на конструктивные элементы системы разработки. В случае рассмотрения главных нормальных напряжений речь идет об определении тензора напряжений.

2. Контроль состояния объектов горного производства во времени, который решается с помощью организации геомеханического мониторинга. К настоящему времени подавляющее количество систем геомеханического мониторинга основывается на фиксации процессов деформирования горных пород и связанных с этим физических процессов [11, 12], таких как изменение формы или размеров участков массива пород (механический мониторинг), электромагнитное, сейсмическое или акустическое излучение, изменение электрических свойств среды (геофизический мониторинг) и др.

В данной работе в большей степени мы будем рассматривать вопросы, связанные с методикой проведения именно механического деформационного мониторинга.

Для решения задач первичной оценки и мониторинга напряженно-

деформированного состояния массива горных пород в Санкт-Петербургском Горном университете разработан ряд методик, в основе которых лежит использование многокомпонентных датчиков деформаций. Оценка величин тензора напряжений достаточно детально рассматривалась в работах [13–15], поэтому основное внимание в данной работе уделено использованию многокомпонентных датчиков именно для организации деформационного мониторинга, т.е. процесса измерения смещений породного массива под действием природных и технологических факторов.

Общие принципы организации систем деформационного мониторинга

Говоря об общих принципах организации систем деформационного мониторинга (СДМ), следует отметить, что особенно актуально их применение при разработке подземных месторождений, склонных к горным ударам. Целью данного мониторинга может служить повышение достоверности прогноза динамических проявлений горного давления за счет совместной обработки данных сейсмического, акустического и деформационного мониторингов. Идея такого комплексного мониторинга заключается в том, что превышение пороговых значений деформаций на контрольных станциях в совокупности с пороговыми данными других видов мониторинга повышает качество прогноза времени проявления опасных динамических событий в местах повышенной концентрации сейсмических и акустических событий.

Организация СДМ подразумевает решение следующих основных задач:

– определение алгоритма (методики) выбора мест установки и пара-

метров станций деформационного контроля;

- разработка методики первоначальной оценки НДС контролируемого массива, включающей комплекс полевых и камеральных работ;

- выбор средств обработки данных натурных исследований НДС (аналитика, численное моделирование);

- разработка методики комплексного деформационного мониторинга;

- создание аппаратно-программного комплекса СДМ и его монтаж на объектах контроля;

- проведение комплекса работ по численному и физическому моделированию для определения предварительных критериев наступления динамических проявлений горного давления [16];

- формирование критериев оценки состояния массива по результатам комплексного мониторинга.

Рассмотрение всех приведенных выше задач выходит за рамки данной статьи, поэтому остановимся более подробно на некоторых особенностях деформационного мониторинга, проводимого с помощью деформационных

датчиков и автономных комплексов контроля (рис. 1).

Комиссия по методам испытаний Международной ассоциации по геомеханике (ISRM) рекомендует следующие 4 методики для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород [17]:

- метод определения напряжения в горных породах с помощью плоского домкрата;

- с помощью гидроразрыва;

- с использованием датчика деформации буровых скважин USBM-типа;

- с использованием ячейки типа CSIRO с 9 или 12 тензодатчиками.

Основная проблема методов щелевой разгрузки и гидроразрыва в том, что они не могут быть использованы для организации непрерывного деформационного мониторинга. Датчики USBM-типа имеют ряд методических проблем, связанных с использованием тензодатчиков [18]. Разработки компании Sibra In-situ Stress Testing (IST) by Overcoring System технически сложны и нуждаются в специалистах высокого уровня, способных обеспечить измерения и бурение измерительных/раз-

Многокомпонентный датчик деформаций



а



б

Рис. 1. Основные компоненты аппаратуры системы деформационного мониторинга:

а – датчик деформаций, б – блок автономного комплекса контроля (АКК)

Fig. 1. Main components of the deformation monitoring system equipment:

а – Strain sensor, б – Autonomous control complex (ACC) unit

[составлено авторами]

грузочных скважин. Детальный обзор данных метода приведен в работе [13].

В связи с этим в Горном университете для оценки НДС массива горных пород по измерениям деформаций стенок буровых скважин были разработаны и уже более 10 лет используются многокомпонентные датчики деформаций [19]. Изображение датчика одной из последних версий (ДД-4.1), оснащенного модулем беспроводной передачи данных, приведено на рис. 1, а.

Как видно из рис. 1 и 2, измерения проводятся в двух параллельных плоскостях $X-Y$ и $X'-Y'$ и ортогональных плоскостях $X-Z$ и $Y-Z$, при этом первая плоскость отвечает за измерения величины, а вторая — за направления действующих напряжений. Максимальная амплитуда смещений стенок скважин не превышает ± 4 мм, точность измерений в пределах 10 мкм. Температурный диапазон работы датчиков от -5 до $+50$ °С. Датчики защищены от воздействия влаги по протоколу IP67.

Используются две разновидности датчиков. Первая (ДД-4.*), оборудованная модулем беспроводной передачи данных, необходима при проведении исследований при начальной оценке уровня действующих напряжений. Оборудование позволяет проводить запись показаний инденторов во время всего цикла операций по разгрузке измерительной скважины.

Датчики второго типа (ДД-3.*) применяются при организации длительных наблюдений за состоянием измерительных скважин и используются в автономном комплексе контроля (АКК) деформаций (рис. 1, б). Необходимость создания такого комплекса связана с нарушением работы систем деформационного мониторинга, датчики которого связаны в единую сеть проводной или беспроводной (на локальных участках) связью, вследствие порыва

кабелей связи при ведении взрывных работ или работе технологического оборудования. АКК обеспечивает бесперебойную работу мониторинга за счет независимых от шахтной сети источников питания и записи данных на внутренний носитель. Автономность работы АКК обеспечивается на срок до 10 суток, что вполне достаточно для устранения разрывов сети питания и передачи данных.

Базовые положения методики определения напряженно-деформированного состояния горных пород

Методика оценки напряженного состояния массива опирается на результаты деформационного мониторинга стенок измерительной скважины в моменты ее разгрузки соосной скважиной большего диаметра (схема Хаста). Для измерения деформаций стенок скважины применяются высокоточные многокомпонентные датчики деформаций [19]. Рассматриваемые датчики позволяют определять деформации стенок измерительной скважины по пяти направлениям: по основным взаимно ортогональным направлениям (оси X , Y , Z), а также промежуточным направлениям между осями X и Y под углом 45° с поворотом по часовой стрелке. Промежуточному направлению от оси X присвоено название ось $X\rangle$, а промежуточному направлению от оси Y — ось $Y\rangle$. Ориентация осей измерений показана на рис. 2.

Расположение мест измерения по длине скважины приведено на рис. 3.

Первый замер деформаций стенок измерительной скважины при ее разгрузке проводится на расстоянии 0,5 м от устья скважины. Следующие измерения выполняются с шагом 2 м вплоть до достижения заданной глубины исследования. В настоящее время

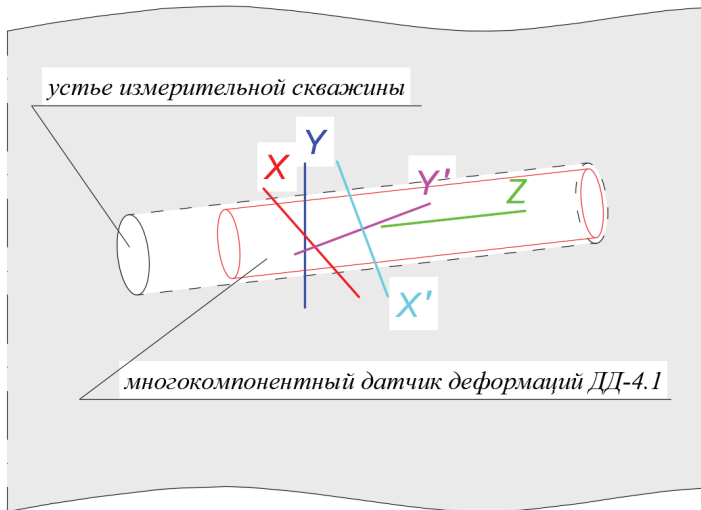


Рис. 2. Схема расположения измерительных осей датчика
 Fig. 2. Layout of the sensor measuring axes
 [составлено авторами]

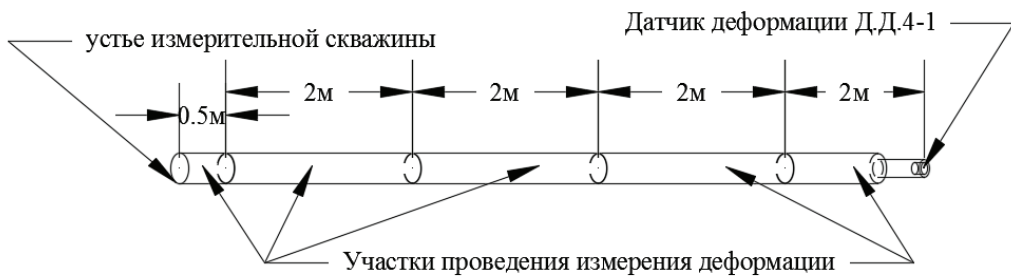


Рис. 3. Схема измерительной скважины
 Fig. 3. Measuring well diagram
 [составлено авторами]

предельная глубина скважин не превышает 10 м.

Для первоначальной оценки тензора напряжений измерения проводятся в двух ортогональных скважинах (рис. 4).

Бурение измерительной скважины проводится диаметром 77 мм.

В скважине монтируется многокомпонентный датчик деформаций и выполняются измерения исходного состояния горного массива (первичные измерения по стенкам измерительной

скважины). Далее вокруг скважины с установленным датчиком бурится разгрузочная скважина диаметром 132 мм. Интервал разгрузочной скважины для создания зоны разгрузки массива выполняется глубиной не менее 160 мм с центром по оси измерительного блока датчика. Выполняются повторные измерения, фиксирующие возникающие деформации в разгруженной части массива. Датчик извлекается из измерительной скважины.

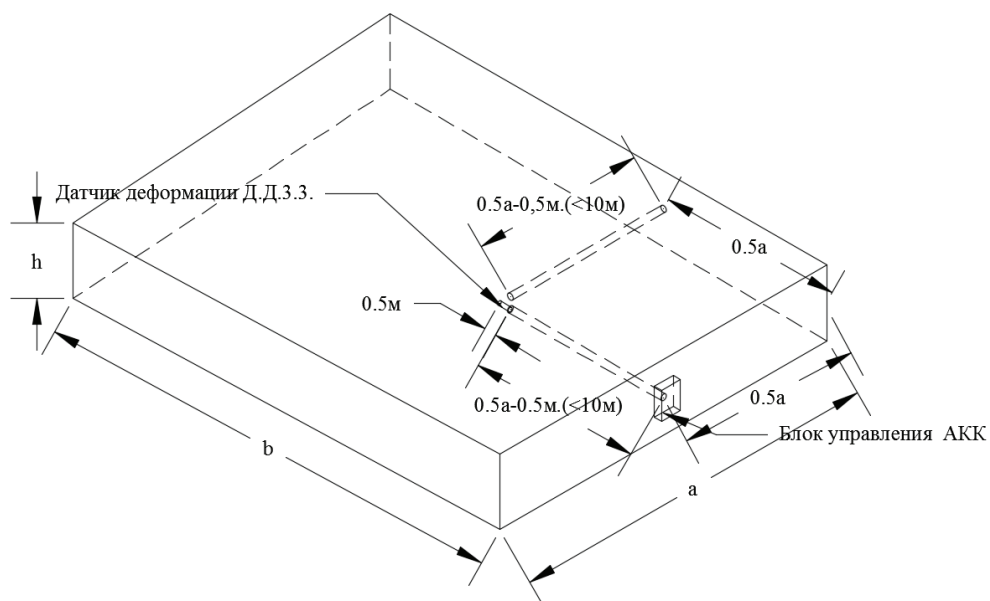


Рис. 4. Принципиальная схема участка проведения исследований
 Fig. 4. Schematic diagram of the research site
 [составлено авторами]

Выполняется дальнейшее бурение скважины на глубину шага измерений, который по умолчанию составляет 2 м, и повторяются все операции по измерению деформаций, указанные выше, вплоть до достижения заданных параметров.

В пределах одного наблюдательного пункта предусматривается выполнение измерений по двум горизонтальным, взаимно ортогональным скважинам. Результатом измерений является определение тензора напряжений в наблюдаемой точке массива согласно методике, подробно рассмотренной в работах [13, 14].

Методика мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород

После проведения натурных исследований напряженного состояния кон-

тролируемого участка массива методом полной разгрузки керна кольцевой щелью необходимо в непрерывном режиме продолжать вести наблюдения за изменением напряженно-деформированного состояния контролируемых участков массива.

Для организации непрерывного деформационного мониторинга контролируемых участков массива используется аппаратура АКК, состоящая из блока передачи и хранения данных (БПХ), аккумуляторов, обеспечивающих автономность работы датчика ДД-3.* и записывающей аппаратуры.

Система АКК (см. рис. 4) монтируется на месте фактического проведения инструментальных измерений НДС. Для этого измерительная скважина дополнительно углубляется на 0,5 м для установки датчика. На устье скважины монтируется пункт

управления АКК. Управление датчиком, передача данных производится по соединительным проводам. Оборудование пункта управления обеспечивает непрерывное питание датчика от аккумулятора, сохранение регистрируемых значений с возможностью передачи данных на SD-карту.

Результаты

На рис. 5 приведен пример визуализации результатов деформационного мониторинга.

Граф данных состоит из 5 разделов (типов данных): датчиков деформаций, сейсмического мониторинга, сейсмике от влияния взрывных работ, подвигания фронта очистных работ, направления деформаций.

С датчика системы АКК поступает информация о накопительных деформациях по всем 9 осям. Пороговые значения деформаций, при которых возможны динамические формы проявления горного давления, определены в работе [7] в результате сопоставления данных численного моделирования и данных моделирования на эквивалентах материалов. При значении смещений на уровне 300–350 мкм наблюдается линейное деформирование. Дальнейший прирост напряжений сопровождается нелинейными деформациями вплоть до полной потери устойчивости при значениях деформаций на уровне 950 мкм. Данная величина обозначена на графике красной горизонтальной линией. При приближении деформаций к критическим значениям рекомендуется провести оценку удароопасности классическими локальными методами, такими как дисконирование керна, выход буровой мелочи и пр. [20]. В случае выявления категории «опасно» необходимо проведение мероприятий, предусмотренных нормативными документами, действующими

на конкретном горнодобывающем предприятии в области предупреждения геодинамических проявлений горного давления.

Для более полного анализа уровня НДС массива помимо данных деформационного мониторинга рекомендуется использовать дополнительные данные, такие как расстояние до границы остановки горных работ, связь с сейсмической активностью [21] и влиянием взрывных работ.

В качестве примера можно привести результаты комплексного мониторинга на одном из месторождений РФ, где были апробированы описываемые методики. На графиках 2 и 3 (см. рис. 5) представлены все зафиксированные сейсмособытия и сеймика от взрывных работ в радиусе 200 м от места установки датчика. События с высокой энергетикой в совокупности с ростом деформации могут быть предвестником геодинамического события.

Другим фактором, оказывающим влияние на рост деформаций, является приближение зоны опорного давления от очистных работ к контролируемому объекту (рис. 5, график 4). Оценка опорного давления производится измерением кратчайшего расстояния от контролируемого объекта до очистных работ смежных горизонтов в радиусе 50 метров. Как показывают исследования, влияние очистных работ наиболее значимо на расстоянии до 45–50 м.

На графике 5 рис. 5 приведена лепестковая диаграмма, на которой визуально показано направление действующих деформаций, а следовательно, и напряжений. Сопоставление данных комплексного мониторинга во времени по всем исследуемым показателям проводится с помощью динамической шкалы выбора даты замеров (красная вертикальная линия).

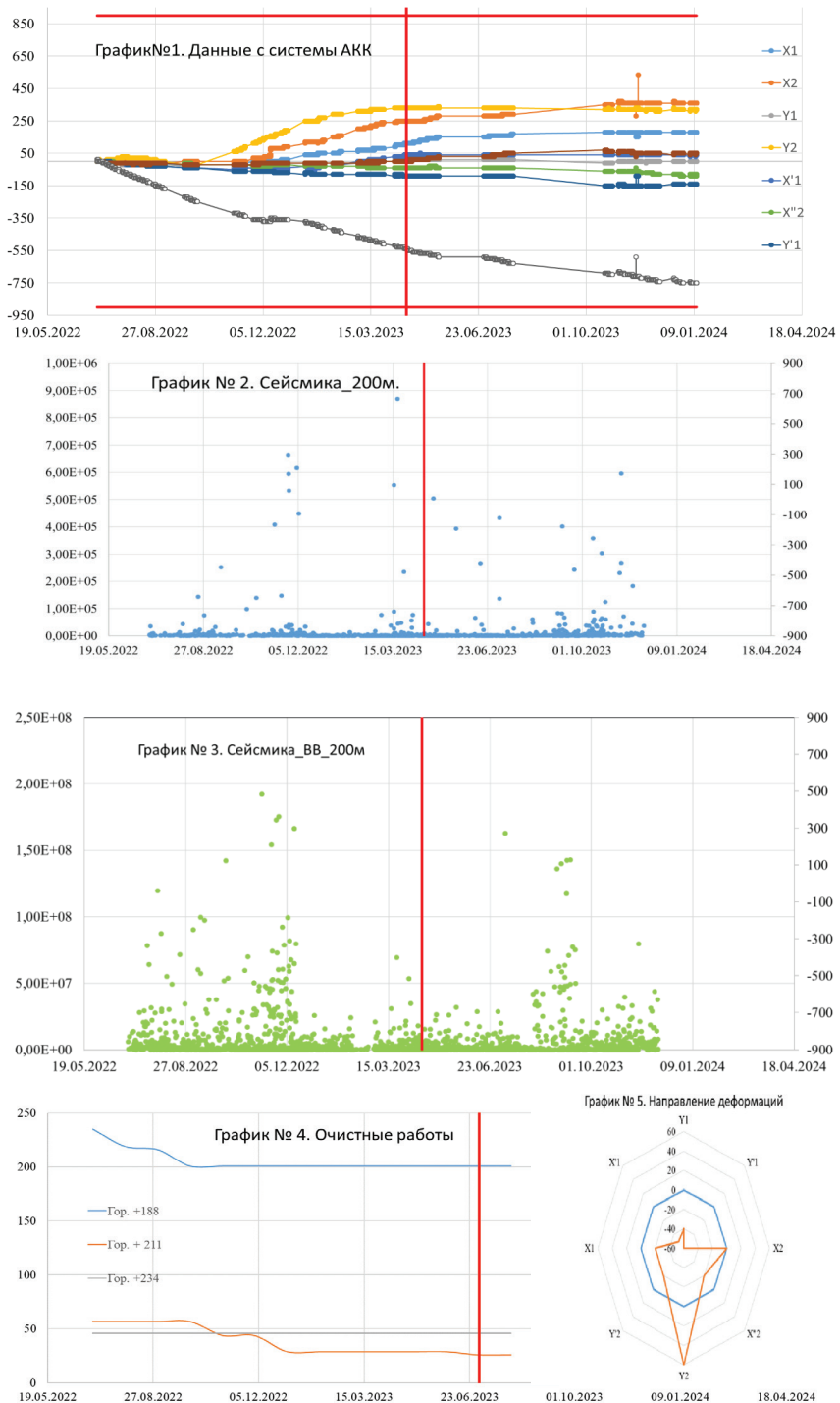


Рис. 5. Общий вид визуализации данных с системы АКК
 Fig. 5. General view of data visualization from the ACC system
 [составлено авторами]

Заклучение

В настоящее время регламентированное нормативными документами использование систем сейсмического мониторинга не позволяет в полной мере прогнозировать динамические проявления горного давления на удароопасных месторождениях. Выходом из сложившейся ситуации представляется использование комплексных систем мониторинга, где дополнительно необходимо учитывать результаты деформационного и сейсмоакустического мониторингов, численного и физического моделирования, визуального наблюдения за состоянием горных выработок.

Разработанная специалистами Санкт-Петербургского горного университета методика оценки НДС напряженных массивов горных пород включает аппаратные средства (многокомпонентные датчики деформаций, автономные комплексы контроля, буровое и вспомогательное оборудование для первоначальной оценки НДС и обустройства деформационных станций мониторинга), программное обеспечение для проведения наблюдений и обработки

результатов, предварительные критерии наступления опасных состояний и методические рекомендации для проведения соответствующих работ.

Применение разработанных методик не только существенно дополняет данные геодинамических и геофизических исследований, но и позволяет проводить независимые оценки напряженного состояния на потенциально опасных участках горного производства.

Вклад авторов

Морозов К. В. — генерация идеи исследования; постановка задачи исследования; руководство работами по разработке методологии; систематизация материала; подготовка текста статьи.

Демёхин Д. Н. — выполнение работы по систематизации материала; подготовка материалов для написания статьи.

Бахтин Е. В. — конструкторская проработка компонентов системы мониторинга; проведение и обработка данных полевых исследований; подготовка материалов для написания статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов В. П., Сокол Д. Г.* Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 874–885.

2. *Евсеев А. В., Васильева Е. Л.* Учёт влияния места установки контрольных точек при оценке устойчивости междукамерных целиков по скорости горизонтальной конвергенции очистных камер // *Горное эхо*. — 2022. — № 3 (88). — С. 15–19. DOI: 10.7242/echo.2022.3.3.

3. *Барях А. А., Девятков С. Ю., Денкевич Э. Т.* Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 259. — С. 13–20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.

4. *Паньков И. Л., Аникин В. В., Бельтюков Н. Л., Евсеев А. В., Кузьминых В. С., Ломакин И. С., Морозов И. А., Токсаров В. Н., Ударцев А. А.* Изучение деформирования и разрушения соляных пород для разработки методов геомеханической оценки устой-

чивости грузонесущих элементов камерной системы разработки калийных месторождений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2022. — № 3. — С. 14–24. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.2/>.

5. *Рассказов И. Ю.* Исследования удароопасности на подземных рудниках Дальнего Востока и Забайкалья // Проблемы недропользования. — 2018. — № 3(18). — С. 128–139.

6. *Li C. C., Mikula P., Simser B., Hebblewhite B., Joughin W. C.* Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, vol. 11(5), pp. 1110–1118. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.06.001.

7. *Трофимов В., Киркин А. П., Румянцев А. Е., Колганов А. В.* Использование данных акустического сканирования стенок глубоких скважин для воссоздания действующего режима напряжений на полиметаллическом месторождении интрузивного генезиса // Горный журнал. — 2024. — № 1. — С. 68–74. DOI: 10.17580/гж.2024.01.11.

8. *Рассказов И. Ю., Батугин А. С., Федотова Ю. В., Потапчук М. И.* Оценка предрасположенности месторождения полезных ископаемых к тектоническим горным ударам: на примере месторождения Южное // Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 74–78. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.12.

9. *Зацепин М. А., Господариков А. П.* О некоторых подходах к численному моделированию динамического разрушения массива горных пород при ведении буровзрывных работ // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 21–27. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.03.

10. *Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A.* Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises // Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development — Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM 2019, 2020, pp. 330–335.

11. *Адушкин В. В., Опарин В. Н.* От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч.II // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 3–46.

12. *Ямщиков В. С.* Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. — М.: Недра, 1982. — 296 с.

13. *Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Бахтин Е. В.* Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6–2. — С. 80–97. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80.

14. *Беляков Н. А., Емельянов И. А.* Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки // Известия Тульского государственного университета. — 2022. — № 2. — С. 192–207. DOI: 10.46689/2218-5194-2022-2-1-192-207.

15. *Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Буслова М. А.* Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 619–627.

16. *Morozov K., Shabarov A., Kuranov A., Belyakov N., Zuyev B., et al.* Geodynamic monitoring and its maintenance using modeling by numerical and similar materials methods // E3S Web Conf. 1st International Scientific Conference «Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Massifs», 2019, vol. 129, article 01012, pp. 1–12. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901012.

17. *Ulusay R., Hudson J.* The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Ankara, Turkey: ISRM Turkish National Group, 2007, 628 p.

18. *Daniel A.* Analysis of overcoring rock stress measurements performed using the CSIRO HI. International Progress Report IPR-04-06. Sweden, 2003, 266 p.

19. Патент РФ № 2763565 07.07.2021. *Морозов К. В., Бахтин Е. В., Демёхин Д. Н., Бакуменко С. В., Яковлев Н. А.* Устройство для оценки напряжённо-деформированного состояния горного массива. 2021. Бюл. № 1.

20. *Ерёменко А. А., Конурич А. И., Штирц В. А., Приб В. В.* Выявление зон повышенного нормального давления на удароопасном железорудном месторождении // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 78–81. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.15.

21. *Котилов Д. А., Шабаров А. Н., Цирель С. В.* Становление связи между распределением сейсмических событий в массиве горных пород и его тектоническим строением // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05. **ГИАС**

REFERENCE

1. Zubov V. P., Sokol D. G. Technologies for intensive development of potash seams using long working faces at great depths: current problems, directions for improvement. *Proceedings of the Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 874–885. [In Russ].

2. Evseev A. V., Vasilyeva E. L. Taking into account the influence of the installation location of control points when assessing the stability of inter-chamber pillars based on the speed of horizontal convergence of the cleaning chambers. *Mountain echo*. 2022, no. 3 (88), pp. 15–19. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2022.3.3.

3. Baryakh A. A., Devyatkov S. Yu., Denkevich E. T. Mathematical modeling of the development of the displacement process during the mining of potash ores using longwall faces. *Notes of the Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 13–20. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.

4. Pankov I. L., Anikin V. V., Beltyukov N. L., Evseev A. V., Kuzminykh V. S., Lomakin I. S., Morozov I. A., Toksarov V. N., Udartsev A. A. Study of deformation and destruction of salt rocks to develop methods for geomechanical assessment of the stability of load-bearing elements of a chamber system for the development of potash deposits. *Bulletin of the Perm Federal Research Center*. 2022, no. 3, pp. 14–24. [In Russ]. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.2/>.

5. Rasskazov I. Yu. Research of rock bump hazard on underground mines of the Far East and Transbaikalia. *Problems of subsoil use*. 2018, no. 3(18), pp. 128–139. [In Russ].

6. Li C. C., Mikula P., Simser B., Hebblewhite B., Joughin W. C. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019, vol. 11(5), pp. 1110–1118. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.06.001.

7. Trofimov V., Kirkin A. P., Rumyantsev A. E., Kolganov A. V. The use of deep borehole imaging data in reconstruction of active stress mode at a polymetallic deposit of intrusive genesis. *Gornyi zhurnal*. 2024, no. 1, pp. 68–74. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.11.

8. Rasskazov I. Yu., Batugin A. S., Fedotova Yu. V., Potapchuk M. I. The proneness assessment of a mineral deposit to tectonic rockburst: A case-study of Yuzhnoe deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 74–78. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.12.

9. Zatsepin M. A., Gospodarikov A. P. On some approaches to numerical modeling of the dynamic destruction of rock masses during drilling and blasting operations. *Mining Journal*. 2023, no. 9, pp. 21–27. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.03.

10. Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A. Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development – Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM 2019*, 2020, pp. 330–335.
11. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the phenomenon of alternating reaction of rocks to dynamic influences — to pendulum-type waves in stressed geomedium. Part II. *FTPRPI*. 2013, no. 2, pp. 3–46. [In Russ].
12. Yamshchikov V. S. Methods and means of research and control of rocks and processes. Moscow, Nedra, 1982, 296 p. [In Russ].
13. Morozov K. V., Demyokhin D. N., Bakhtin E. V. Multicomponent strain gauges for assessing the stress-strain state of rock masses. *MIAB. Mining informational and analytical bulletin*. 2022, no. 6–2, pp. 80–97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80.
14. Belyakov N. A., Emelyanov I. A. Development of the approach to processing the results of stress state measurements by the ring unloading method. *News of Tula State University*. 2022, no. 2, pp. 192–207. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218–5194–2022–2–1–192–207.
15. Protosenya A. G., Belyakov N. A., Bouslova M. A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems. *Journal of mining institute*. 2023, vol. 262, pp. 619–627. [In Russ].
16. Morozov K., Shabarov A., Kuranov A., Belyakov N., Zuyev B., et al. Geodynamic monitoring and its maintenance using modeling by numerical and similar materials methods. *E3S Web Conf. 1st International Scientific Conference «Problems in Geomechanics of Highly Compressed Rock and Rock Massifs»*. 2019, vol. 129, article 01012, pp. 1–12. DOI: 10.1051/e3sconf/201912901012.
17. Ulusay R., Hudson J. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. Ankara, Turkey: ISRM Turkish National Group, 2007, 628 p.
18. Daniel A. Analysis of overcoring rock stress measurements performed using the CSIRO HI. International Progress Report IPR-04–06. Sweden, 2003, 266 p.
19. RF Patent No. 2763565 07/07/2021. Morozov K. V., Bakhtin E. V., Demyokhin D. N., Bakumenko S. V., Yakovlev N. A. A device for assessing the stress-strain state of a rock mass. 2021, bull. no. 1. [In Russ].
20. Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., Prib V. V. Identification of zones of increased burrow pressure in an explosive iron ore deposit. *Mining Journal*. 2020, no. 1, pp. 78–81. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.15.
21. Kotikov D. A., Shabarov A. N., Tsirel S. V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. *Mining Journal*. 2020, no. 1, pp. 28–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Морозов Константин Валентинович*¹ — канд. техн. наук, заведующий лабораторией геомеханики Научного центра геомеханики и проблем горного производства, Горный университет, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3597-756X>, Scopus Author ID: 57196008021;

*Демёхин Дмитрий Николаевич*¹ — старший научный сотрудник лаборатории геомеханики Научного центра геомеханики и проблем горного производства, e-mail:

demyokhin_dn@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7958-2290>, Author ID: 56462968700;

*Бахтин Евгений Валерьянович*¹ — ведущий инженер лаборатории геомеханики Научного центра геомеханики и проблем горного производства, e-mail: bahtin_ev@pers.spmi.ru, Author ID: 57211915520;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, 199106, Васильевский остров, 2¹ линия, д. 2, Россия.

Для контактов: *Морозов Константин Валентинович*, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Morozov K. V.*¹, Head of the Laboratory of Geomechanics, Scientific Center for Geomechanics and Mining, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3597-756X>, Scopus Author ID: 57196008021;

*Demekhin D. N.*¹, Senior Researcher, Laboratory of Geomechanics, Scientific Center for Geomechanics and Mining, e-mail: demyokhin_dn@pers.spmi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7958-2290>, Author ID: 56462968700;

*Bahtin E. V.*¹, Leading Engineer, Laboratory of Geomechanics, Scientific Center for Geomechanics and Mining, e-mail: bahtin_ev@pers.spmi.ru, Author ID: 57211915520;

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia.

Corresponding author: *Morozov K. V.*, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 06.10.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 06.10.2024; accepted for printing 10.10.2024.

