

УДК 622.833.5

Сентябов Сергей Васильевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Ушаков Евгений Михайлович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ КЫЗЫЛ-ТАШТЫГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ*

Аннотация:

Оценку напряженного состояния конструктивных элементов камерных систем разработки с обрушением крепких руд необходимо производить при решении геомеханических задач на основе выявленного несоответствия параметров прочностных свойств скальных горных пород, определенных по существующим методикам, их значениям в натуральных условиях. Разница между полученными значениями данных параметров может достигать 1,8 раза.

В процессе исследований определены параметры природного напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород на основе проведенных натурных исследований в условиях интенсивной разработки Кызыл-Таштыгского месторождения подземным способом.

Исследования направлены на снижение и прогнозирование риска геодинамических явлений при ведении горных работ. Данная задача неосуществима без ведения мониторинга напряженного состояния месторождения, информационного обеспечения недропользователей при геологическом изучении и разработке месторождения полезного ископаемого. Исследования проведены с помощью общепринятых методов и аппаратуры, согласно требованиям инструктивных документов.

Таким образом, расчетный геомеханический прогноз и определение первоначального напряженного состояния на рудниках остаются до настоящего времени весьма актуальными.

Ключевые слова: метод целевой разгрузки, напряженно-деформированное состояние, наблюдательная станция, устойчивость, переменные во времени напряжения, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI:

Sentyabov Sergey V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of the RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Ushakov Evgeniy M.

Junior Researcher, Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure, Institute of Mining,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

DETERMINATION OF INITIAL STRESSES OF A ROCK MASSIF IN CONDITIONS OF THE KYZYL-TASHTYG DEPOSIT

Abstract:

An assessment of the stress state of structural elements of chamber mining systems with the collapse of hard ores is to be made when solving geomechanical problems based on the identified discrepancy between the parameters of the strength properties of rocks, determined by existing methods, and their values in natural conditions. The difference between the obtained values of these parameters can reach 1.8 times.

In the process of research, the parameters of the natural stress-strain state (SSS) of the rock mass were determined based on field studies carried out under the conditions of intensive underground development of the Kyzyl-Tashtyg deposit.

Research is aimed at reducing and predicting the risk of geodynamic phenomena during mining operations. This task is not feasible without monitoring the stressed state of the deposit and providing information to subsoil users during the geological study and development of a mineral deposit. The studies were carried out using generally accepted methods and equipment, in accordance with the requirements of the instructional documents.

Thus, the calculated geomechanical forecast and determination of the initial stress state in mines remain very relevant to this day.

Key words: slot unloading method, stress-strain state, observation station, stability, time-varying stresses, rock mass, physical and mechanical properties.

Введение

Месторождение расположено в северной части Кызыл-Таштыгской депрессии и локализовано в нижнекембрийских слаботрещинчатых скальных и полускальных породах. Депрессия сложена вулканогенным и осадочным комплексами пород, входящими в состав верхней подсвиты туматтайгинской и сыынакской свит. Депрессия имеет блоковое строение, внутри ее выделяются прогибы и поднятия.

* Исследования выполнены по государственному заданию № №075-00412-22 ПП, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Вулканогенно-осадочные вмещающие породы подвержены различной степени выветривания и трещиноватости.

Рудные тела в основном залегают согласно с контактами литологических разновидностей вмещающих пород, реже залегание их обусловлено развитием тектонических зон. В плане рудные тела расположены в пределах участка протяженностью 1000 м и шириной 150 – 200 м, по падению на глубину до 350 – 500 м.

Вмещающие породы в зависимости от структурно-текстурных особенностей в основном имеют достаточно высокие прочностные показатели.

Породы надрудной толщи представлены диабазовыми порфиритами, туфами смешанного и кислого состава и зеленокаменными породами, относятся к породам средней и высокой крепости, которая по шкале М.М. Протодыяконова составляет в среднем $f = 6 \div 9$, для незатронутых процессами метаморфизма вулканогенных пород коэффициент крепости составляет 10 – 15.

Устойчивые участки массива горных пород и участки средней устойчивости представлены альбитофирами, кварцитами, порфиритами крепостью 10 – 15.

Ограниченно устойчивые участки массива представлены серицитовыми и хлоритовыми сланцами, кварц-хлоритовыми породами крепостью 3 – 4.

Возникающие в массиве горных пород тектонические напряжения необходимо рассматривать как изменяющиеся по амплитуде горизонтальные нагрузки с определенной периодичностью. Реальный подход к оценке напряженного состояния пород – экспериментальные натурные измерения в пространстве рудников и во времени с установлением закономерностей их роста с глубиной и изменения в пространстве [2 – 3].

Методы определения изменения НДС массива горных пород

На данный момент методы определения НДС делятся на 3 основных вида – геологические, геомеханические, геофизические и др. методы [4 – 10].

Геомеханические методы обладают относительно высокой точностью определения напряжений, так как основаны на прямых измерениях деформационных процессов в области массива. Но они являются весьма трудозатратными, а результаты имеют локальный характер. Методы можно разделить на 3 группы [2], представленные в табл. 1.

Таблица 1

Геомеханические методы

Деформационные методы	Компенсационные методы	Методы полной разгрузки керна
Метод частичной разгрузки	Метод гидроразрыва	Метод ВНИМИ
Метод разности давлений	Метод плоских домкратов	Метод Хаста
Метод щелевой разгрузки	Метод компенсационной нагрузки	Метод Лимана
Метод параллельных скважин	Метод буровых скважин	
Метод упругих включений		

В основе деформационных методов – определение упругих деформаций и пересчет их в НДС массива.

Метод частичной разгрузки

Метод основан на измерении деформаций области массива, разгруженной центральным отверстием.

Этот метод имеет 3 модификации:

- метод разгрузки с наклеиванием тензодатчиков;
- метод разгрузки с использованием съемных тензометров;
- метод разгрузки на большой базе.

Погрешности данных методов зависят от погрешностей измерения исходных величин и упругих характеристик горных пород [3].

Метод щелевой разгрузки

Этот метод является одним из основных методов для оценки деформаций массива после нарушения его целостности. По сравнению с другими методами разгрузки, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений [1].

Методика позволяет исключить большинство ураганных значений напряжений, возникающих от влияния локальных одиночных трещин, по сравнению с измерениями деформаций в буровых скважинах. Методика позволяет оперативно получить количественные характеристики первоначального поля напряжений в масштабе основных конструктивных элементов систем разработки (рис. 1) [1].

Методика измерения первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Измерение напряжений горных пород производилось по методике ИГД УрО РАН [1 – 3]. Основные положения методики приведены ниже.

Метод щелевой разгрузки является одним из видов натурных измерений напряжений, основанным на оценке деформаций массива после нарушения его сплошности [11 – 14]. По сравнению с другими методами разгрузки, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений.

Метод щелевой разгрузки основан на измерении деформаций стенки выработки, возникающих при создании в ней полости в виде щели и измерения при этом соответствующих реакций в виде деформаций по распорным реперам, установленным перпендикулярно разгрузочной щели (см. рис. 1). Метод достаточно помехоустойчив за счет осреднения информации на базе около 3 диаметров образованной щели.

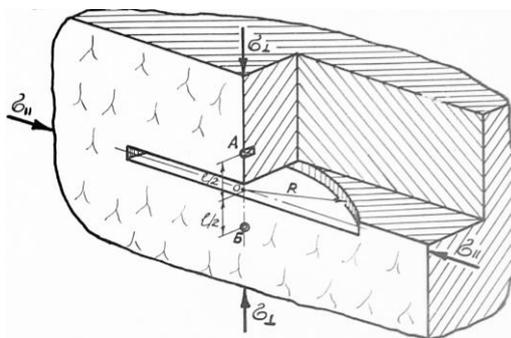


Рис. 1. Схема к измерению напряжений методом щелевой разгрузки

В вышеизложенном порядке на различных горизонтах рудника в процессе закладки наблюдательных станций горного давления выполнено 15 разгрузочных щелей. Фотографии, фиксирующие этапы производства работ, приведенные в данном отчете, взяты из фотоархива по полевым работам, а также предоставлены специалистами геомеханической службы, осуществлявшей содействие и сопровождение в проведении полевых работ по закладке наблюдательных станций горного давления.

Для горизонтальной и вертикальной щелей при производстве работ на станции основное отличие в ориентировании пропила – вертикально или горизонтально. Соответственно, в результате производятся измерения горизонтальных (вертикальных) деформаций.

Определение первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Вмещающие породы и руды Кызыл-Таштыгского месторождения по своим физическим свойствам представлены двумя типами: скальными и полускальными (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства пород Кызыл-Таштыгского месторождения

Наименование руд и пород	Категория крепости по буримости	Коэффициент крепости по Протодяконову	Объемный вес, т/м ³	Пористость, %	Влажность, %
Массивная медно-свинцово-цинковая руда	IX-X	8-10-15	4,1	0,26	0,24
Вкрапленная медно-свинцово-цинковая руда	VIII-X	8-10-15	3,9	0,18	-
Массивная медно-цинковая руда	IX-X	8-10-15	4,2	0,23	0,26
Вкрапленная медно-цинковая руда в кварц-карбонатной породе	VIII-X	8-10-15	3,5	0,59	0,27
Вкрапленная медно-цинковая руда в кварц-хлоритовых сланцах	V-VII	3	3,4	-	-
Массивные колчеданные руды	IX-X	8-10-15	4,5	0,65	0,22
Альбитофиры	IX-X	15	2,6	0,08	-
Кремнистые сланцы	X-XI	15	2,6	0,05	-
Кварциты	X-XI	15	2,6	0,06	-
Кварц-карбонатная порода	VIII-X	8	2,7	0,45	-
Диабазовый порфирит	VIII-IX	10	2,8	0,11	-
Туфопорфириды	VIII-X	10	2,6	0,41	-
Зеленокаменная порода	VIII-X	4-10	2,6	0,16	-
Хлоритовые сланцы	V-VII	3	2,7	0,03	-
Туффиты	VIII-X	4-10	2,6	0,13	-
Плагиопорфириты	VIII-X	4-10	2,6	0,07	-
Кварц-хлоритовая порода	V-VII	3	2,7	0,26	-
Туфы кислого состава	VIII-X	4-10	2,6	0,18	-
Серицитовые сланцы	V-VII	3	2,7	0,10	-
Порфириды	VIII-X	10	2,6	0,15	-
Туфы смешанного состава	VIII-X	4-10	2,6	0,19	-

К скальным породам относятся массивные сплошные руды всех типов, альбитофиры, порфириты, туфы, зеленокаменные породы, кварцево-карбонатные породы и кремнистые сланцы. Для скальных пород характерны высокая прочность, крепость, монолитность, устойчивость в условиях выветривания, способность выдерживать вертикальные откосы в обнажениях в течение длительного времени. По буримости скальные породы относятся к 8 – 12 категориям. Объемный вес их составляет 2,56 – 2,80 т/м³, величина пористости 0,05 – 0,3 %, влажность не превышает 0,3 %.

К полускальным породам относятся туфопорфириды, порфириды, порфиритоиды, серицитовые и хлоритовые сланцы, серицитизированные туффиты и филлитизированные кремнистые сланцы. Эти породы имеют склонность к размоканию (особенно сланцы), неустойчивы в условиях выветривания и подземных выработок, обладают пониженными прочностью и крепостью. Категория полускальных пород по буримости высокая – до 8.

Результаты замера первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Принято решение в качестве режущего инструмента использовать отрезную машину по камню с алмазным диском. Данное оборудование полностью автономно, не требует подключения к магистралям со сжатым воздухом, привязки к электрическим сетям и водопроводу, что позволяет существенно увеличить количество экспериментальных замеров для получения натуральных данных, т.к. время на выполнение замера не превышает 20 мин, а также расширяет возможности выбора мест производства исследований. Реперы также претерпели изменения, вместо съемных цапговых появилась возможность применять постоянные оловянные. Это позволило снизить себестоимость их производства, а также появилась возможность производить измерения напряженного состояния во времени. Схема расположения замерных станций методом щелевой разгрузки горизонт п/э -120 м Кызыл-Таштыгского подземного рудника представлена на рис. 2.

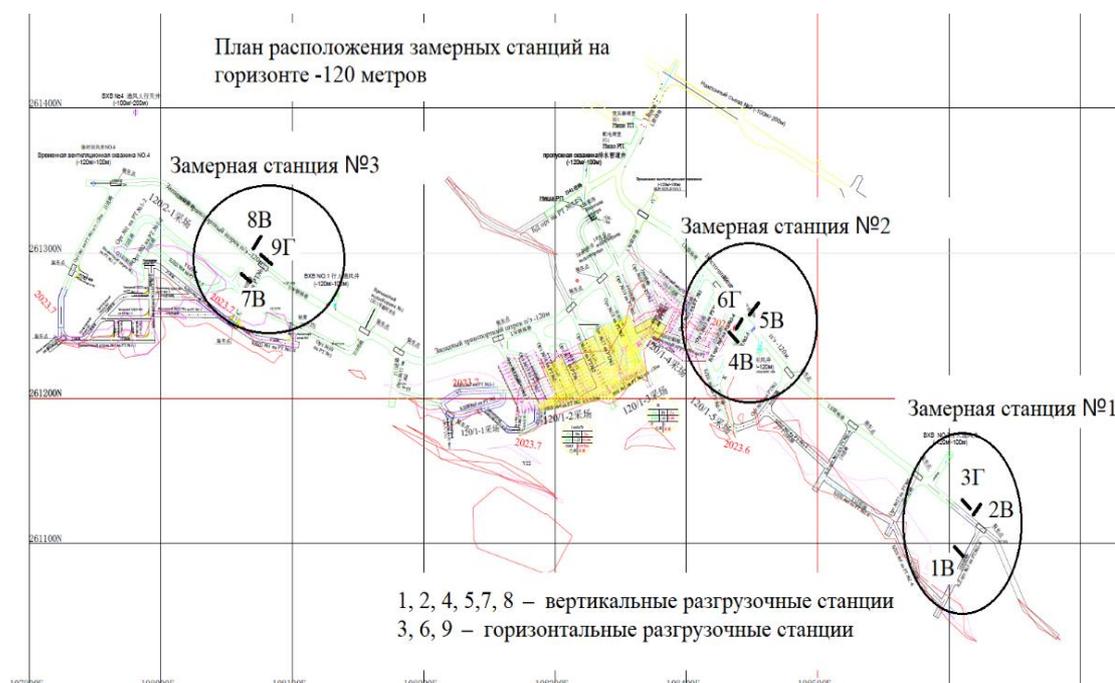


Рис. 2. Схема расположения замерных станций методом щелевой разгрузки горизонт п/э -120 м Кызыл-Таштыгского подземного рудника

Напряжения в массиве горных пород вычисляются по формулам:

$$\sigma_{z(\perp)} = \frac{\sigma_{z(\perp)}^K - \sigma_{\parallel} K_{z(\parallel)}}{K_{z(z)}}; \quad \sigma_{z(\parallel)} = \frac{\sigma_{z(\parallel)}^K - \sigma_{\perp} K_{z(\perp)}}{K_{z(z)}};$$
$$\sigma_{\perp} = \sigma_{\perp}^K - \mu [\sigma_z (K_{z(z)} - 1) + \sigma_{\parallel} (K_{z(\parallel)} - 1)];$$
$$\sigma_{\parallel} = \sigma_{\parallel}^K - \mu [\sigma_z (K_{z(z)} - 1) + \sigma_{\perp} (K_{z(\perp)} - 1)],$$

где $\sigma_{z(\perp)}^K$, $\sigma_{z(\parallel)}^K$ – вертикальные напряжения на контуре выработок, ориентированные, соответственно, вкрест и по простиранию рудного тела; $\sigma_{z(\perp)}^K$, $\sigma_{z(\parallel)}^K$ – горизонтальные напряжения на контуре выработок; $K_{z(z)}$, $K_{z(\perp)}$, $K_{z(\parallel)}$ – коэффициенты концентрации напряжений на контуре выработок в конкретных сечениях.

Среднеквадратическое отклонение результатов для средних величин напряжений определяются по формуле:

$$\rho = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n-1}},$$

где Δ – разность между средними значениями напряжения и отдельным результатом определения, МПа; n – число единичных определений напряжений.

Выводы

Наиболее благоприятным местом для определения природного напряженного состояния массива, по данным визуального обследования, является гор. п/э -120 м. Замерная станция № 1 находится на пересечении восточного транспортного штрека и буродоставочного орта № 27. Замерная станция № 2 находится на пересечении восточного транспортного штрека и буродоставочного орта № 24. Замерная станция № 3 находится на пересечении западного транспортного штрека и буродоставочного орта № 8. На этом участке заложены станции горного давления в форме 9 разгрузочных щелей по вышеприведенной методике.

Максимальными действующими напряжениями в массиве являются горизонтальные поперечные, продольные напряжения составляют 80 % от поперечных. В среднем отношение горизонтальных напряжений к вертикальным составляет 0,62. Можно предположить, что кровля горных выработок на нижних горизонтах рудника будет менее устойчива, чем стенки.

Заключение

В результате проведенных исследований в значительной мере повышена степень геомеханической изученности массива горных пород Кызыл-Таштыгского месторождения.

Сформированная система мониторинга деформационных процессов, возникающих в конструктивных элементах системы разработки, учитывает закономерности распределения параметров природных и техногенных напряжений, протекающих в массиве горных пород как решающий фактор в разрушении и деформировании конструктивных элементов системы разработки.

Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333с.
2. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., 2012. *Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс*. Москва: МГГУ, 112 с.
3. Влох Н.П., 1994. *Управление горным давлением на подземных рудниках*. Москва: Недра, 208 с.

4. Курленя М.В., Кулаков Г.И., Храмов В.Ф., 1990. Влияние разгрузочной щели на напряженное состояние днища рудных блоков. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 3, С. 3-6.
5. Барышников В.Д., Курленя М.В., Гахова Л.Н., 1998. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве. *Гидротехническое строительство*, № 9, С. 59.
6. Катков Т.А., 1978. *Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография*. Москва: Наука, 130 с.
7. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н., 1994. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород. *ФТПРПИ*, № 1, С. 3 – 20.
8. Гребёнкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А., 2010. *Управление состоянием массива горных пород*. Донецк: "ВИК", 193 с.
9. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И. и др., 2016. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 41-49.
10. Сентябов С.В., 2022. Выбор методов управления горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 7-15. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
11. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 720, P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
12. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, P. 406-417.
13. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, P. 55-63.
14. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206, P. 1-4 (012011) (accessed: <http://library.sibsru.ru>).

References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]*. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., 2012. *Metody opredeleniya napryazhëno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyx porod: nauchno-obrazovatel'nyi kurs [Methods for determining the stress-strain state of a rock mass: a scientific and educational course]*. Moscow: MGGU, 112 p.
3. Vlokh N.P., 1994. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnykh rudnikakh [Management of rock pressure in underground ores]*. Moscow: Nedra, 208 p.
4. Kurlenya M.V., Kulakov G.I., Khramtsov V.F., 1990. Vliyanie razgruzochnoi shcheli na napryazhennoe sostoyanie dnishcha rudnykh blokov [Influence of the loading gap on the stress state of the bottom of ore blocks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 3, P. 3-6.
5. Baryshnikov V.D., Kurlenya M.V., Gakhova L.N., 1998. Opyt primeneniya metoda parallel'nykh skvazhin dlya otsenki deistvuyushchikh napryazhenii v betonnom massive [Experience of using the parallel borehole method to assess the operating stresses in a concrete massif]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, № 9, P. 59.
6. Katkov T.A., 1978. *Issledovanie gornogo davleniya s primeneniem fotouprugikh elementov: monografiya [Investigation of rock pressure using photoelastic elements: monograph]*. Moscow: Nauka, 130 p.

7. Kurlenya M.V., Leont'ev A.V., Popov S.N., 1994. Razvitie metoda gidrorazryva dlya issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya massiva gornyx porod [Development of the hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock mass]. FTPrPI, № 1, P. 3-20.
8. Grebenkin S.S., Pavlysh V.N., Samoilov V.L., Petrenko Yu.A., 2010. Upravlenie sostoyaniem massiva gornyx porod [Management of the state of the rock mass]. Donetsk: "VIK", 193 p.
9. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Lipin Ya.I. i dr., 2016. Deformatsionnye metody opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya porod na ob"ektakh nedropol'zovaniya [Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsurface use facilities]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4, P. 41-49.
10. Sentyabov S.V., 2022. Vybore metodov upravleniya gornym davleniem pri osvoenii glubokozalegayushchikh mestorozhdenii [Choosing the methods for rock pressure managing during development of deep-lying deposits]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 7-15. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
11. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 720, P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013.
12. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, P. 406-417.
13. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, P. 55-63.
14. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206, P. 1-4 (012011) (accessed: <http://library.sibsiu.ru>).