

Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натуральных методов

А.А. Козырев¹, К.Н. Константинов¹✉, Е.А. Лобанов², Д.С. Волков², Т.С. Муштеkenov³, А.А. Цымбалов³

¹ Кольский научный центр Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

² ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

✉ k.konstantinov@ksc.ru

Резюме: В последние годы, как и в практике других горнодобывающих предприятий, приоритетным направлением развития ЗФ ГМК «Норильский Никель» являются глубокие горизонты эксплуатируемых месторождений. В первой половине 2023 г. силами ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ» завершена проходка разведочных выработок РВ-1 на горизонте –1650 м и РВ-2 на горизонте –1750 м от ВС-10 до СКС-1 (глубина от поверхности порядка 2 км). На участках РВ-1 и РВ-2, пройденных в 2020–2022 гг. (протяженностью порядка 1500 м), выполнены комплексные исследования техногенной нарушенности на 17 замерных станциях. В качестве основных натуральных методов для решения поставленной задачи привлечены методы реометрии, ультразвукового каротажа и сейсмического профилирования.

Установлено, что размер нарушенной зоны в окрестности выработок РВ-1 и РВ-2 характеризуется скоростями продольных волн V_p в пределах 2–4 км/с, в среднем по всей протяженности составляя 1 м от контура выработки. Результаты исследований сейсмическим методом указывают на умеренную нарушенность массива пород в горизонтальной плоскости борта выработки. Результаты натуральных исследований комплексным методом качественно сопоставимы с результатами визуального обследования закрепленной поверхности выработки, указывая тем самым на её удовлетворительное геомеханическое состояние.

Ключевые слова: геомеханика, нарушенная зона, устойчивость выработок, ультразвуковой метод, реометрический метод, сейсмический метод, напряженно-деформированное состояние, крепление

Для цитирования: Козырев А.А., Константинов К.Н., Лобанов Е.А., Волков Д.С., Муштеkenov Т.С., Цымбалов А.А. Оценка геомеханического состояния массива пород в окрестности глубоких выработок рудника «Скалистый» комплексом натуральных методов. *Горная промышленность*. 2023;(5):108–113. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-108-113>

Assessment of the geomechanical state of the rock mass in the vicinity of deep mining workings of the Skalisty mine by in-situ methods

A.A. Kozyrev¹, K.N. Konstantinov¹✉, E.A. Lobanov², D.S. Volkov², T.S. Mushtekenov³, A.A. Tsymbalov³

¹ Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

² KANEX SHAHTOSTROY, Saint Petersburg, Russian Federation

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

✉ k.konstantinov@ksc.ru

Abstract: In recent years, deep levels of exploited deposits have been a priority for the Polar Branch of MMC Norilsk Nickel. In the first half of 2023, KANEX SHAHTOSTROY LLC has completed exploration workings EW-1 at the –1650 m level and EW-2 at the –1750 m level from the ventilation shaft VS-10 to the skip-cage shaft SCS-1 (2 km below the daytime surface). Comprehensive studies of mining-induced disturbance were carried out at 17 measuring stations in EW-1 and EW-2 sections driven in 2020–2022 (the length of about 1500 m). The rheometric, ultrasonic logging and seismic profiling methods were used as the principal in-situ methods to solve the task.

It has been established that the size of the disturbed zone in the vicinity of EW-1 and EW-2 is characterized by longitudinal wave velocities, V_p , in the range of 2–4 km/s, averaging over the entire length of 1m from the contour of the working. The results of the seismic studies indicate moderate disturbance of the rock mass in the horizontal plane of the working's wall. The results of in-situ complex studies are qualitatively comparable with the results of visual inspection of the fixed surface of the working, thus indicating its satisfactory geomechanical condition.

Keywords: geomechanics, disturbed zone, stability of excavations, ultrasonic method, rheometric method, seismic method, stress-strain state, mine support

For citation: 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>

Введение

В последние годы приоритетным направлением развития ЗФ ГМК «Норильский никель», как и в практике других горнодобывающих предприятий России и мира [1; 2], являются глубокие горизонты эксплуатируемых месторождений. Для вскрытия глубоких залежей Октябрьского месторождения на самом молодом руднике компании «Скалистый» практически введены в эксплуатацию два самых глубоких ствола – вентиляционный (ВС-10) и скипово-клетевой (СКС-1) – протяженностью от дневной поверхности ориентировочно 2 км каждый. В первой половине 2023 г. силами ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ» завершена проходка разведочных выработок РВ-1 на горизонте – 1650 м и РВ-2 на горизонте – 1750 м от ВС-10 до СКС-1 (глубина от поверхности порядка 2 км).

С целью обеспечения периодического геомеханического контроля ведения горных работ при проходке был привлечен Горный институт КНЦ РАН, имеющий многолетний практический опыт в выполнении исследований на рудниках, отработывающих удароопасные месторождения подземным способом [3–4].

Массив горных пород в окрестности выработок сложен преимущественно переслаивающимися мергелями и ангидритами, долеритами и аргиллитами, прочностные характеристики которых (предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, модуль упругости (Юнга) E , коэффициент Пуассона (ν)) меняются в достаточно широких пределах¹. Это обусловлено значительным негативным влиянием обводненности на прочностные свойства пород, занижая их на 20–25%, а в некоторых случаях при наличии интенсивной естественной трещиноватости, как в случае с аргиллитами, снижение предела прочности при одноосном сжатии может быть трехкратным.

Основными факторами, влияющими на устойчивость выработок, являются напряженно-деформированное состояние массива пород² [5–7], гидрогеологический и теплофизический режимы³ [8]. При этом исключены внешние горнотехнические факторы в виде очистного пространства и смежных выработок, которые могли бы влиять на геомеханическое состояние массива пород в окрестности контролируемых выработок РВ-1 и РВ-2 вследствие изменения естественного поля напряжений, что, в свою очередь, характеризует данные выработки как одиночные. Учитывая сложные горно-геологические условия на указанных глубинах, крепление подземных выработок выполняется практически параллельно с проходкой, непосредственно после отпала забоя. Тем самым, с одной стороны, исклю-

чается возможность визуального обследования контура выработки, сформировавшегося в результате проходки (за исключением призабойной части [9]), а с другой – помимо величины нарушенной зоны в окрестности горной выработки появляется возможность оценить качество применяемых укрепительных мероприятий.

Таким образом, на участках РВ-1 и РВ-2, пройденных в 2020–2022 гг. (протяженностью порядка 1500 м), выполнены комплексные исследования техногенной нарушенности на 17 замерных станциях.

Методы

В качестве основных натуральных методов для решения поставленной задачи привлечены методы реометрии, ультразвукового каротажа (УК) и сейсмического профилирования. Исследования реометрическим и УК методами выполняются на наблюдательных станциях, которые представляют собой веер шпуров, обуренных перпендикулярно оси выработки, диаметром не менее 42 мм и глубиной 3–4 м (рис. 1).

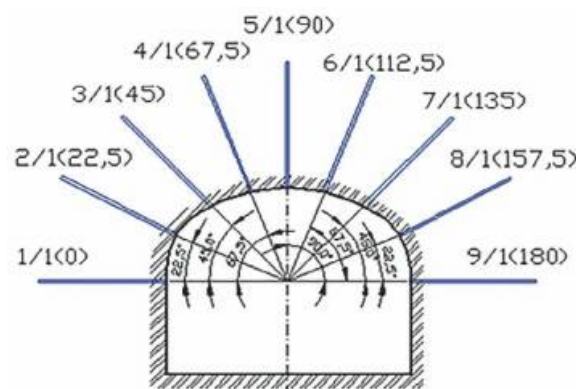


Рис. 1
Типовая схема наблюдательной станции:
3/1(90) – обозначение шпуров:
3 – номер шпуров,
° – угол наклона шпуров

Fig. 1
Typical layout of the observation station:
3/1(90) - borehole designation:
3 – number of boreholes,
° – angle of borehole inclination

Реометрический (фильтрационный) метод основан на измерении утечек жидкости или воздуха через трещины. Сущность способа заключается в испытании участков шпура под давлением на проницаемость. По интенсивности падения давления сжатого воздуха на каждом участке шпура судят о наличии трещин и об изменении степени трещиноватости с удалением от контура выработки.

Глубину зоны нарушенных пород определяют по расстоянию от устья шпура до того участка в массиве, где утечки прекращаются вообще или соизмеримы с утечками в ненарушенном массиве. Измеряя величину проницаемости в пределах зоны нарушенных пород на различных расстояниях от контура через определенные интервалы вдоль

¹ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020 г., рег. №61651 от 21.12.2020 г. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499066482>

² Заключение по результатам бурения контрольно-стволовой (геологической) скважины КС-57 шахтного ствола ВС-10 рудника «Комсомольский» шахты «Скалистая», ОАО «ГМК «Норильский никель» ООО «Норильскгеология», 2012.

³ Геомеханическое обоснование вскрытия и отработки шахты «Глубокая» проекта РС-СУ»: Отчет о научно-исследовательской работе по договору № ИГД-16-02 от 22.07.2016 г.

выработки, получают относительную количественную оценку степени нарушенности пород на соответствующих участках. Комплект установки для реометрических измерений состоит из аккумулирующей емкости 1 с манометром 8, герметизирующего устройства и соединительных шлангов 4, 7 (рис. 2).

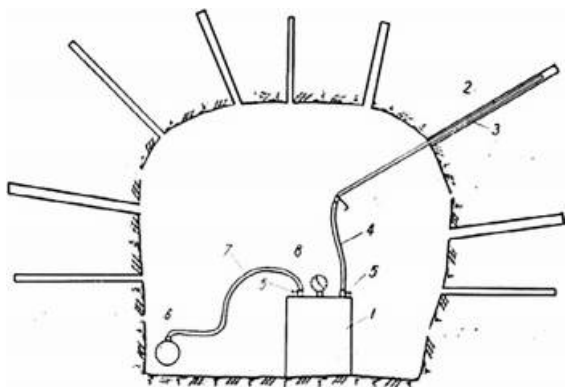


Рис. 2
Эскизная схема проведения измерений реометрическим методом на замерной станции

Fig. 2
Schematic diagram of measurements using the rheometric method at the measuring station

Физические принципы ультразвукового метода изучения упругих свойств и трещиноватости горных пород 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.

Для оценки сохранности массива применяется методика сейсмического профилирования на продольных преломлённых волнах [10]. Изучается горизонтальная плоскость от контура выработки вглубь массива. При этой методике возбуждение и приём сигналов проводятся вдоль одного профиля. На рис. 3 представлена схема выполнения сейсмических исследований в РВ-1 на гор. -1650 м. Расстояние между приёмниками и источниками сигналов выбрано 8 м. Длина профиля наблюдения составляет около 230 м. Глубина достоверного исследования массива принята с большим запасом по надёжности – 30 м контура выработки.

Наличие массива скоростей V_p и V_s позволяет выполнять любые трансформации, связанные математическими зависимостями со скоростями продольных и поперечных волн, в том числе рассчитать динамический модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν .

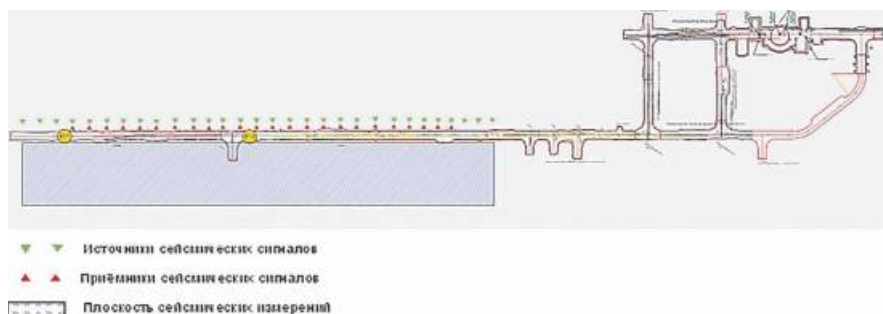


Рис. 3
План натуральных измерений на гор. -1650 м

Fig. 3
Map of field measurements at the -1650 m Level

Результаты

На участках РВ-1 и РВ-2, пройденных в 2020–2022 гг. (протяженностью порядка 1500 м), выполнены комплексные исследования техногенной нарушенности на 17 наблюдательных станциях. В качестве примера на рис. 4 приведены скоростные модели приконтурного массива пород на наблюдательных станциях, заложенных в северном вентиляционном квершлага на гор. -1650 м. Изначально исследования выполнялись в околоствольных выработках ВС-10 в период начала проходки РВ-1 и РВ-2.

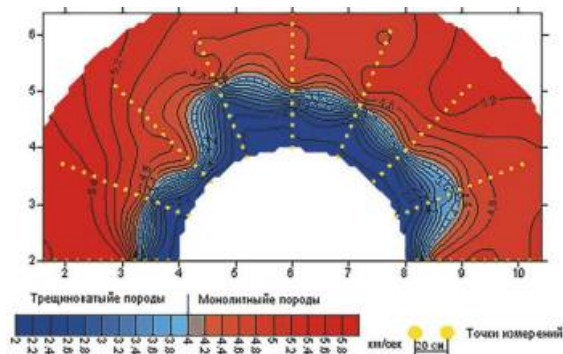


Рис. 4
Скоростная модель приконтурного массива пород в окрестности наблюдательной станции № 1 на гор. -1650 м

Fig. 4
Velocity model of the near-contour rock mass in the vicinity of observation station No. 1 at the -1650 m Level

Установлено, что в зоне влияния буровзрывных работ нарушенная зона в окрестности выработанного пространства описывается скоростями упругих волн V_p в интервале 2,0–4,0 км/с. Относительно ненарушенный массив пород характеризуется величинами V_p , в среднем 5 км/с, что сопоставимо с данными о величинах V_p для типов пород, слагающих законтурный массив контролируемых выработок. По данным исследований на пяти станциях породы вблизи контура нарушены на глубину до 1,4 м от устья скважин.

На рис. 5 представлены результаты измерений реометрическим методом в виде графиков зависимости проницаемости среды от расстояния от контура выработки, полученные для каждой из 9 скважин вышеупомянутой измерительной станции №1 в РВ-1, гор. -1650 м.

Исследования реометрическим методом указывают на нарушенность массива пород до 0,8 м от контура выработки. Далее подобные исследования периодически выполнялись по мере формирования выработанного пространства выработок РВ-1 и РВ-2 в период 2020–2022 гг. на станциях, заложенных в ближней к забою зоне. При этом показатели нарушенности несколько скорректировались в сторону уменьшения своих значений и по данным методов УК и реометрии составляют в среднем 1 м от контура выработки. Это объясняется тем, что величины нарушенной зоны, приведенные выше, получены в выработках околоствольного двора, где имеют место быть сопряжения со смежными выработками, при строи-

ваниях по мере формирования выработанного пространства выработок РВ-1 и РВ-2 в период 2020–2022 гг. на станциях, заложенных в ближней к забою зоне. При этом показатели нарушенности несколько скорректировались в сторону уменьшения своих значений и по данным методов УК и реометрии составляют в среднем 1 м от контура выработки. Это объясняется тем, что величины нарушенной зоны, приведенные выше, получены в выработках околоствольного двора, где имеют место быть сопряжения со смежными выработками, при строи-

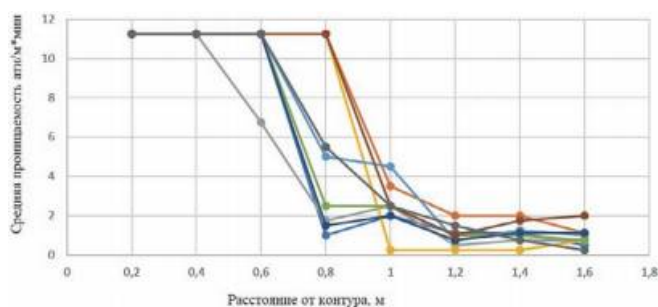


Рис. 5
Графики проницаемости пород
в окрестности наблюдательной
станции №1 на гор. –1650 м

Fig. 5
Graphs of rock permeability in
the vicinity of observation sta-
tion No. 1 at the -1650 m Level

тельстве которых на контурах концентрировались напряжения с дальнейшим развитием трещиноватости и несколько завышенными показателями нарушенной зоны. В результате комплексного анализа проведенных исследований на наблюдательных станциях установлено, что мощность нарушенных пород по результатам ультразвуковых исследований больше, чем по реометрическим данным. Это связано с тем, что ультразвуковой метод позволяет выявлять закрытые трещины, а реометрический метод – открытые трещины, выходящие на контур выработки. Таким образом, достоверность данных ультразвукового каротажа подтверждается данными реометрического метода.

Помимо скважинных методов на горизонтах –1650 м и –1750 м с целью получения упругих характеристик выполнены исследования методом сейсмического профилирования, схема измерения которого представлена на плане горных работ гор. –1650 м выработки РВ-1 (см. рис. 3). Плоскость зоны сейсмического исследования располагается в стенке выработки на высоте ориентировочно 1,5 м от подошвы. Установлено, что законтурный массив пород на расстоянии ориентировочно до 10 м от поверхности выработки на обоих горизонтах характеризуется распределением скоростей V_p в интервале 2–5 км/с, а глубже (10–30 м от контура выработки), вне зоны влияния горных работ, в естественном ненарушенном состоянии преобладают величины V_p в интервале 5–6 км/с и выше (рис. 7). При сравнении данных сейсмического метода с результатами исследований на наблюдательных станциях необходимо принимать во внимание разные базы измере-

ния и применяемые методики. В случае с ультразвуковым методом база измерения составляет 0,2 м. В случае с сейсмическим профилированием, исходя из разрешающей способности метода, в данном случае расстояние между реперами составляет 8 м. Тем не менее данные параметры скоростного поля V_p качественно коррелируют с распределением упругой волны в окрестности выработок по данным методов УК и реометрии и в целом подтверждают предположения о параметрах нарушенности в окрестности выработок.

Помимо комплекса геофизических методов оценки геомеханического состояния важным представляется исследовать эффективность применяемых укрепительных мероприятий приконтурного массива пород в выработках РВ-1 и РВ-2. Учитывая сложные горно-геологические условия проходки, а именно – повышенную естественную трещиноватость пород, сложный тепловой режим (порядка 35 °С на контуре) и влияние обводненности на прочностные характеристики основных литотипов пород, применяются комбинированная анкерная и набрызгбетонная типы крепи [11]. Визуальный осмотр закрепленной части выработки не выявил отклонений в установке элементов крепи. Поверхность постоянной крепи выглядит однородной, без трещин, сцепление набрызгбетона с породами на контуре выработок хорошее. Оценка совместной работы набрызгбетонной и анкерной крепи производится с учётом шага анкерования 0,8x0,8 м и длины анкера 2,4 м. Значение толщины набрызгбетона принималось на основании средней величины, равной 7 см. То есть, сравнивая параметры нарушенной зоны, установленные в результате исследований на 17 наблюдательных станциях (ориентировочно 1 м от контура выработки), заложенных на контуре выработок протяженностью ориентировочно 1500 м, и упругие характеристики массива пород, полученные в результате исследований методом сейсмического профилирования параметрами применяемой комбинированной анкерной и набрызгбетонной крепи, можно констатировать достаточно высокую эффективность применяемой схемы укрепительных мероприятий и удовлетворительное геомеханическое состояние пройденной части выработок РВ-1 и РВ-2. Данное обстоятельство подтверждается результатами периодического визуального осмотра специалистами Горного института КИЦ РАН совместно со специалистами ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ». Однако предварительные определения несущей способности, теплового режима и прочностных характеристик крепи, а также анализ полученных данных указывают на возможное отрицательное воздействие теплового фактора и влажности на прочностные свойства комбинированной

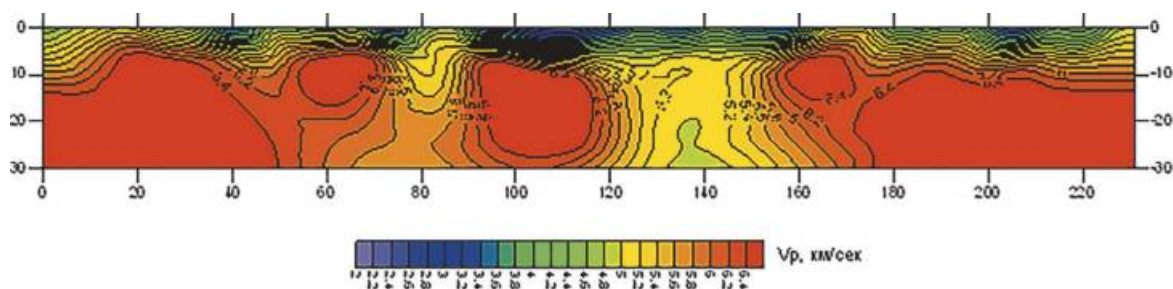


Рис. 6. Скоростная модель V_p участка
массива в РВ-1 на гор. –1650 м

Fig. 6. Velocity model V_p of the rock mass
section in EW-1 at the -1650 m Level

крепя. Поэтому рекомендуется выполнять периодический визуальный и инструментальный контроль с целью оценки устойчивости крепления горных выработок и динамики изменения упругих характеристик в окрестности горных выработок.

Заключение

В результате комплексной оценки геомеханического состояния приконтурного массива пород в окрестности выработок РВ-1 и РВ-2 установлено:

1. По данным периодических исследований на наблюдательных станциях нарушенная зона в окрестности выработок РВ-1 и РВ-2 характеризуется скоростями продольных волн V_p в пределах 2–4 км/с, в среднем по всей протяженности составляя 1 м от контура выработки;
2. Результаты исследований ультразвуковым методом качественно коррелируют с данными, полученными реометрическим методом, свидетельствуя в целом о своей достоверности;

3. Результаты исследований сейсмическим методом не противоречат данным комплексных исследований на наблюдательных станциях, указывая на умеренную нарушенность массива пород в горизонтальной плоскости борта выработки на высоте порядка 1,5 м от подошвы;
4. Данные периодического визуального контроля закрепленной части выработок на гор. –1650 и –1750 м указывают на высокую эффективность применяемой схемы укрепительных мероприятий, удовлетворительное геомеханическое состояние массива пород в окрестности выработок, что подтверждается комплексными натурными исследованиями. С целью контроля устойчивости выработок рекомендуется выполнять периодический визуальный и инструментальный контроль несущей способности крепи и оценку динамики изменения упругих характеристик массива пород в окрестности выработок РВ-1 и РВ-2.

Список литературы

1. Лукичев С.В., Онуприенко В.С., Семенова И.Э., Белгородцев О.В. Увеличение производственной мощности подземного рудника при освоении запасов глубоких горизонтов. *Горный журнал*. 2019;(10):85–88. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.12>
2. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
3. Козырев А.А., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Панин В.И., Федотова Ю.В., Константинов К.Н., Сальников И.В., Гадючко А.В., Белоусов В.В., Корчак П.А., Стрешнев А.А. *Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения)*. Апатиты: ООО «Апатит-Медиа»; 2016. 112 с.
4. Козырев А.А., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Земцовский А.В., Федотова Ю.В., Константинов К.Н., Лобанов Е.А., Сулов И.В., Волков Д.С., Пантелеев А.В. *Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей)*. Апатиты: ООО «КаЭМ»; 2015. 102 с.
5. Barton N. Barton-Bandis Criterion. In: Bobrowsky P., Marker B. (eds) *Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham; 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_25-1
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.
7. Каспарьян Э.В., Кузнецов Н.Н., Шоков А.Н., Пак А.К. Исследование условий динамических разрушений в массивах скальных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(4):69–84. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
8. Shen B., Barton N. Rock fracturing mechanisms around underground openings. *Geomechanics and Engineering*. 2018;16(1):35–47. <https://doi.org/10.12989/GAE.2018.16.1.035>
9. Пантелеев А.В., Каспарьян Э.В., Семенова И.Э. *Методика визуальных наблюдений в подземных горных выработках на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам [под ред. А.А. Козырева]*. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра; 2020. 68 с.
10. Startcev Y.A., Semenova I.E. Seismic tomography for monitoring stress state of pillars in underground mines. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2020(Sept.);1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051025>
11. Гусак С.А., Орлов А.О., Смирнов Ю.Г., Бирюков В.В., Паливода А.А. Оценка эффективности пассивной системы тепловой защиты породного массива. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2020;23(1):72–79. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-72-79>

References

1. Lukichev S.V., Onuprienko V.S., Semenova I.E., Belogorodtsev O.V. Increasing production capacity of an underground mine at deep levels. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(10):85–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.10.12>
2. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>

3. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Rybin V.V., Panin V.I., Fedotova Yu.V., Konstantinov K.N., Salnikov I.V., Gadyuchko A.V., Belousov V.V., Korchak P.A., Streshnev A.A. *Guidelines for safe mining operations at the deposits prone to and hazardous in terms of rock-bursts (Khibini apatite-nepheline deposits)*. Apatity: Apatit-Media; 2016. 112 p. (In Russ.)
4. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Rybin V.V., Zemtsovsky A.V., Fedotova Yu.V., Konstantinov K.N., Lobanov E.A., Suslov I.V., Volkov D.S., Panteleev A.V. *Guidelines for safe mining operations at the deposits prone to and hazardous in terms of rock-bursts (Oleniy Ruchey deposit)*. Apatity: KaeM; 2015. 102 p. (In Russ.)
5. Barton N. Barton-Bandis Criterion. In: Bobrowsky P., Marker B. (eds) *Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham; 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_25-1
6. 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. Kasparyan E.E., Kuznetsov N.N., Shokov A.N., Pak A.K. Dynamic failure conditions in strong rock masses. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(4):69–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-4-0-69-84>
8. Shen B., Barton N. Rock fracturing mechanisms around underground openings. *Geomechanics and Engineering*. 2018;16(1):35–47. <https://doi.org/10.12989/GAE.2018.16.1.035>
9. Panteleev A.V., Kaspar'yan E.V., Semenova I.E. *Methodology of visual observations in underground mine workings at the deposits prone to and hazardous in terms of rock-bursts* [A.A. Kozyrev (ed.)]. Apatity: Kola Science Centre; 2020. 68 p. (In Russ.)
10. Startcev Y.A., Semenova I.E. Seismic tomography for monitoring stress state of pillars in underground mines. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2020(Sept.);1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051025>
11. Gusak S.A., Orlov A.O., Smirnov Y.G., Biryukov V.V., Palivoda A.A. Assessment of the efficiency of passive thermal protection system of rock massif. *Vestnik of MSTU*. 2020;23(1):72–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-72-79>

Информация об авторах

Козырев Анатолий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

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

Лобанов Евгений Александрович – кандидат технических наук, генеральный директор, ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Волков Денис Сергеевич – исполнительный директор, ООО «КАНЕКС ШАХТОСТРОЙ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Цымбалов Андрей Анатольевич – заместитель Директора ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» по горному производству, г. Норильск, Российская Федерация

Information about the authors

Anatoly A. Kozyrev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of Rock Mechanics Department, Mining Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kozyrev@ksc.ru

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

Evgeniy A. Lobanov – Cand. Sci. (Eng.), Director General, KANEX SHAHTOSTROY, Saint Petersburg, Russian Federation

Denis S. Volkov – Executive Director, KANEX SHAHTOSTROY, Saint Petersburg, Russian Federation

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

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

Article info

Received: 03.08.2023

Revised: 06.09.2023

Accepted: 15.09.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.08.2023

Поступила после рецензирования: 06.09.2023

Принята к публикации: 15.09.2023