

Комплексное геомеханическое обоснование крепления сверхглубоких подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима

К.Н. Константинов✉, М.С. Кулькова

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ k.konstantinov@ksc.ru

Резюме: Статья посвящена комплексному геомеханическому обоснованию параметров крепления сверхглубоких разведочных выработок РВ-1 и РВ-2 на горизонтах –1650 м и –1750 м шахты «Глубокая» Октябрьского месторождения. В сложных горно-геологических условиях для оценки устойчивости применялся комплекс натуральных (ультразвуковой каротаж, реометрия, сейсмическое профилирование) и численных методов исследования напряженно-деформированного состояния массива пород. Установлено, что глубина нарушенной зоны составляет 1–1,5 м, а наиболее вероятным является равнокомпонентный тип поля напряжений. На основе выполненных исследований обоснованы параметры усиленной комбинированной крепи. Отдельное внимание уделено анализу влияния повышенной температуры (до 50 °С) и низкой влажности окружающей среды на процесс твердения набрызгбетонного крепления, что подтверждено натурными и лабораторными исследованиями. Показано, что применяемый усиленный тип крепления обеспечивает устойчивое состояние выработок и его параметры соответствуют геомеханическим условиям.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, сверхглубокие подземные горные выработки, нарушенная зона, сейсмическое профилирование, ультразвуковой каротаж, реометрия, численное моделирование, крепление горных выработок, тепловой режим, твердение набрызгбетона

Благодарности: Авторы статьи выражают благодарность ведущему инженеру Горного института Кольского научного центра РАН А.О. Орлову за консультации в процессе подготовки данной публикации.

Для цитирования: Константинов К.Н., Кулькова М.С. Комплексное геомеханическое обоснование крепления сверхглубоких подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима. *Горная промышленность*. 2026;(1):151–156. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-151-156>

Comprehensive geomechanical justification of ultra-deep underground mines support with account of specific features of the thermal regime

K.N. Konstantinov✉, M.S. Kulkova

Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ k.konstantinov@ksc.ru

Abstract: The article offers a comprehensive geomechanical justification of the support parameters for the EX-1 and EX-2 ultra-deep exploration mine workings at the levels of –1650 m and –1750 m at the Glubokaya mine of the Oktyabrskoye deposit. A set of in-situ (ultrasonic logging, rheometry, seismic profiling) and numerical methods of modeling the stress-strain state of the rock mass was used to assess stability in complex mining and geological conditions. It was established that the depth of the excavation damaged zone is 1–1,5 m, and the most probable type of the stress field is hydrostatic. Parameters of the reinforced combined support were justified based on the research. Particular attention is paid to analyzing the impact of high temperature (up to 50°C) and low humidity on the shotcrete curing process, which is confirmed by in-situ and laboratory studies. It is shown that the applied support ensures a stable condition of the mine workings, and its parameters match the geomechanical conditions.

Keywords: stress-strain state, ultra-deep mine workings, damaged zone, seismic profiling, ultrasonic logging, rheometry, numerical modeling, rock support, thermal regime, shotcrete curing

Acknowledgments: Authors would like to express their gratitude to A.O. Orlov, Lead Engineer at the Mining Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, for his advice during the preparation of this paper.

For citation: Konstantinov K.N., Kulkova M.S. Comprehensive geomechanical justification of ultra-deep underground mines support with account of specific features of the thermal regime. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):151–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-151-156>

Введение

В общемировой практике ведения горных работ в последние десятилетия закрепились тенденции в необходимости отработки эксплуатируемых рудных месторождений на глубоких горизонтах. Так, глубина горных работ достигает 3500–4000 м на золотых рудниках Южной Африки и Индии, в Австралии – 1500–1600 м, в Канаде – 2000–2200 м, в США 2400–2600 м [1]. Приоритетным направлением развития ГКМ «Норильский никель» является освоение глубоких горизонтов медно-никелевых месторождений Талнахского рудного узла. Основной рудоконтролирующей тектонической структурой района является Норильско-Хараелакский разлом, включающий в себя два крупнейших в мире медно-никелевых месторождения: Октябрьское, расположенное к западу от разлома, и Талнахское, включающее богатые залежи руд в зоне разлома и его восточного крыла (рис. 1) [2]. Отработка месторождений сульфидных руд Талнахского рудного узла начиналась с глубин 600–700 м и достигла к настоящему времени более 1600 м от дневной поверхности. Для вскрытия и отработки глубоких залежей Октябрьского месторождения в пределах шахты «Глубокая» с 2020 по 2023 г. на глубинах порядка 2 км от дневной поверхности осуществлялась проходка разведочных выработок РВ-1 (гор. –1650 м) и РВ-2 (гор. –1750 м).

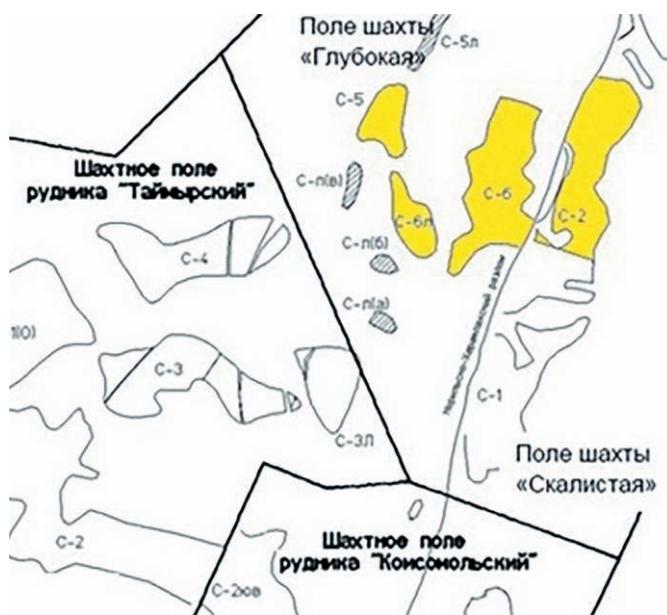


Рис. 1
Схема расположения богатых и медистых руд залежей шахты «Глубокая» и границы смежных шахт и рудников

Fig. 1
A location map of the high-grade and copper-bearing ore bodies of the Glubokaya mine and the boundaries of the adjacent mines and ore deposits

В окрестности исследуемых выработок массив горных пород (МГП) преимущественно представлен чередованием мергелей, ангидритов, долеритов и аргиллитов, прочностные характеристики которых изменяются в широких пределах. Важной особенностью является развитая естественная трещиноватость массива, параметры которой определены при оценке качественных характеристик, в результате которой установлено, что МГП в районе РВ-1 и РВ-2 относится к слабо- и среднеустойчивым [3]. Важным фактором, снижающим прочностные характеристики

исследуемой области массива, является обводненность, которая в совокупности с техногенной трещиноватостью от воздействия буровзрывных работ оказывает негативное влияние на геомеханическое состояние МГП. Проходка выработок выполнялась вне зоны очистного пространства и на расстоянии друг от друга, достаточном для исключения взаимного влияния вследствие перераспределения действующих в массиве пород напряжений.

В сложных горно-геологических условиях, обусловленных особенностями геомеханических характеристик, гидрогеологического [4] и теплового режимов, буровзрывными работами и другими неблагоприятными факторами, исключительно важным в вопросах обеспечения устойчивости подземных горных выработок на значительных глубинах представляется опираться на знания о параметрах напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород. С целью обоснования выбора эффективных параметров крепления в процессе проходки сверхглубоких разведочных выработок выполнялись исследования комплексом натуральных и численных методов.

Натурные и численные методы исследования геомеханических условий

Для оценки геомеханических условий МГП и определения характеристик поля действующих в нем напряжений был выполнен комплекс натуральных и численных исследований. Для определения параметров нарушенной зоны в окрестности выработок применялся комплекс локальных методов: ультразвуковой каротаж (УК), реометрический метод (РМ) и метод сейсмического профилирования (СП). Исследования методами УК и РМ были выполнены на семнадцати наблюдательных станциях (н/с), представляющих собой веер шпуров, которые обуривались в поперечном сечении выработок по мере их проходки¹. Исследования методом СП выполнялись в стенках выработок с использованием схемы единого профиля расположения источников и приемников сигнала. При этом суммарная протяженность обследованных участков составила около 230 м.

Уточнение параметров поля напряжений, действующего в пределах исследуемых объектов, выполнялось с использованием численного геомеханического моделирования НДС в САЕ Fidesys на основе натуральных данных. Метод конечных элементов в объемной постановке широко применяется для оценки устойчивости выработок в их окрестности [5; 6]. Разработанная модель НДС учитывала основные свойства массива и включала многовариантный расчет с различными условиями нагружения.

Результаты исследования НДС массива

В результате инструментальных измерений определено, что глубина нарушенной зоны в среднем составляет 1 м от контура выработки. При этом исследования методом СП указывают на умеренную нарушенность приконтурного массива пород в стенках, качественно согласуясь с показателями нарушенности, полученными при измерениях в шпурах на контуре выработок на н/с методами УК и РМ [7].

В процессе проходки и эксплуатации выработок РВ-1 и РВ-2 регулярно проводилось визуальное обследование состояния их незакрепленного контура. Наблюдения за формой и характером развивающихся разрушений пока-

¹ Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (месторождение Олений ручей). Апатиты; 2015. 98 с.; Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). Апатиты; 2016. 112 с.



Рис. 2
Фактическое состояние
выработки РВ-2 (гор. –1750 м)

Fig. 2
The actual state of the RV-2
working (–1750 m level)

зали отсутствие значительных деформаций в стенках выработок, характерных для гравитационного типа поля напряжений, а также выраженных куполообразных вывалов в кровле, которые обычно возникают при тектоническом сжатии. Относительно равномерное и умеренное разрушение пород по всему периметру выработки явилось важным признаком, позволившим сделать предварительное предположение о действии в массиве типа поля напряжений, близкого к равнокомпонентному (гидростатическому), (рис. 2). Данное визуальное заключение в дальнейшем нашло свое подтверждение в результатах комплексного численного моделирования.

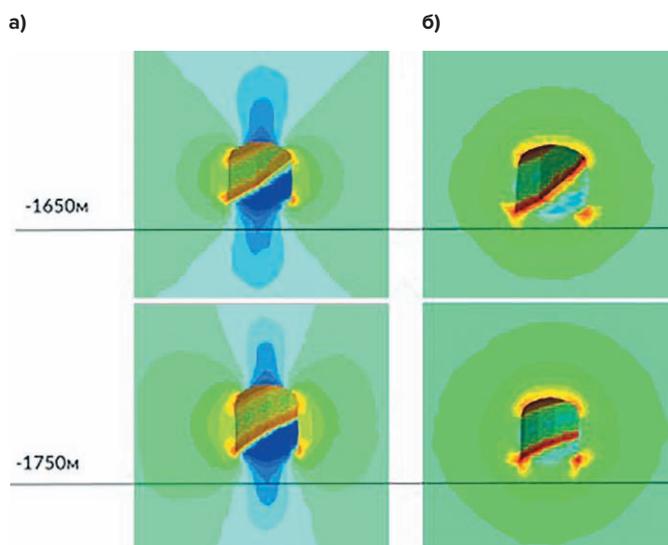


Рис. 3
Результаты численного моделирования НДС. Распределение максимальных (сжимающих) напряжений в массиве в окрестности выработок РВ 1 (гор. 1650 м) и РВ-2 (гор. –1750 м) при разных схемах нагружения, соответствующих: а – гравитационному; б – гидростатическому типам поля напряжений

Fig. 3
Results of the stress-strain state numerical modeling. Distribution of the maximum (compressive) stresses in the rock mass in vicinity of the RB 1 (depth 1650 m) and RB-2 (depth –1750 m) workings under different loading patterns corresponding to: а – gravitational; б – hydrostatic stress field types

При численном геомеханическом моделировании рассмотрены два варианта схем нагружения модели, характеризующие соответственно гравитационный и гравитационно тектонический тип поля действующих напряжений (рис. 3). В результате многовариантного моделирования и с учетом результатов натурального визуального обследования выработок установлено, что для условий исследуемого МПП наиболее вероятным является гидростатический тип поля напряжений.

Данная гипотеза также подтверждается корреляцией параметров развития зоны потенциальных разрушений по результатам численного моделирования и параметров нарушенной зоны, определенных комплексом инструментальных методов [8]: ее глубина составляет порядка 1–1,5 м.

Особенности крепления сверхглубоких выработок в условиях повышенных температур

Выбор типа и параметров крепи горных выработок РВ-1 и РВ-2 выполнен на основании натуральных и численных исследований, а также фактических горно-геологических условий по месту производства работ, в том числе с учетом рейтинговой классификации качества массива Q Н. Бартона [9].

В результате исследований определены следующие оптимальные параметры усиленного комбинированного крепления (УКК) для условий выработок РВ-1 и РВ-2:

- анкерная крепь – фрикционный анкер СЗА длиной 2,4 м с шагом установки анкеров 800x800 мм;
- армокаркас 950x950 мм, перехлест армокаркасов не менее 50 мм;
- набрызгбетон толщиной –70 мм, класс бетона не ниже В20.

После установки временной (без слоя торкретбетона, рис. 4) и постоянной крепи выполнялся мониторинг ее состояния, включающий методы визуального и инструментального контроля. В результате испытаний отклонений в сторону уменьшения несущей способности анкерного крепления не зафиксировано, выработки сохраняли устойчивое состояние, что говорит о корректном определении параметров их крепления.

Главной особенностью исследуемых выработок является их экстремально глубокое заложение. В связи с этим важен учет факторов, которые могут осложнять технологические условия: одним из них является нестандартный тепловой режим. Повышенные значения температуры, действующие в условиях РВ-1 и РВ-2, могут негативно влиять

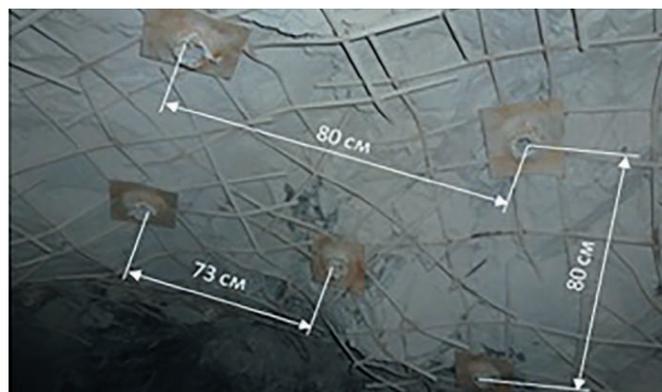


Рис. 4
Общий вид временной крепи в забое выработки РВ-2

Fig. 4
A general view of the temporary support in the RB-2 mine face



Рис. 5
Удельный вес источников тепловыделения для различных технологических операций проходческого цикла

Fig. 5
The specific share of the heat sources for various technological operations in the drifting cycle

на процессы, связанные с затвердеванием растворов для крепления выработок. Для объективного учета всех тепловых факторов, влияющих на набор прочности набрызгбетонной крепи, рассмотрено тепловое воздействие процессов технологического цикла в период строительства выработок.

Рассмотрено тепловыделение от работы самоходного оборудования при бурении шпуров и уборке горной породы, взрывных работ и крепления набрызгбетоном, а также тепловыделение персонала, занятого на основных производственных операциях (рис. 5). Удельный вес тепловыделения для каждой операции примерно одинаков и сопоставим с тепловыделением набрызгбетонной крепи при твердении в начальный период времени.

Для оптимизации процесса твердения бетона решающее значение имеет обеспечение правильной температуры и высокой влажности. Согласно ГОСТ 10180–2012² нормальные условия твердения бетона соблюдаются при температуре 18–22 °С и относительной влажности воздуха не менее 90%. При повышении температуры и нормальной влажности воздуха увеличивается скорость протекающих процессов. Расчётная модель теплового режима горной выработки на стадии проходки выработок показана на рис. 6.

Согласно рис. 6 слой набрызгбетона с двух сторон по-

стоянно окружён тепловыми средами с температурами 40–50 °С. При твердении бетона происходит процесс гидратации, который является изотермическим и связан с выделением большого количества теплоты. Особенно интенсивно это происходит в течение первых 5–7 дней после нанесения набрызгбетона. Реакции гидратации цемента в бетоне происходят с выделением собственного тепла с температурой 75–80 °С, которое из-за высоких температур в приграничных слоях плохо рассеивается. Таким образом, температура набрызгбетона на начальном этапе твердения может достигать 80 °С более продолжительное время при низкой относительной влажности атмосферного воздуха (35–40%).

Результаты натуральных и лабораторных исследований влияния теплового режима на твердение и прочностные свойства набрызгбетона

Для оценки влажности и теплового режима в условиях выработок проводились обследования с использованием гигрометра, термометра и лазерного измерителя температуры непосредственно в забоях и на расстоянии 20–500 м от забоев выработок РВ-1 и РВ-2.

Исследование прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ набрызгбетонной крепи проводилось методом неразрушающего контроля склерометром Proceq Silver Schmidt. На стенке выработки абразивным диском формировались площадки с размерами 10x10 см, на которых производились замеры (рис. 7).

В табл. 1 представлены основные результаты измерений температуры и влажности в выработках. Видно, что наибольшие значения температуры горных пород зафиксированы в забое на контуре незакрепленных выработок и достигают 50 °С. Температура на поверхности закреплённого набрызгбетоном контура выработки с удалением от забоя стабилизируется до значений 30–34 °С. Необходимо отметить общее повышение влажности воздуха в выработках (на начало работ влажность составляла 22–31%), что является благоприятным фактором для твердения набрызгбетона.

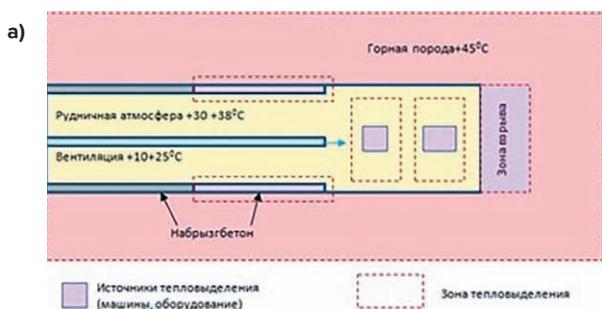


Рис. 6
Расчётная модель теплового режима горной выработки: а – общая схема источников тепловыделения; б – температура набрызгбетона

Fig. 6
A computational model of the thermal regime of a mine working: а – a general diagram of the heat sources; б – the shotcrete temperature



Рис. 7
Измерение прочности набрызгбетона: а – вид площадки измерений; б – склерометр Silver Schmidt

Fig. 7.
Measuring the strength of shotcrete: а – view of the measurement site; б – a Silver Schmidt Rebound Hammer

² ГОСТ 10180–2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ; 2013. 25 с.

Таблица 1
Результаты измерений температуры и влажности в выработках

Выработки	Влажность воздуха, %	Температура воздуха, °С	Температура пород в забое, °С	Температура пород в выработке, °С	Температура на поверхности набрызгбетона, °С
Гор. –1650м	35–42	30–35	43–45	33,6–35	33–35
Гор. –1750м	33–41	31–38	49–50	32,7–35	34–38

Исследования прочностных характеристик набрызгбетонной крепи методом неразрушающего контроля в натуральных условиях показали снижение значений прочности набрызгбетона при сжатии в нормируемом возрасте с учетом теплового фактора и влияния низкой влажности. По данным табл. 2 видно, что при удалении от забоя и стабилизации температуры значения прочности бетона в натуральных условиях увеличиваются.

Таблица 2
Значения прочности бетона в натуральных условиях

	Горизонт, м	Расстояние от забоя, м		
		15	20	40
Прочность бетона, МПа	–1650	12,5	15,5	17,5
	–1750	11,5	15,0	16,0

Table 2
In-situ concrete strength values

Таблица 3
Средние значения прочностных характеристик образцов при различных условиях хранения

№№ образцов	Время твердения, сут	σ _{сж} , МПа	Примечание
	1	2,4	Температура хранения +19 °С, влажность 80%
1	3	10,5	
1	7	13,9	
1	28	26,7	
1	730	38,4	
2	1	5,3	Температура хранения +33–35 °С, влажность 31%
2	3	8,2	
2	7	10,9	
2	28	16,6	
2	730	21,4	

Table 3
The average values of the strength properties of samples under various storing conditions



Рис. 8
График набора прочности образцов в лабораторных условиях: обр. 1 – при температуре хранения +19°С и влажности 80%, обр. 2 – при температуре хранения +33–+35°С и влажности 31%

Fig. 8
The strength gain curve of samples in laboratory conditions: Sample 1 – at the storing temperature of +19°С and humidity of 80%, Sample 2 – at the storing temperature of +33–+35°С and humidity of 31%

Результаты натуральных исследований прочности бетонной смеси подтверждаются лабораторными исследованиями образцов. Из рис. 8 видно, что при сжатии прочность образцов, хранившихся при повышенной температуре и низкой влажности, ниже, чем при стандартной температуре хранения – 16,6 МПа против 26,7 МПа.

Таким образом, результаты натуральных и лабораторных исследований, а также анализ полученных данных свидетельствуют о возможном отрицательном воздействии теплового фактора и влажности на прочностные свойства набрызгбетонной крепи на начальном этапе набора прочности.

В то же время в более поздние сроки происходит незначительный рост прочности набрызгбетона. В табл. 3 приведены средние значения прочностных характеристик образцов набрызгбетона при различных сроках твердения и условиях хранения.

Видно, что для образцов №№1 в условиях хранения с пониженной температурой и повышенной влажностью показатели $\sigma_{сж}$ выше, чем для образцов №№2. При этом основной набор прочности происходит в первые 28 суток твердения.

Заключение

Совокупность результатов экспериментальных и численных исследований геомеханического состояния массива пород в окрестности выработок на гор. –1650 м и гор. –1750 м, а также данные мониторинга устойчивости крепления позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлены ключевые геомеханические параметры массива пород и характеристики поля действующих напряжений: глубина нарушенной зоны вокруг выработок составляет 1,0–1,5 м, а преобладающим является равнокомпонентный (гидростатический) тип поля напряжений, что подтверждено результатами натуральных исследований, численного моделирования и визуальными наблюдениями за характером разрушения породного контура.
2. Обоснованы и апробированы параметры УКК, в частности: фрикционные анкеры СЗА 2,4 м, армокаркас, набрызгбетон толщиной 70 мм. Результаты мониторинга показали, что крепь перекрывает зону трещиноватости и обеспечивает устойчивое состояние выработок на протяжении всего периода наблюдений.

3. Исследованы особенности теплового режима в выработках сверхглубокого заложения. Экспериментально установлено негативное влияние условий повышенных температур и низкой влажности (температура до 50 °С, влажность 22–31%) на начальный процесс твердения набрызгбетона. Прочность бетона

в нормируемом возрасте в призабойной зоне может снижаться на 30–40% по сравнению с нормальными условиями, однако с удалением от забоя наблюдается стабилизация температурно-влажностных условий и последующий рост прочности.

Список литературы / References

- Potvin Y., Hadjigeorgiou J., Stacey T.R. (eds) *Challenges in deep and high stress mining*. Nedlands, W.A.: Australian Centre for Geomechanics; 2007. 666 p.
- Петухов И.М., Батугина И.М., Сидоров В.С., Шабаров А.Н., Лодус Е.В., Мулев С.Н. и др. *Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках*. М.: Изд-во Акад. горных наук; 1997. 376 с.
- Плешко М.С., Лобанов Е.А., Муштеkenov Т.С., Волков Д.С. Опыт проходки и крепления сверхглубоких горных выработок рудника «Скалистый» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». *Горный журнал*. 2022;(7):32–37. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.05>
Pleshko M.S., Lobanov E.A., Mushtekenov T.S., Volkov D.S. Experience of heading and support in super-deep openings in Skalisty Mine of Nor Nickel's Polar Division. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(7):32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.05>
- Дарбинян Т.П., Жерлыгина Е.С., Андреев А.А., Попов А.К. Оценка безопасности полной отработки залежей рудника «Октябрьский» под водоносным горизонтом на основе определения высоты зоны водопроводящих трещин. *Горный журнал*. 2024;(3):25–33. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.03>
Darbinyan T.P., Zherlygina E.S., Andreev A.A., Popov A.K. Evaluation of safety of full ore extraction under aquifer by determining fractured water-conducting zone height in Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(3):25–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.03>
- Соннов М.А., Трофимов А.В., Румянцев А.Е., Шпилев С.В. Применение численного и блочного геомеханического моделирования для определения параметров крепления камерных выработок большого сечения. *Горная промышленность*. 2021;(2):127–131. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-127-131>
Sonnov M.A., Trofimov A.V., Romyantsev A.E., Shpilev S.V. Application of numerical and block geomechanical modelling to determine parameters of large-section chambers. *Russian Mining Industry*. 2021;(2):127–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-2-127-131>
- Semenova I.E., Kulkova M.S. The stress distribution around the mining excavations under different tectonic loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;833:012127. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/833/1/012127>
- 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>
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>
- 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>
- Laubscher D.H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. In: Hustrulid W.A., Bullock R.L. (eds). *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.; 2001, pp. 475–481.

Информация об авторах

Константинов Константин Николаевич – научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3208-9292>; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Кулькова Мария Сергеевна – кандидат технических наук, научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4417-0223>; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 22.12.2025

Information about the authors

Konstantin N. Konstantinov – Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3208-9292>; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Maria S. Kulkova – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4417-0223>; e-mail: m.kulkova@ksc.ru

Article info

Received: 26.10.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 22.12.2025