

Прогноз геомеханического состояния массива пород в сложных горно-геологических условиях по данным натурных исследований

К.Н. Константинов¹✉, Ю.А. Старцев¹, Е.А. Лобанов², Т.С. Муштекезов³, А.А. Цымбалов³

¹ Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

² ООО «Канекс Шахтострой», г. Москва, Российская Федерация

³ ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Российская Федерация

✉ k.konstantinov@ksc.ru

Резюме: С целью обеспечения производственных процессов на Октябрьском месторождении богатых сульфидных руд на глубине 2000 м с 2020 по 2023 г. выполнялась проходка двух разведочных выработок на горизонтах –1650 м и –1750 м протяженностью порядка двух километров каждая. Для обеспечения ведущихся горных работ прогнозом геомеханического состояния массива пород выполнялись натурные исследования в опережающих скважинах методом ультразвукового каротажа, телеметрии ствола скважин, методом дискования керна. Метод ультразвукового каротажа предназначен для изучения упругих свойств и трещиноватости горных пород. Методом телеметрии оценивается трещиноватость ствола опережающих скважин, наличие различных геолого-структурных неоднородностей. Метод дискования керна основан на способности к хрупкому разрушению прочных скальных пород.

Установлено, что вектор главных сжимающих напряжений разнонаправленно действует в массиве пород исследуемых выработок. Отдельные случаи выявления участков дискования керна и «дорожек» на контуре опережающих скважин по своим параметрам не являются представительными для отнесения данных участков к категории «опасно» по горным ударам.

Совокупность полученных данных указывает на эффективность примененного прогноза геомеханического состояния в опережающих скважинах, сведения о геомеханическом состоянии массива пород в окрестности опережающих скважин позволили своевременно выдавать рекомендации по порядку ведения горных работ с целью обеспечения устойчивости сооружаемых горных выработок.

Ключевые слова: геомеханика, опережающие скважины, ультразвуковой каротаж, метод дискования керна, трещиноватость, скорость продольной волны, телеметрия, поле напряжений, удароопасность, устойчивость выработок

Для цитирования: Константинов К.Н., Старцев Ю.А., Лобанов Е.А., Муштекезов Т.С., Цымбалов А.А. Прогноз геомеханического состояния массива пород в сложных горно-геологических условиях по данным натурных исследований. *Горная промышленность*. 2024;(5):129–134. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-129-134>

Forecast of the geomechanical state of the rock mass in difficult mining and geological conditions based on in-situ test data

K.N. Konstantinov¹✉, Yu.A. Starcev¹, E.A. Lobanov², T.S. Mushtekenov³, A.A. Tsymbalov³

¹ Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

² Kanex Shakhtostroy LLC, Moscow, Russian Federation

³ Polar Branch of MMC Norilsk Nickel, Norilsk, Russian Federation

✉ k.konstantinov@ksc.ru

Abstract: In order to support production processes at the Oktyabrsky deposit of rich sulfide ores at a depth of 2000 m two exploration workings were driven in 2020-2023 at the Levels of -1650m and -1750 m. with a length of about two kilometers each. In order to provide ongoing mining operations with a forecast of the geomechanical state of the rock mass, field studies were performed in advanced boreholes using ultrasonic logging (UL), borehole telemetry, and core dinking. The UL method is used to study the elastic properties and fracturing of rocks. The fracturing of the bore of the advanced boreholes and the presence of various geological and structural heterogeneities are estimated by the telemetry method. The core dinking method is based on the ability of hard rocks to brittle fracture.

It is established that the vector of the main compressive stresses acts in the rock mass of the studied workings in different directions. Individual cases of identifying the core diskings zones and "tracks" on the periphery of the advanced boreholes are not representative in their parameters for classifying these sites as "rock bump hazardous".

Thus, a combination of the obtained data proves the efficiency of the applied forecast of the geomechanical state of the advance boreholes, while the information on the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of the advance boreholes made it possible to timely make recommendations regarding the mining procedures in order to ensure the stability of the workings being constructed.

Keywords: geomechanics, advance boreholes, ultrasonic logging, core diskings method, fracturing, longitudinal wave velocity, telemetry, stress field, impact hazard, stability of workings

For citation: Konstantinov K.N., Starcev Yu.A., Lobanov E.A., Mushtekenov T.S., Tsybalov A.A. Forecast of the geomechanical state of the rock mass in difficult mining and geological conditions based on in-situ test data. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):129–134. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-129-134>

Введение

Развитие действующего горнодобывающего предприятия как в российской, так и зарубежной практике отработки рудных месторождений полезных ископаемых подразумевает интенсификацию ведущихся горных работ на глубоких горизонтах. Так, к примеру, на многих зарубежных рудниках США, Индии, Канады, Австралии и ЮАР глубина разработки уже сильно превысила 2000 м [1]. Многие горнорудные предприятия России для поддержания экономических показателей также вынуждены переходить на отработку горизонтов на глубинах более 1000 м. Так, к примеру, в Норильском регионе глубина горных работ уже превышает 1600 м [2].

Для обеспечения производственных процессов на глубине до 2000 м на шахте «Глубокая», отрабатывающей Северные залежи Октябрьского месторождения богатых сульфидных руд, практически запущены в эксплуатацию вентиляционный (ВС-10) и скипово-клетевой (СКС-1) стволы глубиной около 2 км от дневной поверхности каждый. В рамках доразведки глубоких рудных залежей и обеспечения эффективного ведения добычных работ от ВС-10 с 2020 г. по первое полугодие 2023 г. выполнялась проходка разведочных выработок РВ-1 и РВ-2 на горизонтах –1650 м и –1750 м соответственно протяженностью порядка двух километров каждая с планируемой сбойкой на околоствольный двор СКС-1. Ведение горных работ на таких сверхглубоких отметках, уникальных для Евразии, сопряжено с целым рядом влияющих факторов, среди которых геомеханическое состояние массива пород на этапе строительства выработок является одним из основополагающих и требующим особого внимания [3].

Специалистами Горного института КНЦ РАН начиная с первой половины 2020 г. и по октябрь 2022 г. проводилось научно-методическое сопровождение по вопросам геомеханики в период проходки РВ-1 и РВ-2, осуществлявшейся силами ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ»¹. Помимо получения инструментальных сведений о нарушенности массива пород [4] и оценки напряженно-деформированного состояния в комплексе с численным моделированием в окрестности закрепленной части сооружаемых выработок [5], с целью обеспечения прогнозов геомеханического состояния ведущихся горных работ выполнялись инструментальные исследования в опережающих

скважинах (ОС) комплексом методов, ранее прошедших многолетнюю апробацию и рекомендованных к применению на удароопасных рудниках нормативными документами².

Методы исследования

Основными горно-геологическими условиями, определяющими устойчивость горных выработок и которыми необходимо руководствоваться при выборе методов инструментального прогноза геомеханического состояния, являются сложное гравитационно-тектоническое напряженное состояние массива пород [6; 7], глубина ведения горных работ [2; 8; 9], прочностные показатели физико-механических свойств пород [10; 11].

Прогноз напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности выработок по соосно пробуренной ОС основан на геомеханическом подобии скважины и выработки с учетом масштабного эффекта. На рис. 1 представлена примененная на шахте «Глубокая» схема бурения горизонтальной ОС с забоя выработки. По таким горнотехническим условиям, как отсутствие очистной выемки и сопряженных выработок, сооружаемые РВ-1 и РВ-2 относятся к одиночным. При этом для больших глубин в условиях сложного напряженного состояния ранее установлены закономерности распределения напряжений в призабойной области [12] сооружаемых одиночных выработок. Влияние действующих в нетронутым массиве пород напряжений вследствие их концентрации на контуре выработки может реализовываться в виде внешних признаков проявления горного давления как на поверхности забоя выработки, так и на расстоянии двух диаметров выработки D_m от плоскости забоя (зона А на рис. 1), быстро снижаясь в глубине массива впереди забоя до естественных напряжений (зона С на рис. 1). Причем наибольшей концентрации тангенциальные напряжения достигают позади забоя (зона А на рис. 1) на расстоянии двух диаметров $2D_m$ максимального размера поперечного сечения выработки.

² Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей). [сост. А.А. Козырев, И.Э. Семенова, В.В. Рыбин, А.В. Земцовский, Ю.В. Федотова, К.Н. Константинов, Е.А. Лобанов, И.В. Сулов, Д.С. Волков, А.В. Пантелеев]: Апатиты; Кировск: ГОИ КНЦ РАН; АО «Северо-западная фосфорная компания» – изд-во «КазМ»; 2015. 101 с.; РД 06-329-99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. Вып. 1. Серия 06. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности. 2-е изд. М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России; 2003. 88 с.

¹ Организация и реализация инструментальных исследований осуществляются при непосредственном содействии исполнительного директора ООО «Канекс Шахтострой» Д.С. Волкова.

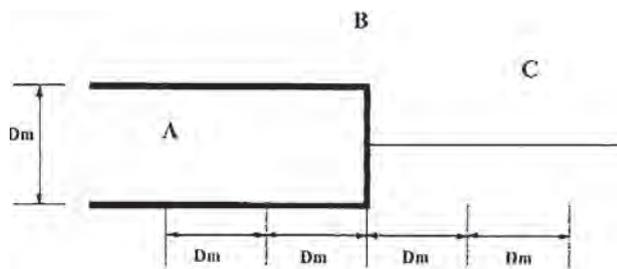


Рис. 1
Схема расположения зон контроля и прогноза состояния горной выработки

Fig. 1
Locations of zones for monitoring and forecasting the condition of the mine workings

Для описания состояния пород вокруг ОС (зона С, рис. 1) используется комплекс параметров, включающий скорости упругих волн по данным метода ультразвукового каротажа (УК), данные о разрушении стенок ОС по данным методов телеметрии и дискования керна, а также данные о разрушении контура выработки (зона А, рис. 1) в забое (зона В, рис. 1), в котором пробурена ОС.

Телеметрия ствола скважин предназначена для видеоконтроля геологоразведочных, инженерно-геологических, контрольных, взрывных и других видов скважин и позволяет количественно на погонный метр скважины оценить трещиноватость, раскрытие трещин, выявить разрушенные зоны и каверны, а также наличие различных геологических неоднородностей (дайки, прожилки, вкрапления и пр.) в сухих и обводненных скважинах (водопритоки и их направление).

Метод дискования керна основан на способности к хрупкому разрушению прочных скальных пород. В результате этого при бурении скважин в высоконапряжённом массиве керн разбивается на диски, торцевые поверхности которых в основном перпендикулярны к оси керна. При этом, чем больше величина действующих напряжений, тем тоньше диски.

Метод УК предназначен для изучения упругих свойств и трещиноватости горных пород. Физические принципы решения указанных задач основаны на применении инвариантных физических величин – скоростей упругих волн, реагирующих как на вариации напряженного состояния, так и на структурные особенности (трещины и др.) массива пород. В варианте профилирования вдоль оси скважины с определенным интервалом измеряются времена прихода первых вступлений упругой волны на датчик-приемник сигнала от генератора импульса и рассчитывается скорость продольной V_p волны. После выделения трещин методом телеметрии и дискования керна выделяются естественные блоки, для каждого из которых по данным кругового многопрофильного каротажа определяют направления максимальных напряжений, перпендикулярных к оси выработки.

Результаты и анализ выполненных исследований

В результате периодических исследований методом телеметрии на поверхности стволов ОС на удалении от забоя сооружаемых выработок РВ-1 и РВ-2 выявлены участки разрушения противоположных стенок в виде «дорожек», как на рис. 2, что в совокупности с образованием дисков в керне (интервал выделен прямоугольни-

ком черного цвета на рис. 3) свидетельствует о действии неравнокомпонентного поля напряжений. В то же время количество дисков характеристической толщины (менее 1 см), которое учитывается при оценке удароопасности, непоказательно, а интервалы дискования (порядка 0,4 м), подобные выделенному прямоугольнику на рис. 3, – незначительны для отнесения данных участков к категории «опасно» по горным ударам³.

Подобное явление также наблюдалось по результатам визуального осмотра призабойной части выработки РВ-2, где на устье ОС наблюдались признаки образования протяженных вдоль оси скважины «дорожек» на противоположных стенках (рис. 4), что, как отмечалось ранее, является следствием концентрации напряжений

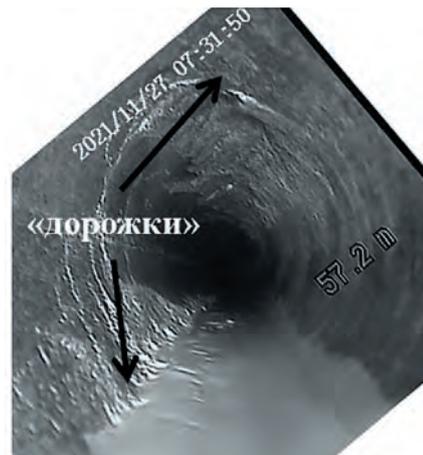


Рис. 2
Стоп-кадр ОС №РВ-2-007, горизонт –1750 м, 27.11.2021 г.

Fig. 2
A freeze frame of the advance borehole No. RV-2-007, -1750 m level, 27.11.2021



Рис. 3
Керн ОС №РВ-2-007, горизонт –1750 м

Fig. 3
A core from the advance borehole No. PB-2-007, -1750 m level

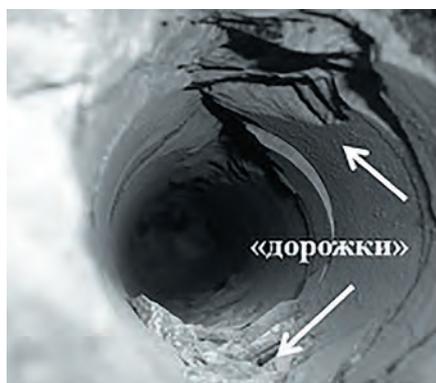


Рис. 4
Фото устья ОС на горизонт(е) –1750 м, 26.11.2020 г.

Fig. 4
Photographic image of the advance borehole mouth at the -1750 m level, 26.11.2020

3 РД 06-329-99. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам. Вып. 1. Серия 06. Нормативные документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности. 2-е изд. М.: НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России; 2003. 88 с.

в призабойной зоне под действием буровзрывных работ (см. рис. 1).

Помимо телеметрии и изучения геологического описания керна в опережающих скважинах РВ-1 и РВ-2 проводились периодические исследования методом УК в вариантах профилирования и кругового многопрофильного каротажа. На рис. 5 показаны результаты ультразвукового профилирования ОС в РВ-1 (рис. 5, а) и в РВ-2 (рис. 5, б) на глубину до 10 м от устья, на рис. 6 – круговые диаграммы по опережающей скважине.

Видно, что околоскважинный массив пород сооружаемых выработок в призабойной, техногенно нарушенной зоне представлен низкоскоростными участками продольной волны V_p в широком диапазоне – от 2 до 5,8 км/с. В свою очередь, удаленный от забоя выработки массив пород характеризуется незначительными изменением уровня V_p вдоль ствола, в среднем составляя 6 км/с. Это свидетельствует о снижении упругих характеристик массива пород в призабойной зоне на глубину до 4 м от забоя для РВ-1 и до 2 м от забоя – для РВ-2 (см. рис. 5).

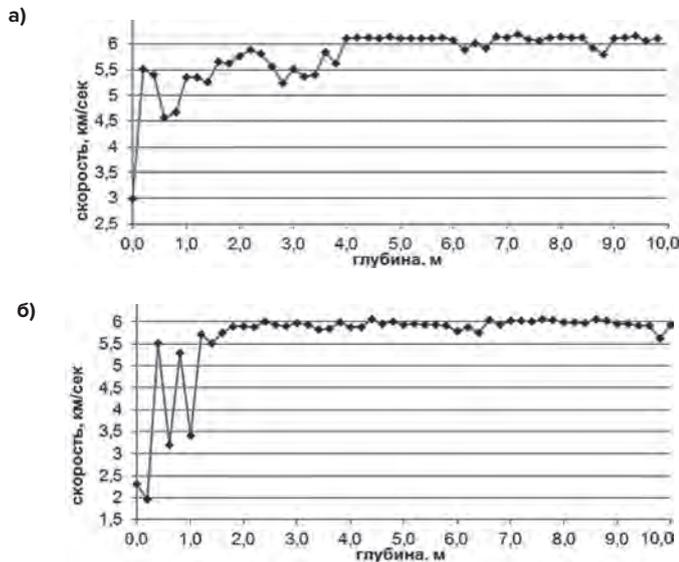


Рис. 5
УЗК каротаж по ОС № РВ-1-012, горизонт –1650 м (а) и по ОС № РВ-2-007, горизонт –1750 м (б)

Fig. 5
Ultrasound logging of advance borehole No. PB-1-012, –1650 m level (а) and advance borehole No. PB-2-007, –1750 m level (б)

Представляется интересным обратить внимание на результаты кругового ультразвукового каротажа, полученные в условиях исходного поля напряжений вне области влияния призабойной зоны (зона С на рис. 1). Таким образом, в ОС на горизонт(е) –1650 м и на горизонт(е) –1750 м установлена анизотропия скоростей продольных волн в зависимости от положения ультразвукового зонда в скважине, что позволяет нам косвенно сделать предположение о направлении вектора главных сжимающих напряжений σ_{max} (см. рис. 6).

Исходя из этого, можно предположить, что в направлении, перпендикулярном вектору сжимающих напряжений, могут концентрироваться значительные касательные напряжения и, как следствие, прорастание трещин по типу «дорожек» (см. рис. 4).

В то же время, как видно на рис. 6, вектор σ_{max} разнона-

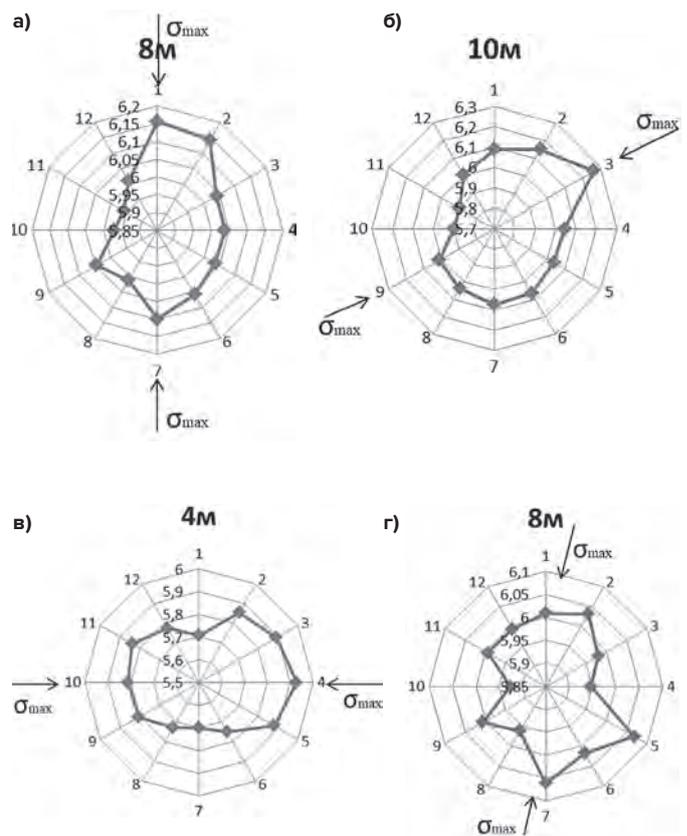


Рис. 6
Круговые ультразвуковые диаграммы в ОС № РВ-1-012, горизонт –1650 м (а, б) и в ОС № РВ-2-007, горизонт –1750 м (в, г)

Fig. 6
Circle ultrasonic diagrams in advance borehole No. PB-1-012, –1650 m level (а, б) and in advance borehole No. PB-2-007, –1750 m level (в, г)

правленно действует в массиве пород исследуемых выработок. По результатам визуального обследования методом телеметрии признаков проявления давления в виде «дорожек» на указанных интервалах ОС не обнаружено.

Подтверждениями инструментальным прогнозным оценкам геомеханического состояния массива пород в стволах опережающих скважин являются результаты периодического визуального обследования незакрепленной части контролируемых выработок в процессе проходки (ориентировочно $1D_m$ от забоя на рис. 1). Единичные случаи динамического проявления горного давления в виде плитчатого отслаивания пород не приводили к куполообразованию сводовой части выработок РВ-1 и РВ-2 или обрушению их стенок, что, вероятно, свидетельствует о непревышении действующими нормальными напряжениями деформационно-прочностных характеристик горных пород и руд, что положительно сказывается на их устойчивости. Локальные случаи проявления горного давления могут быть следствием наличия геолого-структурных неоднородностей, пересекаемых сооружаемой выработкой, а также концентраций напряжений в призабойной зоне влияния буровзрывных работ. Как правило, перераспределение напряжений на контуре выработок происходит в период 1–2 сут после отпала [12].

Сопоставление предположений о направлении действия максимальных напряжений с результатами чис-

ленного моделирования свидетельствует о том, что в качестве прогнозной оценки геомеханического состояния выработок РВ-1 и РВ-2 более обоснована гипотеза о действии в массиве тектонических напряжений, которые сопоставимы или превышают гравитационную составляющую [3; 13].

Заключение

Результаты проведенных натурных исследований в опережающих скважинах сооружаемых подземных выработок РВ-1 и РВ-2 на горизонтах –1650 м и –1750 м соответственно нашли своё подтверждение в результатах визуального обследования пройденной части выработок, а также в данных численного моделирования.

Методом телеметрии установлены участки разрушения противоположных стенок ОС в виде «дорожек», что в совокупности с участками дискования керна указывает на неравнокомпонентность действующего поля напряжений. В то же время разнонаправленность вектора максимальных сжимающих напряжений σ_{\max} по данным кругового ультразвукового каротажа в ОС подтверждается отсутствием проявления горного давления в виде «дорожек» на соответствующих отметках, указывая на непревышение действующими нормальными напря-

жениями деформационно-прочностных характеристик пород и руд. Кроме того, участки дискования, выявленные в образцах керна ОС, по своим параметрам незначительны для определения категории удароопасности, что подтверждается результатами визуального обследования незакрепленных участков сооружаемых подземных выработок. При сопоставлении полученных результатов с данными численного моделирования окрестности сооружаемых выработок более обоснованной представляется гипотеза о действии в массиве пород тектонических напряжений, сопоставимых или превышающих гравитационную составляющую.

Таким образом, результаты периодических натурных исследований в совокупности с данными геологического описания керна и визуального обследования контура выработок указывают на эффективность примененного прогноза геомеханического состояния по опережающим скважинам и возможность своевременно выдавать рекомендации по порядку ведения горных работ с целью обеспечения безопасности и устойчивости сооружаемых горных выработок в сложных горно-геологических условиях.

Список литературы / References

1. Abdellah W.R. Serviceability analysis of deep underground openings driven in jointed-rock. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(6):1019–1024. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.024>
2. Марысюк В.П., Сабянин Г.В., Андреев А.А., Васильев Д.А. Оценка напряженного состояния рудного массива при ведении очистных работ на глубоких рудниках Талнаха. *Горный журнал*. 2020;(6):17–22. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.06.02>
Marysyuk V.P., Sabyanin G.V., Andreev A.A., Vasiliev D.A. Stress assessment in deep-level stoping in Talnakh mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(6):17–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.06.02>
3. Bruning T., Karakus M., Akdag S., Nguyen G.D., Goodchild D. Influence of deviatoric stress on ruckburst occurrence: An experimental study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(5):763–766. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.08.005>
4. Козырев А.А., Константинов К.Н., Лобанов Е.А., Волков Д.С., Муштеkenов Т.С., Цымбалов А.А. Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натурных методов. *Горная промышленность*. 2023;(5):108–113. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>
Kozyrev A.A., Konstantinov K.N., Lobanov E.A., Volkov D.S., Mushtekenov T.S., Tsymbalov A.A. Assessment of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of deep mining workings of the Skalisty mine by in-situ methods. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):108–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>
5. Семенова И.Э., Константинов К.Н., Кулькова М.С. Оценка напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности подземных выработок глубокого заложения комплексом инструментальных и численных методов. *Горный журнал*. 2024;(1):22–28. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.04>
Semenova I.E., Konstantinov K.N., Kulkova M.S. Estimation of stress-strain behavior in surrounding rock mass around deep underground openings using a set of instrumental and numerical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(1):22–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.04>
6. Леонтьев А.В. Анализ естественных напряжений по результатам измерений в рудниках на территории северной Евразии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2001;(1):31–40.
Leont'ev A.V. Analysis of natural stresses according to the measurement results in mines on the territory of Northern Eurasia. *Journal of Mining Science*. 2001;37(1):28–37. <https://doi.org/10.1023/A:1016776600934>
7. Eremenko V.A., Neguritsa D.L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses. *Eurasian Mining*. 2016;(1):21–24. <https://doi.org/10.17580/em.2016.01.02>

8. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Часть I. Современные представления о напряженном состоянии массивов горных пород с ростом глубины. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(2):56–69.
Neverov S.A. Types of orebodies on the basis of the occurrence depth and stress state. Part I: Modern concept of the stress state versus depth. *Journal of Mining Science*. 2012;48(2):249–259. <https://doi.org/10.1134/S1062739148020050>
9. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Часть II. Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(3):25–34.
Neverov S.A. Types of orebodies on the basis of the occurrence depth and stress state. Part II: Orebody tectonotypes and geomedium models. *Journal of Mining Science*. 2012;48(3):421–428. <https://doi.org/10.1134/S1062739148030033>
10. Дарбинян Т.П., Рышкель И.А., Румянцев А.Е., Бреус К.Э. Геотехническое картирование выработок в рамках построения геомеханической модели рудника «Октябрьский». *Горный журнал*. 2019;(11):10–13. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1869/article/31778/> (дата обращения: 23.02.2024).
Darbinyan T.P., Ryshkel I.A., Rumyantsev A.E., Breus K.E. Geotechnical mapping of underground excavations in the framework of geomechanical model construction for the Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(11):10–13. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1869/article/31778/> (accessed: 23.02.2024).
11. Наговицин Ю.Н., Новиков В.В., Куранов А.Д., Ильинов М.Д. Сопоставление результатов неразрушающего контроля и лабораторных определений свойств руд и пород Октябрьского месторождения. *Горный журнал*. 2020;(6):42–45. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1933/article/32704/> (дата обращения: 23.02.2024).
Nagovitsin Yu.N., Novikov V.V., Kuranov A.D., Iliin M.D. Comparison of nondestructive testing results and laboratory definitions of ore and rock properties of the Oktyabrskoye deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(6):42–45. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1933/article/32704/> (accessed: 23.02.2024).
12. Курленя М.В. (ред.) *Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах*. Апатиты; 1996. Ч. 1. 159 с.
13. Lei Q., Goo K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;113:121–133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.001>

Информация об авторах

Константинов Константин Николаевич – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Старцев Юрий Алексеевич – ведущий технолог, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

Лобанов Евгений Александрович – управляющий директор ООО «Канекс Шахтострой», г. Москва, Российская Федерация

Муштекенов Талгат Сакенович – советник аппарата директора, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», г. Норильск, Российская Федерация

Цымбалов Андрей Анатольевич – заместитель директора по горному производству, ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», Российская Федерация

Information about the authors

Konstantin N. Konstantinov – Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Yuri A. Starcev – Leading Technologist, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Evgeniy A. Lobanov – Managing Director, Kanex Shakhtostroy LLC, Moscow, Russian Federation

Talgat S. Mushtekenov – Counselor to the Director's Office, Polar Branch of MMC Norilsk Nickel, Norilsk, Russian Federation

Andrey A. Tsybalov – Deputy Director for Mining Operations, Polar Branch of MMC Norilsk Nickel, Norilsk, Russian Federation

Article info

Received: 25.07.2024

Revised: 27.08.2024

Accepted: 16.09.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.07.2024

Поступила после рецензирования: 27.08.2024

Принята к публикации: 16.09.2024