

ОЦЕНКА ЗОНЫ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ВБЛИЗИ ЗОНЫ ДАЙКИ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Басалаева П.В.¹, Деменков П.А.¹, Куранов А.Д.²

¹*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II;*
²*АО «Гипроцветмет»; Санкт-Петербург*

Ключевые слова: дайка, напряженно-деформированное состояние, хрупкое разрушение, горно-геологические условия, численное моделирование, устойчивость, удароопасность.

Аннотация. В статье рассматривается влияние дайки на напряженно-деформированное состояние на контуре горизонтальной горной выработки. Приведены результаты полевых исследований размера зоны хрупкого разрушения и изменения напряженно-деформированного состояния на контуре горизонтальной горной выработки, пройденной в тектонически напряженном массиве горных пород сложного петрографического строения на глубине 300 м в трех зонах: в лежачем и висячем боках, а так же в самой дайке. Проанализирована классификация категорийности выработок Хибинского массива, находящихся в зоне влияния даек, в зависимости от накопленных напряжений на контуре выработки. Кроме этого, была построена численная модель и произведен анализ напряженно-деформированного состояния вблизи неоднородности более прочных пород и установлено ее влияние на распределение напряжений на контуре незакрепленной горной выработки.

ESTIMATION OF THE BRITTLE FRACTURE ZONE NEAR THE DIKE ZONE IN A TECTONICALLY STRESSED ROCK MASSIVE

Basalaeva P.V.¹, Demenkov P.A.¹, Kuranov A.D.²

¹*Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University;*
²*JSC "Giprotsvetmet"; Saint-Petersburg*

Keywords: dike, stress-strain state, brittle fracture, mining and geological conditions, numerical modeling, stability, impact hazard

Abstract. The article deals with the influence of a dike on the stress-strain state on the contour of a horizontal mine workings. The results of field investigations of the size of the brittle fracture zone and changes in the stress-strain state on the contour of a horizontal mine workings in a tectonically stressed rock massif of complex petrographic structure at a depth of 300 m are presented. The classification of the category of Khibiny massif workings located in the zone of influence of dikes is analyzed. In addition, a numerical model was built and the stress-strain state near the heterogeneity of stronger rocks was analyzed and its influence on the stress distribution on the contour of the unconfined mine workings was established.

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений развития горных предприятий является процесс перехода горных работ на более глубокие горизонты, что сопровождается усложнением горно-геологических и петрографических условий [1-3].

Хибинский массив апатит-нефелиновых руд относится к тектонически напряженным массивам горных пород. В наше время в его состав входят более 200 даек, для которых характерно крутопадающее залегание. Данные неоднородности имеют различные свойства в зависимости от их формирования.

При проходке горных выработок вблизи зоны дайки в тектонически напряженном рудном массиве горных пород геомеханические процессы зачастую характеризуются проявлениями горного давления в связи с большой прочностью и жесткостью вмещающих пород [4-5]. Основываясь на «Указаниях по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам», можно сделать вывод, что критерием удароопасности является превышение максимальными напряжениями половины от предела прочности пород [6].

Наиболее опасными по своей природе являются динамические формы проявления горного давления, причиной возникновения которых является склонность месторождений к хрупкому разрушению, а также наличие тектонической составляющей напряжений [7, 8]. Основной особенностью таких явлений считается высокая скорость деформации породного массива и как следствие сложность прогнозирования таких явлений. Опасностью динамического проявления горного давления так же является лавинообразное формирование V-образных куполов, объединяющих между собой различные формы хрупкого разрушения.

Анализ развития зон хрупкого разрушения рассмотрены во многих научных работах [9-11]. В них проанализированы натурные и лабораторные исследования [12-14], а также решение задач с использованием численного моделирования [15, 16].

В данной статье особое внимание уделено вопросам оценки устойчивости одиночных горизонтальных выработок, расположенных в тектонически напряженном массиве сложного геологического строения.

В условиях Хибинского массива к сложному геологическому строению авторами отнесены комплексы крутопадающих даек [17, 18], характеризующиеся модулем деформации, превышающим в несколько раз модуль деформации массива. Мощность даек составляет от сантиметров до первых метров.

Методы исследования

Проведение горных выработок сопровождаются развитием геомеханических и геодинамических процессов [19], которые могут привести к потере устойчивости выработки и усложняют их эксплуатацию [20]. Исследование этих зон позволяет повысить безопасность ведения горных работ. Необходимость учета сложных петрографических условий для повышения точности прогноза существенно повышает сложность поставленной задачи. Принятая на данный момент методика прогноза геомеханических процессов на Хибинских месторождениях не отражает фактическое состояние НДС при пересечении участков сложного геологического строения. По мере продвижения забоя горных выработок происходит смена горных пород, что, несомненно, влияет на напряженно-деформированное состояние массива вблизи контура выработки и на ее устойчивость [21].

Размеры зон проявления горного давления изменяются от метров до десятков метров. На них имеют влияние, начальное напряженное состояние, форма и размеры выработки, а также параметры дайки.

Прогноз появления зон хрупкого разрушения выполнялся с помощью численного моделирования в пространственной постановке. Рассмотрен случай проходки горизонтальной горной выработки, пересекающей дайку. Массив горных пород представлен блочной структурой, блоки которого разделены петрографической неоднородностью.

В качестве метода численного моделирования был выбран метод конечных элементов. Вмещающий массив в данном исследовании задавался как линейно деформируемая среда. Контакт между петрографическими разностями как полное сцепление блоков массива (рис. 1).

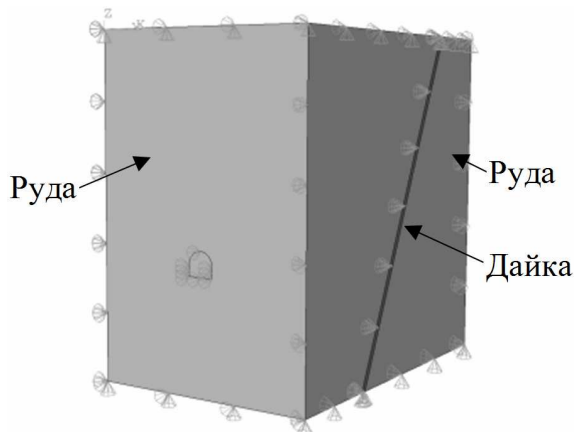


Рис. 1. Расчетная схема модели

Параметры массива подбирались исходя из лабораторных испытаний пород с учетом коэффициента структурного ослабления [22]. В таблице 1 представлены используемые характеристики массива.

Табл. 1. Физико-механические свойства массива

	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона
Мончикит (дайка)	21,8	0,33
Руда	10	0,33

Для оценки напряженно-деформированного состояния в зоне сложного геологического строения были использованы данные маркшейдерских съёмок с рудников, разрабатывающих месторождение Хибинского массива.

Обработка натуральных данных позволила установить, что для зон пересечения петрографических неоднородностей характерны динамические проявления в виде шелушения и заколообразования. При таких проявлениях выработки относятся к категории «В», «Г» и «Д», краткое описание происходящих проявлений согласно категориям, с учетом предела прочности пород на сжатие (σ_c) приведено в таблице 2.

Табл. 2. Характеристика внешних признаков динамического проявления горного давления в выработках различных категорий состояний [23]

Категория состояния выработки	Действующие напряжения	Описание возможных внешних признаков динамического проявлений горного давления
В	$(0,3 \div 0,5) \sigma_c$	Шелушение, незначительное динамическое заколообразование с затуханием через 4-6 часов после отпала.
Г	$(0,5 \div 0,7) \sigma_c$	Интенсивное шелушение, динамическое заколообразование пород в течение 6-12 часов после отпала, эллипсоидная форма «стаканов» от взрывных скважин.
Д	$>0,7 \sigma_c$	Интенсивное динамическое заколообразование, не затухающее несколько суток стреляние, эллипсоидная форма «стаканов» от взрывных скважин, образование «дорожек» на стенках шпуров и скважин. Длительность процесса до 2-х и более суток.

Для определения размера зон хрупкого разрушения пород использовалась формула [23]:

$$h_{xp} = 0,64k_{\partial}b\sqrt{Hs}, \quad (1)$$

где b – ширина одиночной горной выработки; k_{∂} – относительный показатель напряженного состояния, определяемый следующим способом:

$$k_{\partial} = 0,6 \frac{\sigma_{\partial}}{\sigma_c} - 0,24, \quad (2)$$

где s – коэффициент формы горной выработки, для одиночной выработки $s = 1$; H – фактическая высота выработки; σ_{∂} – величина максимального напряжения, действующего в плоскости сечения горной выработки, МПа.

Для оценки напряженно-деформированного состояния так же используется относительный размер выработки:

$$h_{отн} = \frac{H}{H_{np}}, \quad (3)$$

где H_{np} – проектный размер выработки.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты исследования натуральных данных позволили получить следующие зависимости (рис. 2) для одиночных выработок, пересекающих прослойки более прочных пород. По оси ординат на графиках (рис. 2) отложены значения относительной размер выработки, а по оси абсцисс показатель напряженного состояния, принятый как отношение действующих напряжений σ_{∂} к пределу прочности горных пород σ_c . Наибольшие концентрации напряжений находятся в зоне влияния дайки, в то время как в лежащем и

висячем боках напряжения и размер зоны хрупкого разрушения уменьшаются в среднем на 20%. Пример расчета размеров зоны хрупкого разрушения представлен в таблице 3.

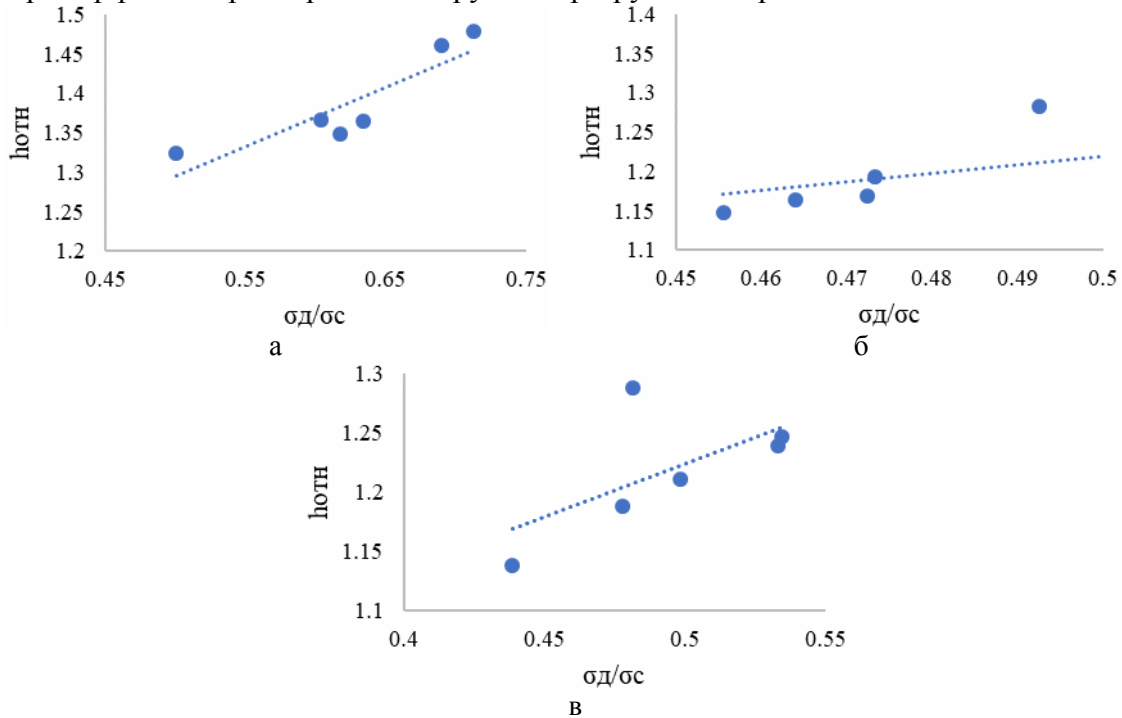


Рис. 2. График зависимости напряженного состояния массива, прочностью пород и размерами зоны хрупкого разрушения: а – в зоне влияния дайки; б – висячий бок (за пределами зоны влияния дайки); в – лежащий бок (за пределами зоны влияния дайки)

Табл. 3. Пример расчета показателей зоны хрупкого разрушения

H_{np} , м	b , м	H , м	s	σ_d	h_{xp} , м	k_d	$h_{отн}$, м
В зоне дайки							
4,10	5,24	5,53	1	210,66	1,43	0,18	1,34
В лежащем боку							
4,10	4,77	4,79	1	68,65	0,69	0,10	1,17
В висячем боку							
4,10	5,22	5,11	1	74,74	1,01	0,13	1,25

В результате численного моделирования поэтапной проходки горной выработки были построены графики зависимости напряжений от расстояния в момент приближения забоя к неоднородности (рис. 3) и после её прохождения (рис. 4).

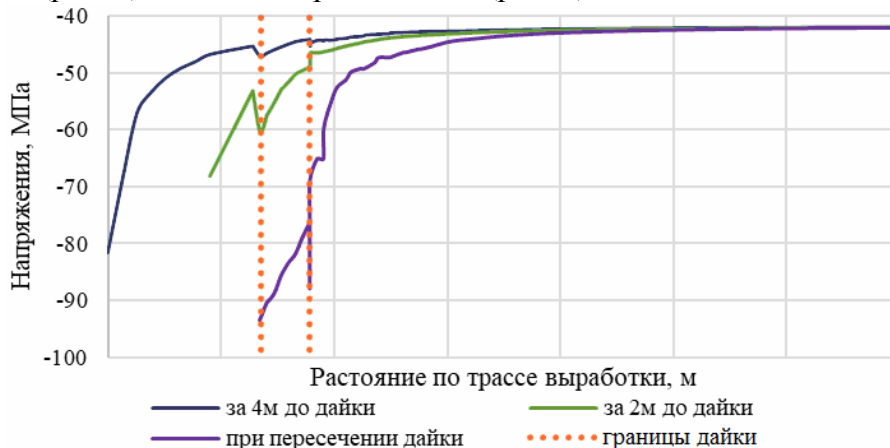


Рис. 3. Распределение нормальных тангенциальных напряжений по трассе выработки впереди забоя при поэтапной проходке

Для анализа расстояния по оси абсцисс был принят эквивалентный радиус, равный радиусу выработки круглой формы той же площади, что и принятая для расчета форма выработки. В данном случае он рассчитывается по формуле

$$R_0 = \sqrt{s/\pi}. \quad (4)$$

За нулевую координату был принят забой на расстоянии $2R_0$ от дайки, а увеличение координаты характеризует приближение к ней, а затем удаление.

Анализируя распределение напряжений при приближении забоя к дайке, можно заметить, что концентрация напряжений в неоднородности начинает резко увеличиваться непосредственно при приближении забоя к зоне ее влияния.

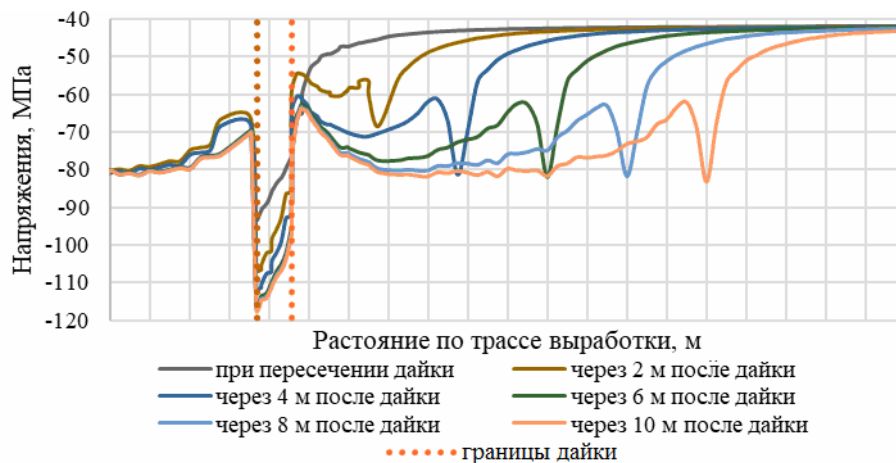


Рис. 4. Распределение нормальных тангенциальных напряжений по трассе выработки на уровне кровли после пересечения дайки при поэтапной проходке

По рисунку 4 хорошо видно, что в зоне влияния дайки происходит разгрузка массива до и после дайки, а концентрация напряжений происходит непосредственно в более прочных породах. В самой же дайке по мере удаления забоя концентрация напряжений увеличивается на 20% и достигает постоянных значений вне зоны влияния проходки.

Выводы

В рамках данной работы был проведен анализ натуральных данных с целью определения закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массива и размера зоны хрупкого разрушения висячего и лежачего бока, а также зоны влияния дайки. В результате обработки натуральных данных выявлено, что наибольшие значения напряжений и соответствующих им зон хрупкого разрушения находятся в зоне области влияния дайки, а наименьшие – в висячем боку.

При численном моделировании поэтапной проходки выработки было определено, что изменение напряженного состояния на контуре происходит на расстоянии R_0 .

Дайки являются одним из факторов, влияющих на устойчивость горных выработок. Именно в зоне их воздействия происходит изменение напряженно-деформированного состояния массива, что влечет за собой появление участка увеличения концентрации напряжений на 10-20% и, как следствие, возникновение большего динамического проявления горного давления.

Список литературы

1. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, p. 02023. doi.org/10.1051/e3sconf/20185602023.
2. Вербилло П.Э., Вильнер М.А. Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 47-59. – doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.
3. Онохин Ф.М. Особенности структуры Хибинского массива и апатит-нефелиновых месторождений. – Л.: Наука, Ленингр. Отд., 1975. – 106 с.

4. Корчак П.А., Карасев М.А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит». // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, №1. – С. 67-80. – doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
5. Беляков Н.А., Морозов К.В., Емельянов И.А. Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // Горный журнал. – 2023. – №5. – С. 89-96. – doi.org/10.17580/gzh.2023.05.13.
6. Козырев А.А., Панин В.И., Семенова И.Э. Управление геодинамическими рисками на Хибинских апатитовых рудниках // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2010. – №3. – С. 9-18.
7. Петухов И.М., Ильин А.М., Трубецкой К.Н. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках. – М: Изд-во Академии Горной книги, 1997. – 377 с.
8. Li C.C., Mikula P., Simer B., Hebblewhite B., Joughin W. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, no. 5(11), pp. 1110-1118. doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001.
9. Jingyuan W., Xianghui D., Weiping C. Numerical analysis on the stability of layered surrounding rock tunnel under the conditions of different inclination angle and thickness // American journal of traffic and transportation engineering. 2019, no. 4(2). pp. 67-74.
10. Козырев А.А., Панин В.И., Федотов Ю.В. Проблемы безопасности при ведении горных работ в высоконапряженных породных массивах // Записки горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 150-156.
11. Козырев А.А., Савченко С.С. Об управлении напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при проходке горных выработок в удароопасных условиях // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17. – С. 221-224.
12. Абрамов Н.Н., Епимахов Ю.А. Особенности проходки большепролетной выработки в условиях сложного напряженно-деформированного состояния скального массива // Горная промышленность. – 2013. – №3(109). – С. 90-95.
13. Diederichs M.S., Kaiser P.K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, no. 5, pp. 785-812.
14. Martin C.D., Read R.S., Martino J.B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065-1073.
15. Kaiser P.K., McCreath D.R., Tannan D.D. Canadian rockburst support handbook. – Geomechanics Research Centre and CAMIRO, 1995. – 293 p.
16. Jenck O., Dias D. Analyse tridimensionnelle en différences finies de l'interaction entre une structure en béton et le creusement d'un tunnel à faible profondeur // Geotechnique. 2004, no. 54(8), pp. 519-528. doi.org/10.1680/geot.2004.54.8.519.
17. Протосеня А.Г., Алексеев А.В., Вербило П.Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 252-260. – doi.org/10.31897/PMI.2022.26.
18. Турчанинов И.А., Волярович М.П., Бондаренко А.Т., Ковалева Г.А., Медведев Р.В., Томашевская И.С., Тюремнов В.А. Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений. – Л.: Наука, 1975. – 71 с.
19. Rybak J., Khayrutdinov M., Kuziev D., Kongar-Syuryun C., Babyr. N. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61-70. – doi.org/10.31897/PMI.2022.2.
20. Nunes M.A., Meguid M.A. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining // Tunnelling and underground space technology. 2009, no. 24, pp. 716-722. doi.org/10.1016/j.tust.2009.04.002.
21. Петров Д.Н., Моисеев В.И., Ларионов Р.И. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг одиночной выработки в неоднородном массиве // Записки Горного института. – 2006. – Т. 168. – С. 231-234.
22. Vásárhelyi, B., Kovács, D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017, no. 61(1), pp. 39-50. doi.org/10.3311/PPci.10095.
23. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 85-98. – doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

References

1. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, p. 02023. doi.org/10.1051/e3sconf/20185602023.
2. Vербило P.E., Vilner M.A. Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 6-2, pp. 47-59. doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_47.
3. Onokhin F.M. Features of the structure of the Khibiny massif and apatite-nepheline deposits. – L: Publ. house «Science», 1975. – 106 p.

4. Korchak P.A., Karasev M.A. Geomechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of Ltd "Apatit" mines // Sustainable Development of Mountain Territories. 2023, no. 15(1), pp. 67-80. doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.
5. Belyakov N.A., Morozov K.V., Emelyanov I.A. Methodology for processing field test data on the assessment of the natural stress state of a mountain range by the ring unloading method // Mining Journal. 2023, no. 5, pp. 89-96. doi.org/10.17580/gzh.2023.05.13.
6. Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E. Geodynamic risk management at the Khibiny apatite mines // Bulletin of the Kola Scientific Center of the RAS. 2010, no. 3, pp. 9-18.
7. Petukhov I.M., Ilyin A.M., Trubetsky K.N., Prediction and prevention of rock bursts in mines. – M: Publ. house «Academy of the Mining Book», 1997. – 377 p.
8. Li C.C., Mikula P., Simer B., Hebblewhite B., Joughin W. Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, no. 5(11), pp. 1110-1118. doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001.
9. Jingyuan W., Xianghui D., Weiping C. Numerical analysis on the stability of layered surrounding rock tunnel under the conditions of different inclination angle and thickness // American journal of traffic and transportation engineering. 2019, no. 4(2). pp. 67-74.
10. Kozyrev A.A., Panin V.I., Fedotov Yu.V. Safety problems in mining in high-stress rock masses // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 198, pp. 150-156.
11. Kozyrev A.A. Savchenko S.S. Stress and strain control during heading operations in rock mass under conditions of rockburst hazard // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2014, vol. 17, pp. 221-224.
12. Abramov N.N., Epimakhov Yu.A. Large-span drivage in rock mass under complex stresses and strains // Russian Mining Industry Journal. 2013, no. 3(109), pp. 90-95.
13. Diederichs M.S., Kaiser P.K., Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2004, vol. 41, no. 5, pp. 785-812.
14. Martin C.D., Read R.S., Martino J.B. Observations of brittle failure around a circular test tunnel // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997, vol. 34, no. 7, pp. 1065-1073.
15. Kaiser P.K., McCreath D.R., Tannant D.D. Canadian rockburst support handbook. – Geomechanics Research Centre and CAMIRO, 1995. – 293 p.
16. Jenck O., Dias D. Analyse tridimensionnelle en différences finies de l'interaction entre une structure en béton et le creusement d'un tunnel à faible profondeur // Geotechnique. 2004, no. 54(8), pp. 519-528. doi.org/10.1680/geot.2004.54.8.519.
17. Protosenya A.G., Alekseev A.V., Verbilo P.E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 254, pp. 252-260. doi.org/10.31897/PMI.2022.26.
18. Turchaninov I.A., Volarovich M.P., Bondarenko A.T., Kovaleva G.A., Medvedev R.V., Tomashevskaya I.S., Tyuremnov V.A. Atlas of physical properties of minerals and rocks of the Khibiny deposits. – L.: Science, 1975. – 71 p.
19. Rybak J., Khayrutdinov M., Kuziev D., Kongar-Syuryun C., Babyr. N. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 61-70. – doi.org/10.31897/PMI.2022.2.
20. Nunes M.A., Meguid M.A. A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining // Tunnelling and underground space technology. 2009, no 24, pp. 716-722. doi.org/10.1016/j.tust.2009.04.002.
21. Petrov D.N., Moiseev V.I., Larionov R.I. Stress-strain state of rocks around a single working in a heterogeneous massive // Journal of Mining Institute. 2006, vol. 168, pp. 231-234.
22. Vásárhelyi, B., Kovács, D. Empirical methods of calculating the mechanical parameters of the rock mass // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2017, no. 61(1), pp. 39-50. doi.org/10.3311/PPci.10095.
23. Korchak P. A. Geomechanical prediction of growth of brittle fracture zones in the vicinity of underground excavations in over-stress rock mass // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 5, pp. 85-98. doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_85.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Басалаева Полина Вячеславовна – аспирант	Basalaeva Polina Vyacheslavovna – postgraduate student
Деменков Петр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, декан строительного факультета	Demenkov Petr Alekseevich – doctor of technical sciences, associate professor, dean of the Faculty of civil engineering
Куранов Антон Дмитриевич – кандидат технических наук, технический директор basalaeva_pv@pers.spmi.ru	Kuranov Anton Dmitrievich – candidate of technical sciences, technical director

Получена 11.04.2024