

МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

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

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Уровень современного состояния горной геомеханики во многом обусловлен широким использованием численного моделирования, реализованного в различных программных пакетах, таких как 3DEC, FLAG3D, SIMULIA ABAQUS, MAP3D, RS3, Elfen, EXAMINE 3D и других. Важнейшим условием для проведения корректного численного моделирования и выбором на его основе правильных мер для обеспечения устойчивого состояния выработок являются величины и направления действия главных напряжений (тензор напряжений). Знание тензора напряжений можно рассматривать как базовую точку, на которой строятся дальнейшие численные исследования, а также маркер, контролирующий результаты численного моделирования. На основе анализа существующих методов торцевой разгрузки (Overcoring) в работе сформулированы принципиальные положения, на базе которых создан аппаратно-программный комплекс по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. Основным элементом комплекса является многокомпонентный датчик деформации. Предложенная конструкция датчика позволяет получить полный тензор деформаций в критических точках массива. Рассмотрены основные положения методики проведения полевых работ по оценке НДС с использованием разработанного оборудования. Предложенная методика апробирована на 4 месторождениях РФ. Следует отметить, что разработанный многокомпонентный датчик деформации может быть использован при создании современных систем деформационного мониторинга, которые в совокупности с существующими системами мониторинга (сейсмического, акустического) и локальными методами контроля существенно повышают безопасность ведения горных работ.

Ключевые слова: Напряженно-деформированное состояние, методы торцевой разгрузки, многокомпонентный датчик деформаций, системы мониторинга деформаций, безопасность горных работ, тензор напряжений, программно-аппаратный комплекс, локальные методы контроля.

Для цитирования: 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.

Multicomponent strain gauges for assessing the stress-strain state of a rock mass

K. V. Morozov¹, D. N. Demekhin¹, E. V. Bakhtin¹

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

Abstract: The level of the current state of mining geomechanics is largely due to the widespread use of numerical simulation implemented in various software packages such as 3DEC, FLAG3D, SIMULIA ABAQUS, MAP3D, RS3, Elfen, EXAMINE 3D and others. The most important condition for carrying out correct numerical modeling and the choice on its basis of the correct measures to ensure the steady state of workings is the magnitude and direction of the main stresses (stress tensor). Knowledge of the stress tensor can be considered as a base point on which further numerical studies are built, and as a marker that controls the results of numerical simulation. Based on the analysis of existing methods of end unloading (Overcoring), the paper formulates the fundamental provisions on the basis of which a hardware-software complex was created for assessing the stress-strain state (SSS) of a rock mass. The main element of the complex is a multicomponent strain gauge. The proposed design of the sensor makes it possible to obtain the full strain tensor at the critical points of the massiv. The main provisions of the methodology for conducting field work on the assessment of SSS using the developed equipment are considered. The proposed technique has been tested at 4 fields of the Russian Federation. It should be noted, that the developed multicomponent strain gauge could be use to create modern deformation monitoring systems, which, together with existing monitoring systems (seismic, acoustic) and local control methods, significantly increase the safety of mining operations.

Key words: Stress-strain state, methods of end unloading, Multicomponent strain gauges, deformation monitoring systems, safety of mining operations, stress tensor, hardware-software complex, local control methods.

For citation: Morozov K. V., Demekhin D. N., Bakhtin E. V. Multicomponent strain gauges for assessing the stress-strain state of a rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):80–97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80.

Введение

В основу геомеханических моделей, используемых при проектировании и сопровождении горных работ, закладываются данные разведочного и эксплуатационного бурения, визуального и инструментального картирования горных выработок, каркасные и блочные модели рудных тел и вмещающего массива, модели горных выработок, данные различных систем (сейсмического, гидрогеологического, деформационного) мониторинга. Получение полного комплекса информации об объекте исследований является ключевым условием для проведения корректного численного моделирования и представляет возможность выбора на его основе правильных мер для обеспечения устойчивого состояния выработок. Одними из самых значимых, по нашему мнению, параметрами в этом комплексе являются величины и направления

действия главных напряжений (тензор напряжений).

Параметры тензора напряжений используются в различных областях геомеханики, таких как исследования механизмов возникновения [1 – 6] и мониторинга [7 – 9] горных ударов, численного анализа напряженного состояния в области нарушенных зон [10], исследования механизмов разрушения целиков [11], устойчивости откосов бортов карьера численными методами [12] и во многих других областях.

В общем случае, знание тензора напряжений можно рассматривать как базовую точку, на которой строятся дальнейшие численные исследования, а также как маркер, контролирующий результаты численного моделирования.

Определение принципов создания методики оценки НДС

Большинство исследований напряженного состояния строятся на базе

теории упругости. Первые работы проводились еще в 15 веке Леонардо да Винчи. С. Н. Никифоров в своей работе «Теория упругости и пластичности» [13] приводит исторические данные об исследованиях прочности тел Галилеем (1638), Гуком (1660), Мариоттом (1680), Бернулли (1705), Эйлером (1744), Ломоносовым и другими величайшими учеными. Теоретические аспекты распределения напряжений в массиве позволили сформулировать и разработать большое количество практических методов исследования. Так, в работе В. Н. Широкова [14] на основе систематизации выделено 28 методов изучения напряженного состояния горных пород. В общем случае различают механические и физические методы исследования. Как указывает В. С. Ямщиков [15], механические методы основаны на исследовании процессов деформирования горных пород. Физические методы основаны на измерениях «изменений физических свойств горных пород в массиве или параметров физических полей, существующих в земной коре, или вновь возникающих» [15] при ведении горных работ.

Механические методы включают в себя методы частичной и полной разгрузки, методы восстановления напряжений, как в локальных областях, так и на больших базах при ведении горных работ [15]. Согласно тематике статьи, наиболее интересны для нас механические методы полной разгрузки.

Классификация методов полной разгрузки части массива горных пород при нарушении его связи со вмещающим массивом сформулирована в работе С. С. Гребенкина, В. Н. Павлыша и др. [16] и приведена в табл. 1.

Существенным упущением приведенных данных является отсутствие сведений о необходимом количе-

стве скважин для получения искомых результатов и области применимости методов, в частности физико-механических свойств пород, обводненности и др.

Общие схемы трех приведенных методов показаны на рис. 1.

Как отмечает В. С. Ямщиков [15], наиболее сложный случай использования торцевой разгрузки при неизвестных направлениях главных напряжений связан с необходимостью бурения шести скважин по взаимно перпендикулярным направлениям и под углами 45° к основным плоскостям измерений. Количество необходимых скважин может быть сокращено до трех при известном направлении одного из главных напряжений. Для уменьшения влияния краевого влияния ядра рекомендуется бурить разгрузочную скважину диаметром 120–150 мм и глубиной переобуривания не менее 0.5 диаметра скважины.

Методики определения напряжений по методам с центральной измерительной скважиной (Хаста, Лимана) технически более трудоемки, но обладают огромным преимуществом — позволяют проводить исследования в породах средней и ниже средней прочности [15] и отличаются меньшей погрешностью определения параметров НДС.

Самым существенным недостатком рассмотренных выше схем измерений является то, что они проводятся только в плоскости перпендикулярной оси скважины, что приводит к необходимости бурения от 3 до 6 скважин для определения полного тензора напряжений.

Пытаясь обойти данное ограничение, западные исследователи разработали ряд методик и предложили специализированное оборудование для их реализации.

Говоря о мировых практиках, следует отметить, что Комиссия по мето-

Таблица 1
Классификация методов полной разгрузки
Classification of complete unloading methods

Метод определения напряжений	Объект, подлежащий исследованию	Величины, подлежащие измерению	Применяемые средства измерения	Способ перехода к напряжениям	Данные, требуемые для пересчета	Характеристика получаемых напряжений
Полная разгрузка. Схема ВНИИ	Керн	Деформация разгрузки на торце скважины	Тензометрические или фотоупругие датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве
Полная разгрузка. Схема Хаста	Керн с центральной скважиной	Измерение диаметра скважины	Тензометрические, магнитострикционные, емкостные датчики	Пересчет на базе теории упругости, лабораторное эталонирование	Тарировочная кривая деформации датчика в напряжениях, модуль упругости, коэффициент Пуассона	Величины и направления напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси скважины
Полная разгрузка. Схема Лимана	Керн с центральной скважиной	Деформация на поверхности скважины	Тензометрические датчики	Пересчет методами теории упругости	Модуль упругости и коэффициент Пуассона	Абсолютные величины и направления главных напряжений в массиве

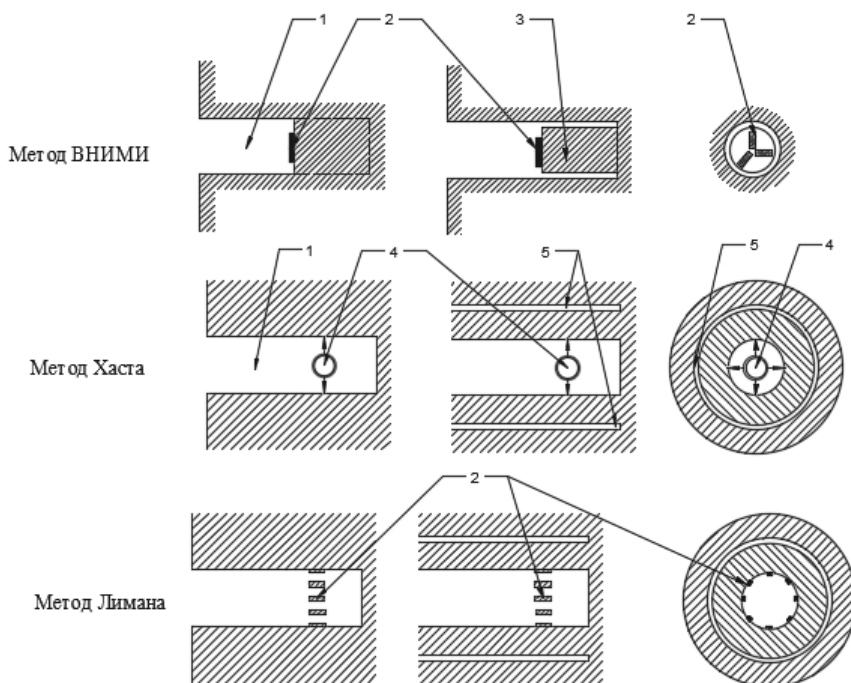


Рис 1. Типовые схемы проведения исследований НДС методами торцевой разгрузки: 1 – измерительная скважина, 2 – тензометрические датчики, 3 – керн, 4 – деформометр, 5 – разгрузочная скважина

Fig 1. Typical schemes for conducting SSS studies by overcoring method: 1 – measuring well, 2 – strain sensors, 3 – core, 4 – strain gauge, 5 – unloading well

дам испытаний (Commission on testing methods) Международной ассоциации по геомеханике (ISRM) рекомендует для использования следующие 4 методики [17]:

1. Метод определения напряжения в горных породах с помощью плоского домкрата (Suggested Method for Rock Stress Determination Using a Flatjack).

2. Метод гидроразрыва (Suggested Method for Rock Stress Determination Using the Hydraulic Fracturing Technique).

3. Метод определения напряжения в горных породах с использованием датчика деформации буровых скважин USBM-типа (Suggested Method for Rock Stress Determination Using a USBM-Type Drillhole Deformation Gauge).

4. Метод определения напряжения горных пород с использованием ячейки типа CSIRO с 9 или 12 тензодатчиками (Suggested Method for Rock Stress Determination Using a CSIR- or CSIRO-Type Cell with 9 or 12 Strain Gauges).

Первые два метода – аналог щелевой разгрузки с дальнейшей пригрузкой и гидроразрыва – выходят за рамки тематики данной статьи. Последние два метода имеют много реализаций, среди которых необходимо отметить CSIRO Triaxial HI-CELL Overcoring Test (далее CSIRO CELL) и Sigma In-situ Stress Testing (IST) by Overcoring System.

Методика CSIRO разработана в 1972 г. несколькими научными организациями, входящими в состав Организации научных и промышленных

исследований (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO). В основе измерений используется базовая схема Лимана. Трехосная ячейка CSIRO (рис. 2) запатентована в Австрии и серийно производится компанией Environmental Systems & Services Pty Ltd в Австралии [18].

Методика CSIRO CELL позволяет определить все компоненты главных напряжений в скважинах на глубинах до 150 м (рекомендуемая глубина 30 м). Измеряемыми параметрами являются пространственная ориентация и величины деформаций ячейки, упругие свойства породы, получаемые

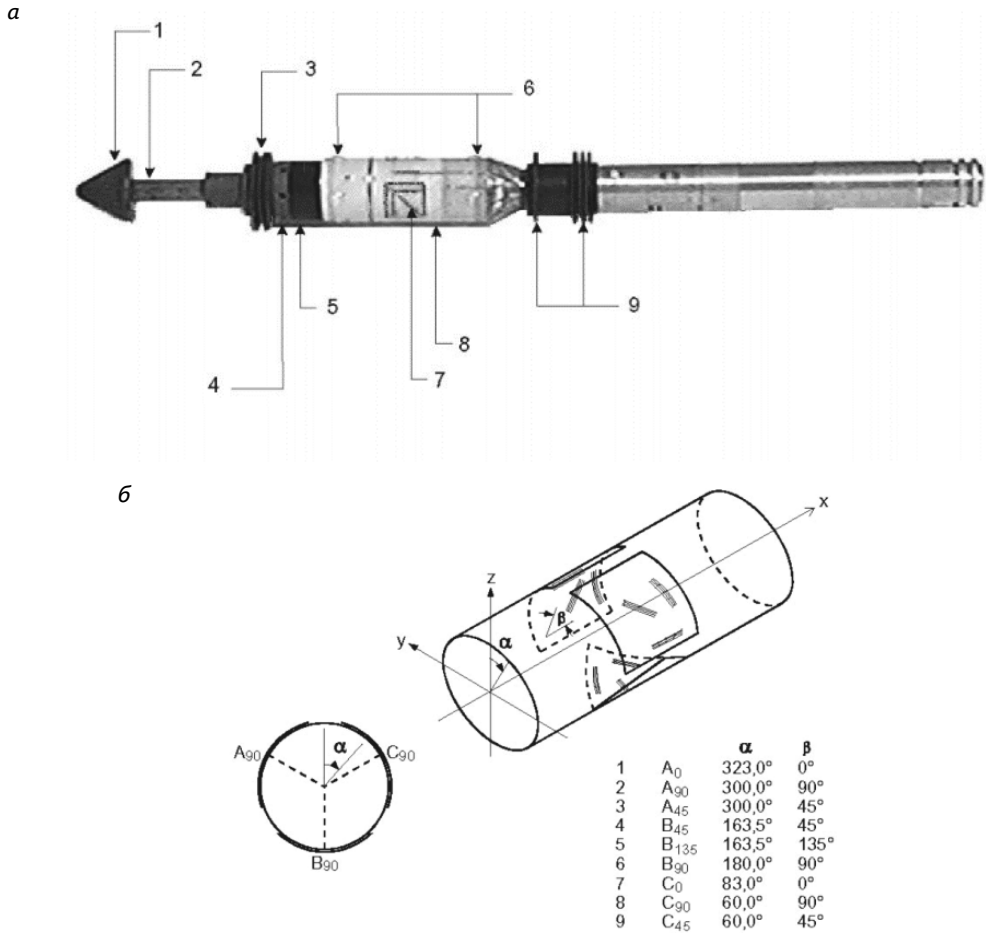


Рис. 2. Схема оборудования CSIRO CELL (а) и расположения тензодатчиков (б) в ячейке [18]: 1 – центрирующий наконечник, 2 – стержень определения глубины установки, 3, 9 – резиновые уплотнители, 4 – отверстия для выхода связывающей смеси, 5 – поршень, 6 – центрирующие выступы, 7 – тензорезисторы, 8 – емкость с твердеющим составом

Fig. 2. Diagram (a) of CSIRO CELL equipment and location of strain gauges (b) in cell [18]: 1 – centering tip, 2 – rod for determining the installation depth, 3, 9 – rubber seals, 4 – holes for the exit of the binding mixture, 5 – piston, 6 – centering protrusions, 7 – resistors, 8 – a container with a hardening composition

при испытании выбуренного керна. Обработка результатов проводится с помощью специализированного программного обеспечения (например, STRESS91, Miller, 1983).

Метод торцевой разгрузки CSIRO CELL имеет ряд ограничений: исследуемый массив должен быть малотрещиноватый, необходима возможность получения достаточно длинного керна, равного 2–3 диаметрам скважины. Твердеющие составы, используемые для обеспечения плотного контакта тензодатчиков со стенками скважины, могут по своим упругим характеристикам значительно отличаться от характеристик исследуемого массива, что вносит погрешности в получаемые результаты. Кроме того, сами тензодатчики могут давать неверные результаты. Так, при анализе данных, полученных при использовании CSIRO CELL в Aspo Hard Rock Laboratory, отмечается, что из 567 используемых датчиков 57 ошибочны, а показания 32 вызывают сомнения [19].

Наиболее интересный, с нашей точки зрения, метод предложен компанией Sibra (Австралия). Компания была основана в 1994 г. Исследования НДС проводятся с помощью разработанного в компании оборудования Sibra In-situ Stress Testing by Overcoring System (Sibra IST). Базовая схема изме-

рений — Хаста. Испытано на глубинах до 1000 м, в основном в вертикальных скважинах.

Беспроводная передача данных, по материалам производителя [20], позволяет проводить замеры на глубинах до 1500–2000 м [19, 20]. Отличается высокой скоростью проведения исследований. Так, разгрузка на глубинах 100 м занимает 1.5 часа, а на глубине 800 м — 4 часа. Количество точек замеров варьируется от 6 до 60. Конструкция датчика (рис. 3) позволяет работать в скважинах с незначительной трещиноватостью, исключая показания соответствующих индентеров из расчетов.

Sibra заявляет очень широкий диапазон прочностных свойств пород, в которых были проведены исследования НДС, от 4 МПа (шахта Crinum) до 280 МПа в породах дамбы Burdekin Falls [20]. Примеры результатов деформационных измерений показаны на рис. 4.

Основные ограничения метода связаны с параметрами ведения буровых работ (плавность процесса бурения, неравномерность давления гидравлики, вибрации) и интерпретацией результатов измерений в случае нелинейно-упругих свойств пород, наиболее характерных для осадочных массивов пород. Кроме того, данная методика не входит

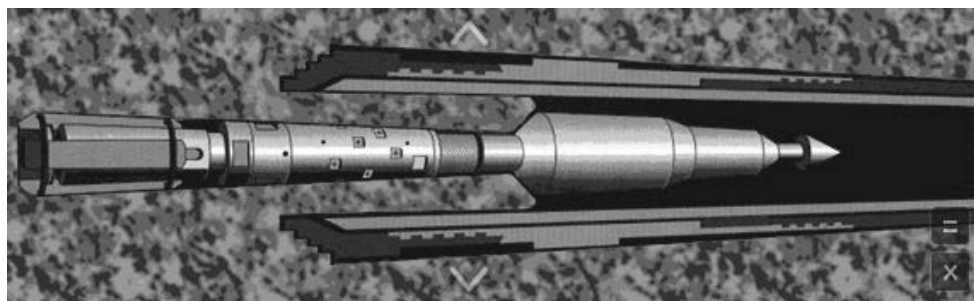
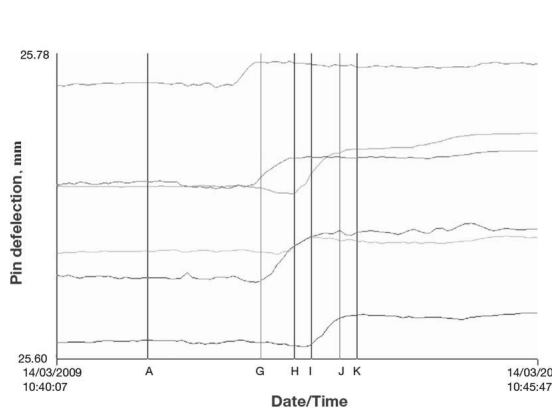
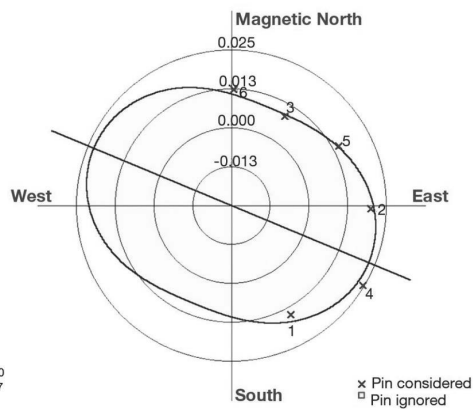


Рис. 3. Макет датчика Sibra IST [20]

Fig. 3. Sibra IST sensor [20]



a



б

Hole Reference	BD144
<u>Sigma</u> In-situ Stress Test (IST) Reference	124.029
Date of Test	20 Aug 2011
Material Description	Sandstone
Depth of Run	709.13 m
Young's Modulus	15,083 MPa
Poisson's Ratio	0.14
Unconfined Compressive Strength, UCS	74.60 MPa
Mean Effective Stress	16.02 MPa
<u>Deviatoric</u> Stress	4.80 MPa
Angle of Principal Effective Stress	23.08 Degr.
RMS Error	1.80 %
Maximum Principal Effective Stress	20.82 MPa
Minimum Principal Effective Stress	11.22 MPa
Ratio of Maximum Effective Stress over UCS	0.28
Horizontal Effective Stress due to Self-weight	1.70 MPa
Maximum Tectonic Stress	19.12 MPa
Minimum Tectonic Stress	9.51 MPa
Maximum Tectonic Strain	1.18E-03
Minimum Tectonic Strain	4.56E-04

в

Рис. 4. Графики изменения диаметра скважины в ходе разгрузки (а), лучшего соответствия теоретических деформаций фактическим данным (б) и пример таблицы выходных данных [20]

Fig. 4. Diagrams of borehole diameter changes during unloading (a), better correspondence of theoretical deformations to actual data (b) and an example of an output data table [20]

в состав предлагаемых методов, рекомендуемых ISRM для оценки напряжений в массивах, что значительно снижает ее ценность для практического применения.

Анализ существующих методов оценки напряженно-деформированного состояния массива позволил сформулировать несколько принципиальных положений, лежащих в основе созда-

ваемого аппаратно-программного комплекса по оценке НДС:

1. Целесообразно использовать специализированное оборудование, которое возможно тестировать и поверять до проведения полевых исследований, тем самым повысить надежность получаемых замеров деформаций.

2. Не рекомендуется использование схем с применением тензодатчиков вследствие сильной зависимости их показаний от параметров среды на месте проведения испытаний (прочностных свойств пород, трещиноватости массива, обводненности, соответствия упругих характеристик клея и пород, температуры и пр.).

3. Наиболее удачна, с нашей точки зрения, схема проведения испытаний по методике Хаста, с измерением деформаций центральной скважины при ее обурировании. Размещение измерительной аппаратуры непосредственно в теле датчика и беспроводная технология передачи данных позволят проводить измерения на любых глубинах, вне зоны влияния как отдельных выработок, так и всего комплекса выработок обрабатываемого месторождения.

Методика оценки НДС в массиве горных пород

Методика оценки напряженного состояния массива, разработанная в Научном центре Горного университета (далее методика) опирается на результаты деформационного мониторинга стенок измерительной скважины в моменты ее разгрузки соосной скважиной большего диаметра (схема Хаста). Ключевым компонентом методики является многокомпонентный датчик деформаций, разработанный совместно с ОАО «Авангард» [21–23].

В состав оборудования, необходимого для проведения кольцевой разгрузки, входят: датчики деформации

для проведения измерений деформаций пород при разгрузке массива, буровое оборудование, дизель-генератор для обеспечения электрического питания буровой установки, переносной компьютер с установленным специализированным ПО.

Для проведения исследований выбираются участки в боках и кровле выработок с соблюдением взаимно перпендикулярного (ортогонального) направления выполнения измерений. При выборе места заложения скважин следует обращать внимание на наличие признаков интенсивной трещиноватости, при обнаружении которых следует сменить место заложения.

Технология работ включает бурение измерительных скважин диаметром 76 мм. Для выполнения правильной постановки датчика и защиты от механических повреждений при обурировании во время разгрузки части массива главным условием является полное помещение датчика в подготовленную измерительную скважину. Кроме того, на глубину бурения измерительной скважины влияют фактические горно-геологические и горнотехнические условия в месте проведения измерений (наличие открытых трещин, толщина набрызг-бетонной крепи и т.д.).

Датчик в скважине монтируется вплотную к забою измерительной скважины. Для создания зоны разгрузки массива вокруг скважины с установленным датчиком методом обурирования выполняется кольцевая щель диаметром не менее 132 мм, шириной 4 мм. Установленная измерительная аппаратура фиксирует возникающие деформации стенок скважины при разгрузке массива.

На представленных ниже фотографических изображениях показаны основные этапы проведения инструментальных измерений деформаций

многокомпонентными датчиками ДД-3.3, включающие:

- выбор и геологическое описание фактического места проведения измерений на боку выработки в пределах участка исследований;

- монтаж буровой установки;

- бурение измерительной скважины в соответствии с необходимыми условиями выполнения инструментальных измерений и отбором образцов (керна) пород горного массива (рис. 5, а) для проведения дальнейших исследований физико-механических свойств пород;

- монтаж в подготовленной измерительной скважине датчика деформаций и проведение первичных измерений состояния массива (рис. 5, б);

- создание зоны разгрузки участка массива вокруг установленного датчика деформаций бурением разгрузочной скважины в соответствии с глубиной установки датчика в измерительной скважине (рис. 5, в);

- выполнение повторных измерений для определения деформаций горных пород приконтурного массива методом кольцевой разгрузки;

- извлечение датчика для дальнейшей углубки измерительной скважины (рис. 5, г).

Результаты

Разработана методика оценки НДС в массиве горных пород и конструкция многокомпонентного датчика деформации стенок измерительной скважины. Предложенная конструкция датчика [23] позволяет получить полный тензор деформаций в критических точках массива.

Основные технические характеристики датчика приведены в табл. 2.

Датчик (рис. 6) позволяет фиксировать деформации в массиве горных пород и динамические подвижки структурных блоков одновременно в десяти направлениях: 8 в плоскости ортогональной оси скважины и 2 направления вдоль оси скважины.



а



б



в



г

Рис. 5. Иллюстрация основных этапов натурных испытаний скважин по разработанной методике

Fig. 5. Illustration of the main stages of field testing of wells according to the developed method

Таблица 2

Характеристики многокомпонентного датчика ДД-3.4
Characteristics of the multi-component sensor DD-3.4

Основной параметр	Значение параметра
Диапазон измерения перемещений вдоль осей X, Y, XY, YX, Z, мм	8
Разрешающая способность измерения перемещений вдоль осей X, Y, XY, YX, Z, мкм	10
Температура окружающей среды, °С	-5..+20
Относительная влажность воздуха, %	30..95
Напряжение питания датчиков, В	12
Потребляемая мощность одним датчиком, не более, Вт	2
Глубина установки датчиков в скважине, м	0..15
Внешний диаметр датчика, мм	не более 73
Степень защиты оболочки	не ниже IP67



Рис. 6. Датчик деформаций ДД-3.4, оснащенный модулем беспроводной передачи данных
Fig. 6. Deformation sensor DD-3.4, equipped with a wireless data transmission module

Основной принцип работы датчика — изменение индуктивности измерительных катушек при перемещении скважинных индентеров. Установка и центрирование датчика в скважине проводится при помощи пантографов, установленных на его торцевых частях. По мере деформации скважины при ее разгрузке кольцевой щелью смещение стенок скважины передаётся через втулки с ферритовыми сердечниками на катушку индуктивности. Деформации фиксируются и сохраняются на считывающем устройстве датчика, которое подключается к переносному компьютеру. Подробное описание устройства и принципов работы датчика приведено в патенте [23].

Результаты камеральной обработки полевых исследований представляются в виде графиков деформаций по всем осям (или полуосям) измерений на каждом скважинном интервале исследова-

ний. Пример результата полевых исследований приведен на рис. 7.

Обработка полевых замеров проводится с помощью специализированного ПО и эмпирико-аналитических зависимостей, полученных по результатам численного моделирования.

Эмпирико-аналитические зависимости получены для усредненных деформационных свойств горного массива, и при выполнении пересчетов смещений стенок скважин при разгрузке в естественные напряжения в них вводится корректирующий коэффициент, отражающий различие фактических деформационных свойств горного массива с усредненными, заложенными при выполнении многовариантного моделирования. Учет структурной нарушенности горного массива выполняется путем введения поправки фактических деформационных свойств горных пород, получен-

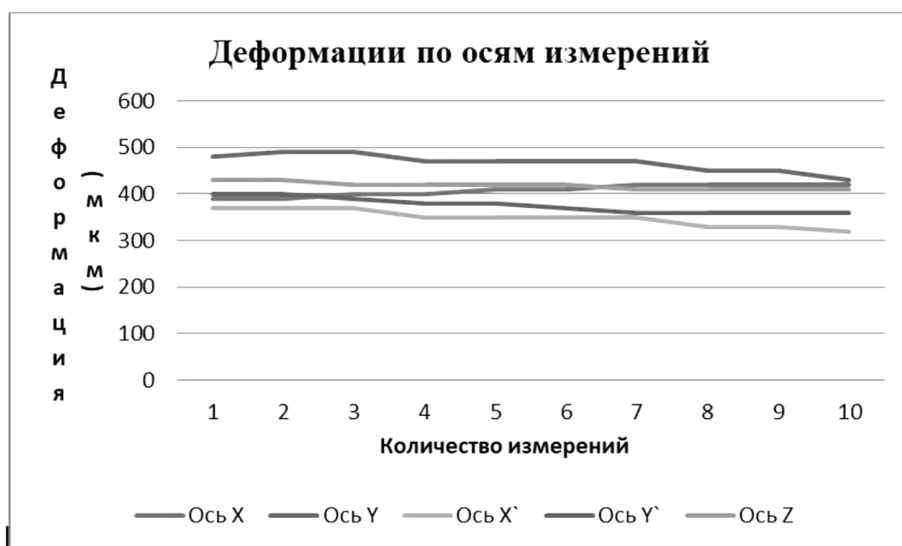


Рис. 7. Пример результата полевых исследований
 Fig. 7. Example of a field research result

ных на образцах керна, в деформационные свойства массива с учетом структурной нарушенности согласно рейтинговым системам.

Примеры получаемых зависимостей смещений контура скважины при разгрузке от уровня действующих напряжений, полученных на основе результатов численного и физического моделирования, показаны на рис. 8 и рис. 9.

Форма представления окончательного результата оценки величин действующих напряжений зависит от требований заказчика исследований. Пример представления результатов обработки данных полевых и численных исследований представлен в табл. 3.

Результаты и обсуждение

На сегодняшний момент предложенная конструкция многокомпонентного датчика деформаций и технология проведения работ позволяет определить деформации стенок измерительной скважины в пределах ± 4 мм с точностью до 10 мкм в широких темпера-

турных пределах и получить полный тензор деформаций. Предложенная методика апробирована на четырёх месторождениях РФ.

Важнейшим аспектом использования многокомпонентных датчиков деформаций является возможность разработки на их основе современных систем деформационного мониторинга критически важных подземных объектов.

Заключение

Анализ существующих механических методов оценки напряженно-деформированного состояния массива, и в частности методов разгрузки торца измерительной скважины, позволил сформулировать несколько принципиальных положений, на базе которых предлагается создать современный аппаратно-программный комплекс по оценке НДС.

Разработанная методика оценки НДС массива включает в себя геолого-техническое описание участка исследований, проведение комплекса буровых работ по созданию измерительных и раз-

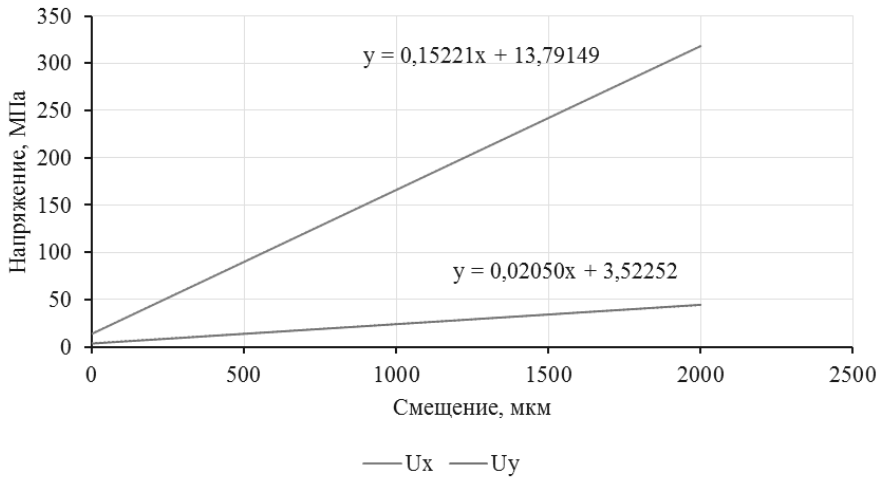


Рис. 8. Зависимости для расчёта главных естественных напряжений по результатам замеров смещений контура скважины в борту штрека
 Fig. 8. Dependencies for calculating the main natural stresses based on the results of measuring displacements of the drillhole contour on the side of the drift

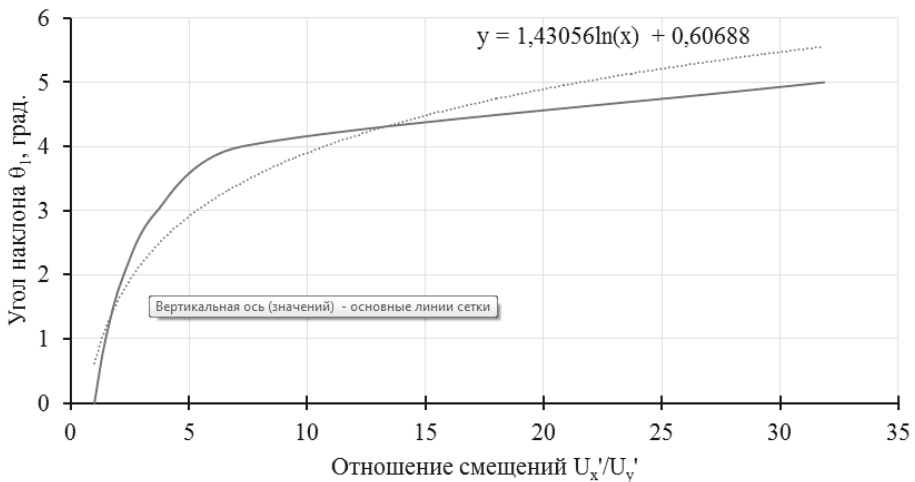


Рис. 9. Графики для расчёта угла наклона наибольших главных напряжений к горизонтальному направлению по простиранию рудного тела
 Fig. 9. Graphs for calculating the angle of inclination of the greatest principal stresses to the horizontal direction along the strike of the ore body

грузочных скважин, непосредственно процессы измерений и обработки полученных данных. Определение величин и направлений действующих напряжений проводится с использованием аналитических зависимостей, полученных

на основании многовариантного численного моделирования [24]. Необходимые параметры физико-механических свойств пород определяются в результате лабораторных исследований пород выбуренного керна.

Таблица 3

Пример представления результатов исследований. Ориентация главных площадок и величины главных напряжений

Example of presentation of research results. Orientation of the main areas and the magnitude of the main stresses

Точка замера	Координаты точки замера			Направляющие косинусы главных площадок		
	X	Y	Z	NX	NY	NZ
P-1-1	xxx,xx	xxx,xx	285,00	S1 = 18,88 МПа		
				0,991	0,131	0,000
				S2 = 14,06 МПа		
				-0,131	0,991	0,000
				S3 = 5,24 МПа		
				0,000	0,000	1,000
P-1-2	xxx,xx	xxx,xx	285,00	S1 = 19,28 МПа		
				0,990	-0,139	0,000
				S2 = 14,29 МПа		
				0,139	0,990	0,000
				S3 = 5,27 МПа		
				0,000	0,000	1,000
P-1-3	xxx,xx	xxx,xx	270,00	S1 = 19,68 МПа		
				0,995	-0,105	0,000
				S2 = 14,88 МПа		
				0,105	0,995	0,000
				S3 = 6,38 МПа		
				0,000	0,000	1,000
P-1-4	xxx,xx	xxx,xx	270,00	S1 = 19,53 МПа		
				0,988	-0,156	0,000
				S2 = 14,92 МПа		
				0,156	0,988	0,000
				S3 = 6,37 МПа		
				0,000	0,000	1,000
P-1-5	xxx,xx	xxx,xx	255,00	S1 = 20,24 МПа		
				0,998	0,061	0,000
				S2 = 15,36 МПа		
				-0,061	0,998	0,000
				S3 = 6,47 МПа		
				0,000	0,000	1,000
P-1-6	xxx,xx	xxx,xx	255,00	S1 = 20,33 МПа		
				0,998	0,061	0,000

Датчики деформаций, линии связи, серверы обработки и передачи данных наряду с установленными критериями

и разработанным программным обеспечением составляют ядро системы мониторинга деформаций. Построенные

системы мониторинга деформаций контролируют процесс деформирования массива горных пород и существенно дополняют результаты сейсмического контроля геодинамической обстановки, повышая безопасность и эффективность (отсутствие аварийных ситуаций) горных работ, особенно при разработке удароопасных месторождений.

Вклад авторов

Морозов К. В. — генерация идеи исследования; постановка задачи исследова-

ния; 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. *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.

2. *He M., Ren F., Liu D.* Rockburst mechanism research and its control // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28(5), pp. 829–837.

3. *Shuren W., Chunyang L., Wenfa Y., Zhengshen Z., Wenxue C.* Multiple indicators prediction method of rock burst based on microseismic monitoring technology // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017, vol. 10(6), pp. 132–140. DOI: 10.1007/s12517-017-2946-8.

4. *Козырев А. А., Панин В. И., Семёнова И. Е., Журавлева О. Г.* Геодинамическая безопасность горных работ в удароопасных условиях на Хибинских апатитовых месторождениях // *Журнал горной науки*. — 2018. — Т. 54. — № 5 — С. 734–743.

5. *Rasskazov I. Ju., Saksin B. G., Potapchuk M. I., Anikin P. A.* The researches of burst-hazard on mines in Russian far east // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018, vol. 1, pp. 153–166.

6. *Башков В. И., Христюков Е. А., Ерёмченко А. А., Филиппов В. Н., Конурин А. И.* Обоснование параметров систем разработки слепых рудных тел в удароопасных условиях на железорудных месторождениях Горной Шории // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2018. — № 3. — С. 18–31.

7. *Zhou J., Li X., Mitri H. S.* Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016, vol. 30(5), pp. 1–17. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943–5487.0000553.

8. *Kozyrev A., Konstantinov K.* Development of an expressmethod to control damages in underground mining excavations under rockburst hazardous conditions // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. 2017, vol. 17(13), pp. 253–259.

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

10. *Sainoki A., Schwartzkopff A. K., Jiang L., Mitri H. S.* Numerical Modeling of Complex Stress State in a Fault Damage Zone and Its Implication on Near-Fault Seismic Activity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021, vol. 116, no. 126 (7), pp. 1–22, DOI: 10.1029/2021JB021784.

11. *Das A. J., Paul P. S., Mandal P. K., Kumar R., Tewari S.* Investigation of Failure Mechanism of Inclined Coal Pillars: Numerical Modelling and Tensorial Statistical Analysis

with Field Validations // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54 (6), pp. 3263–3289.

12. *Chang Y., Chang, L., Ren, F.* Strength anisotropy of jointed rock slope considering mining damage: a numerical analysis method // *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020, vol. 11(1), pp. 2587–2614.

13. *Никифоров С. Н.* Теория упругости и пластичности. — М.: Наука, 1955. — 285 с.

14. *Широков В. Н.* Систематизация методов изучения напряжённого состояния массивов горных пород по информационному критерию // *Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. — Москва: Российский университет дружбы народов, 2014. — С. 639–645.

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

16. *Гребенкин С. С., Павлыш В. Н., Самойлов В. Л., Петренко Ю. А.* Управление состоянием массива горных пород. — Донецк: «ВИК», 2010. — 193 с.

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. Prof. Fecke. Stress-relief Methods with Triaxial Cell. 2004, pp. 1–7. Available at: URL: <http://pdf.gif-ettlingen.eu/englisch/13100.pdf>.


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

20. Исследования напряжения в условиях пласта (IST) по кернам колонкового бурения компании Sibra [сайт]. URL: <https://sibra.com.au/ru/>.

21. *Morozov K. V.* Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits // 14th International congress on rock mechanics and rock engineering, 2020, pp. 1318–1323.

22. *Морозов К. В., Цирель С. В., Куранов А. А.* Мониторинг деформаций массива горных пород вокруг выработок как часть системы прогнозирования динамических явлений при отработке удароопасных месторождений // *Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Сборник научных трудов*. — СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. — С. 358–363.

23. 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.

24. *Morozov K., Shabarov A., Kuranov A., Belyakov N., Zuyev B., Vlasenko D., Demekhin D., Bakhtin E.* 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, 01012, pp.1–12. DOI 10.1051/e3sconf/201912901012. 

REFERENCES

1. 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.

2. He M., Ren F., Liu D. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28(5), pp. 829–837.

3. Shuren W., Chunyang L., Wenfa Y., Zhengshen Z., Wenxue C. Multiple indicators prediction method of rock burst based on microseismic monitoring technology. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017, vol. 10(6), pp. 132–140. DOI: 10.1007/s12517-017-2946-8.

4. Kozыrev A. A., Panin V. I., Semenova I. E., Zhuravleva O. G. Geodynamic Safety of Mining Operations under Rockburst-Hazardous Conditions in the Khibiny Apatite Deposits. *Journal of Mining Science*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 734–743. [In Russ].

5. Rasskazov I. Ju., Saksin B. G., Potapchuk M. I., Anikin P. A. The researches of burst-hazard on mines in Russian far east. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018, vol. 1, pp. 153–166.
6. Bashkov V. I., Khristolyubov E. A., Eremenko A. A., Filippov V. N., Konurin A. I. Substantiation of mining system parameters for rock-burst hazardous blind iron ore bodies in Gornaya Shoria. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 3, pp. 18–31. [In Russ].
7. Zhou J., Li X., Mitri H. S. Classification of rockburst in underground projects: Comparison of ten supervised learning methods. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016, vol. 30 (5), pp. 1–17. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000553.
8. Kozyrev A., Konstantinov K. Development of an expressmethod to control damages in underground mining excavations under rockburst hazardous conditions. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*. 2017, vol. 17(13), pp. 253–259.
9. Eremenko A. A., Konurin A. I., Shtirts V. A., Prib V. V. Identification of higher rock pressure zones in rockburst-hazardous iron ore deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 78–81. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.15. [In Russ].
10. Sainoki A., Schwartzkopff A. K., Jiang L., Mitri H. S. Numerical Modeling of Complex Stress State in a Fault Damage Zone and Its Implication on Near-Fault Seismic Activity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021, vol. 116, no. 126 (7), pp. 1–22, DOI: 10.1029/2021JB021784.
11. Das A. J., Paul P. S., Mandal P. K., Kumar R., Tewari S. Investigation of Failure Mechanism of Inclined Coal Pillars: Numerical Modelling and Tensorial Statistical Analysis with Field Validations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54 (6), pp. 3263–3289.
12. Chang Y., Chang, L., Ren, F. Strength anisotropy of jointed rock slope considering mining damage: a numerical analysis method. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020, vol. 11(1), pp. 2587–2614.
13. Nikiforov S. N. The theory of elasticity and plasticity. Moscow, Nauka, 1955, 285 p. [In Russ].
14. Shirokov V. N. Systematization of methods for studying the stress state of rock mass by information criterion. *Sergeev Readings. "Development of scientific ideas of academician E. M. Sergeev at the present stage"*. 2014, M.: RUDN, vol. 16, pp. 639–645. [In Russ].
15. Yamshikov V. S. Methods and tools for research and control of rocks and processes, Moscow, Nedra, 1982, 296 p. [In Russ].
16. Grebenkin S. S., Pavlysh V. N., Samoilov V. L., Petrenko Yu. A. Management of the state of the rock mass, Donetsk, "VIK", 2010, 193 p. [In Russ].
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. Prof. Fecke. Stress-relief Methods with Triaxial Cell. 2004, pp. 1–7. Available at: URL: <http://pdf.gif-ettlingen.eu/englisch/13100.pdf>.
19. Daniel A. Analysis of overcoring rock stress measurements performed using the CSIRO HI. International Progress Report IPR-04-06. Sweden, 2003, 266 p.
20. In situ stress studies (IST) at the seam conditions from the core drilling cores by Sibra company. Available at: <https://sibra.com.au/ru/>.
21. Morozov K. V. Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits. *14th international congress on rock mechanics and rock engineering*, 2020, pp. 1318–1323.
22. Morozov K. V., Tsirel S. V., Kuranov A. A. Monitoring of deformations of rock mass around workings as part of a system for predicting dynamic phenomena during the development of rock burst hazardous deposits. *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Innovative directions in the design of mining enterprises"*, St. Petersburg Mining University, 2017. pp. 358–363. [In Russ].

23. Morozov K. V., Bahtin E. V., Demekhin B. N., Bakumenko S. V., Yakovlev N. A. *Patent RU 2763565*, 07.07.2021. Device for assessing the stress-strain state of a rock mass. [In Russ].

24. Morozov K., Shabarov A., Kuranov A., Belyakov N., Zuyev B., Vlasenko D., Demekhin D., Bakhtin E. 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, 01012, pp.1–12. DOI 10.1051/e3sconf/201912901012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*Демехин Дмитрий Николаевич*¹ — старший научный сотрудник лаборатории геомеханики Научного центра геомеханики и проблем горного производства, <https://orcid.org/0000-0001-7958-2290>, e-mail: demyokhin_dn@pers.spmi.ru;

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

¹ Горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 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, <https://orcid.org/0000-0003-3597-756X>, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru;

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

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

¹ 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 14.01.2022; получена после рецензии 11.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 11.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

