



Возможность динамических проявлений горного давления в карьерах

В.В. Рыбин✉, К.Н. Константинов, А.С. Калюжный

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

✉ v.rybin@ksc.ru

Резюме: Горным институтом Кольского научного центра РАН начиная с 2000-х годов проводились специальные исследования параметров напряжённо-деформированного состояния массива горных пород на действующих карьерах. При проведении исследований использовали метод разгрузки в варианте торцевых измерений, метод дискования керна, метод фиксации искривления стволов геологических скважин и другие. В результате было показано, что при формировании глубоких карьерных выемок в массивах прочных скальных горных пород уровень действующих напряжений в прибортовом массиве карьеров может быть весьма значителен, достигая значений, при которых становится вероятной реализация динамических проявлений горного давления. В условиях гравитационно-тектонического поля напряжений, уровень действующих напряжений в массиве пород может быть высок даже на сравнительно небольших глубинах. Выявлена тенденция к увеличению абсолютных значений напряжений с глубиной; изучено распределение напряжений в непосредственной близости от контура карьерной выемки.

Действие в массиве пород высоких горизонтальных напряжений неоднозначно влияет на устойчивость бортов карьеров. С одной стороны, создаётся дополнительная нагрузка, нормальная граням структурных блоков, перпендикулярных контуру карьера, что увеличивает силу трения по контактам блоков пород, и, как следствие, повышается устойчивость бортов карьеров в целом. С другой стороны, учитывая прогнозируемый уровень действующих напряжений на уровне дна карьера, сравнимый с прочностью на одноосное сжатие скальных пород, слагающих его борт, становится вероятным разрушение скальных пород в динамической форме.

В настоящее время на действующих глубоких карьерах отмечаются случаи разрушения горных пород под действием высоких напряжений, дискования керна исследовательских скважин, что является свидетельством возможности реализации динамических проявлений горного давления на открытых горных работах.

Ключевые слова: динамические проявления горного давления, напряженно-деформированное состояние, горные породы, открытые горные работы, карьеры

Для цитирования: Рыбин В.В., Константинов К.Н., Калюжный А.С. Возможность динамических проявлений горного давления в карьерах. *Горная промышленность*. 2023;(S1):56–60. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-56-60>

Dynamic rock pressure manifestations in open-pits

V.V. Rybin✉, K.N. Konstantinov, A.S. Kalyuzhny

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

✉ v.rybin@ksc.ru

Abstract: Since the 2000s, the Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences has been studying the parameters of the rock mass stress-strain state at active open-pits. The studies included the de-stressing method in the end measurements version, the core diskings method, the method of recording the geological boreholes deviations and other methods. As the result it was demonstrated that the level of the effective stresses in the rock mass adjacent to the open-pits can be very significant during the deep pit excavations in solid rock masses, reaching values at which rock pressure manifestations can occur.

Under the conditions of gravitational-tectonic stress field, the level of effective stresses can be high even at relatively shallow depths. At that, the authors have revealed the tendency for the absolute stress values to increase with the increasing depth. Distribution of stresses was also studied in the immediate vicinity of the open-pit excavation contour.

The high horizontal stresses in the rock massif have an ambiguous effect on the slope stability. On the one hand, they create additional load, normal to the faces of the structural blocks, perpendicular to the open-pit contour, which increases the friction force at the contact surfaces of the rock blocks and, as a consequence, enhance the slope stability in general. On the other hand, dynamic rocks destruction can occur due to the forecasted level of the effective stresses at the open-pit bottom, comparable with the strength of uniaxial compression of the rocks composing the pit wall.

At the present time, while operating deep open-pits the specialists observe the cases of rock failure under the influence of high stress or diskings of cores from research boreholes, which is an evidence of potential manifestations of the dynamic rock pressure in open-pit mining.

Keywords: dynamic rock pressure manifestations, stress-strain state, rocks, open-pit mining, open-pits

For citation: Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Dynamic rock pressure manifestations in open-pits. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):56–60. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-56-60>



Введение

При формировании борта карьера на конечном контуре высотой 700–1000 м в горных породах с объёмным весом около 3 т/м³ уровень вертикальных напряжений, действующих в прибортовом массиве пород, составляет порядка 20–30 МПа в придонной части карьера, даже исходя только из гипотезы гравитационного поля напряжений в массиве пород и без учёта концентраций напряжений. При этом величина горизонтальных напряжений может достигать значений 0,3–0,5 от величины вертикальных напряжений, что, в принципе, близко к условиям, при которых возможны проявления горного давления в динамических формах [1; 2].

В условиях же гравитационно-тектонического поля напряжений уровень действующих напряжений может быть весьма значителен даже на сравнительно небольших глубинах [3–5]. А с учетом концентраций напряжений вблизи глубинных частей контура карьера напряжения в массиве могут быть сопоставимы с пределом прочности пород на одноосное сжатие, следствием чего может быть реализация динамических форм горного давления [6–8].

Проблема динамических проявлений горного давления в карьерах

Выполненные на карьерах АО «Апатит» и в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (рис. 1) исследования по изучению параметров напряжённого состояния массива пород методом разгрузки торца керна показали достаточ-

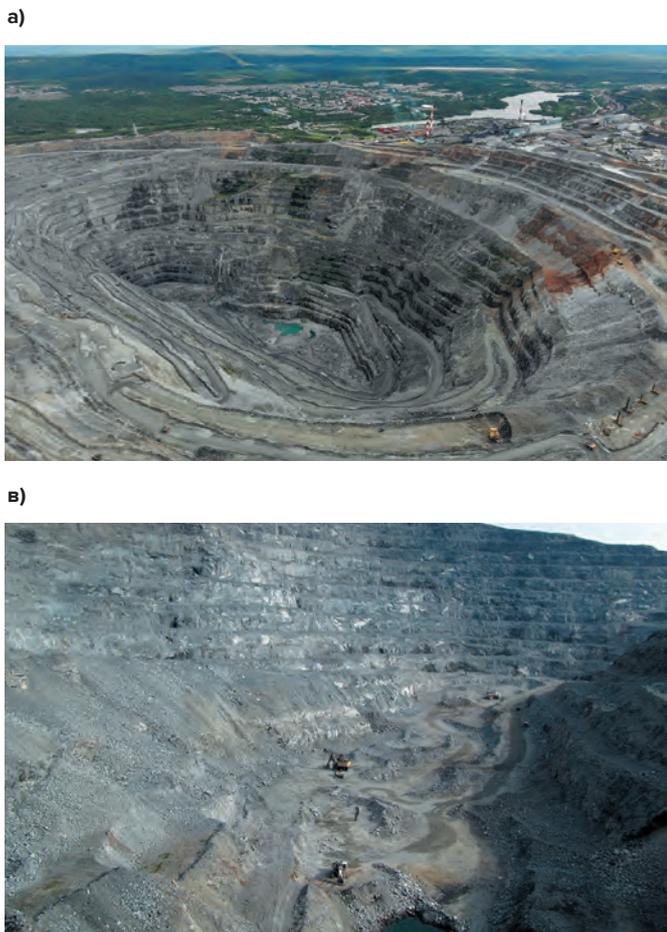


Рис. 1
Глубокие рудные карьеры Кольского региона: карьер «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (а), Коашвинский (б), Ньюоркпахкский (в) и Центральный (г) карьеры АО «Апатит»

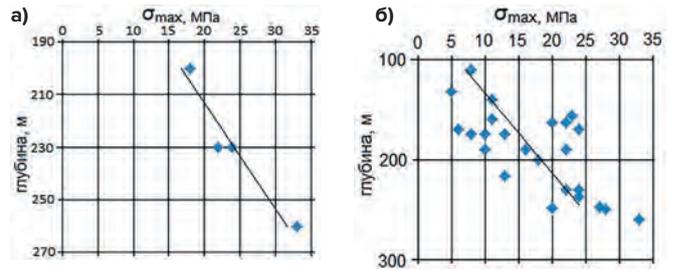


Рис. 2
Зависимости действующих напряжений (максимальная компонента главных напряжений σ_{\max}) в бортах карьеров от глубины H для условий: карьера рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» (a – коэффициент корреляции $R^2 = 0,47$); Ньюоркпахкского карьера Восточного рудника АО «Апатит» (b – коэффициент корреляции $R^2 = 0,93$).

Fig. 2
Dependences of the effective stresses (the maximum component of the main stresses σ_{\max}) in the pit walls on the value of depth H for the conditions of the Zheleznyy open pit mine of the Kovdorsky GOK JSC (a – correlation coefficient $R^2 = 0,47$); Nyorkpakhksky open pit mine of the Apatit JSC (b – correlation coefficient $R^2 = 0,93$).

но высокий уровень действующих напряжений. При этом установлена зависимость и выявлена тенденция к увеличению абсолютных значений действующих напряжений с глубиной [9; 10]. Зависимости действующих напряжений в бортах карьеров от глубины приведены на рис. 2.

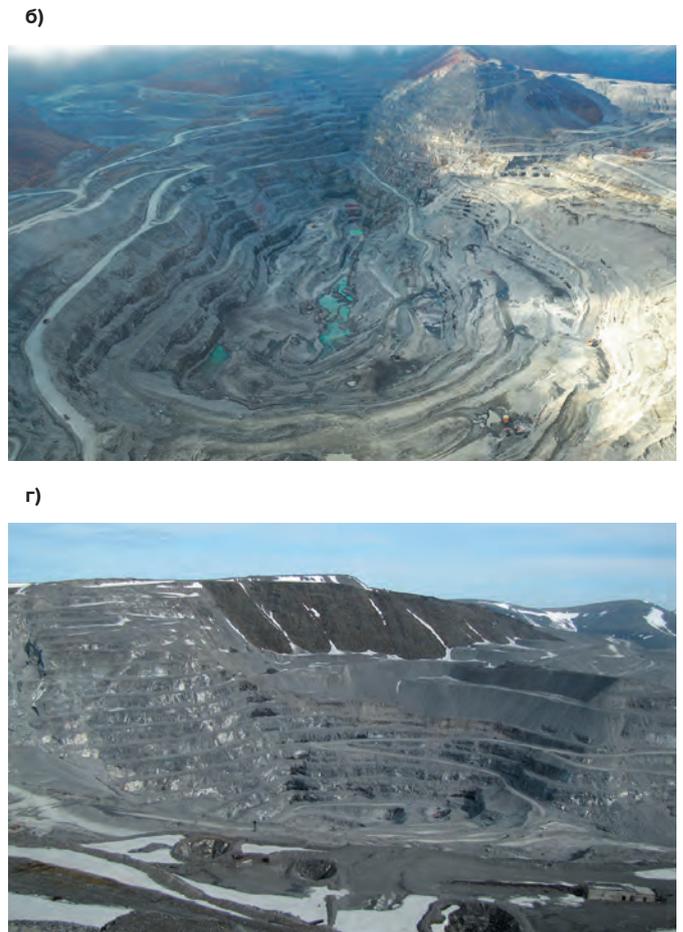


Fig. 1
Deep ore open pit mines in the Kola Region: the Zheleznyy open pit mine of the Kovdorsky GOK JSC (а), Koashvinsky open pit mine (б), Nyorkpakhksky open pit mine (в) and the Central open pit mine of the Apatit JSC (г)



Рис. 3
Проявление дискования керна
в кальцит-карбонатитах, карьер
«Железный» АО «Ковдорский
ГОК»

Fig. 3
Manifestations of core discing
in calcite-carbonatites, the
Zhelezny open pit mine of the
Kovdorsky GOK JSC

В качестве примера показано проявление дискования керна в одной из исследовательских скважин на карьере «Железный» в кальцит-карбонатитовой породе (рис. 3).

Известны случаи разрушения горных пород в динамической форме, имевшие место ранее на карьерах [11]. Так, 26.10.1995 г. в пределах карьера «Центральный» АО «Апатит» (в настоящее время входит в состав Восточного рудника АО «Апатит») отмечались сотрясения здания административного комплекса рудника; осыпания штукатурки; подпрыгивание ковша экскаватора на одном из рабочих уступов; обрушение одного из рабочих уступов карьера; внезапное обрушение стенок карьерных рудоспусков. По сейсмологическим данным глубина очага землетрясения не превышала 1 км, что дополнительно свидетельствует о его техногенном характере, спровоцированном горными работами в карьере. Впоследствии вплоть до настоящего времени на территории карьера «Центральный» и комплекса подземных сооружений рудника неоднократно фиксировались динамические проявления горного давления [12].

По геометрическим характеристикам карьерной выемки и объёму извлечённой горной массы карьер «Центральный» АО «Апатит» сопоставим с карьером «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Так, объёмы перемещённой горной массы при отработке карьеров рудников «Железный» и «Центральный» примерно одинаковы и составляют в обоих случаях величину порядка 350 млн м³, глубина карьеров – 400–500 м, оба карьера имеют вытянутую в плане форму. С точки зрения геомеханики разница между этими двумя карьерами состоит в уровне действующих в массиве пород тектонических напряжений. Для карьера «Центральный» этот уровень, на наш взгляд, несколько выше за счёт большей общей напряжённости массива, расположенного в гористом рельефе, в то время как карьер «Железный» расположен в местности преимущественно с равнинным рельефом. Кроме этого, окружающий массив карьера «Центральный» в существенно большей степени подвержен техногенным воздействиям вследствие размещения в его пределах различных подземных сооружений (глубоких рудоспусков, тоннелей) и ведения очистных работ подземным способом Расвумчоррским рудником АО «Апатит», находящимся в непосредственной близости от карьера «Центральный». С учётом вышесказанного представляется вероятной реализация динамических проявлений горного давления в виде интенсивного шелушения и динамического заколообразования при отработке Ковдорского месторождения открытым способом начиная с глубины ориентировочно 600–700 м.

Применительно к карьерам Восточного рудника АО «Апатит» (Коашвинский и Ньоркпахкский) при анализе возможности динамических проявлений горного давления в динамической форме необходимо учитывать два обстоятельства. С одной стороны, в массиве пород одного из карьеров Восточного рудника (Ньоркпахкского) зафиксирован самый высокий уровень действующих напряжений по сравнению с карьерами «Центральный» и «Железный». Так, максимальная компонента главных напряжений на гор. +440 м Ньоркпахкского карьера составила 33 МПа, что является наибольшим из всех замеренных значений действующих напряжений непосредственно с уступов карьера [3]. С другой стороны, на Восточном руднике к настоящему времени наименьший объём перемещённой горной массы по сравнению с карьерами «Центральный» и «Железный». С учётом этих обстоятельств можно считать вероятной реализацию динамических проявлений горного давления в виде интенсивного шелушения и динамического заколообразования при отработке карьеров Восточного рудника начиная с глубины около 500–600 м.

В общем случае при определении глубины, начиная с которой можно ожидать реализацию разрушения уступов карьера в динамической форме, следует ориентироваться на рост уровня действующих напряжений с глубиной.

Вышеперечисленные обстоятельства показывают, что действие в массиве пород повышенных горизонтальных напряжений неоднозначно влияет на устойчивость бортов и уступов карьеров. С одной стороны, создаётся дополнительная нагрузка, нормальная граням структурных блоков, перпендикулярных контуру карьера, что увеличивает силу трения по контактам блоков пород, и, как следствие, повышается устойчивость как отдельных уступов, так и бортов карьера в целом. С другой стороны, учитывая прогнозируемый уровень действующих напряжений на уровне дна карьера, сравнимый с прочностью скальных пород при одноосном сжатии, становится вероятным разрушение участков уступов и бортов карьеров в динамической форме, характерной в настоящее время в основном для удароопасных месторождений, обрабатываемых подземным способом. В случае вытянутой в плане формы карьера наибольшие концентрации напряжений и, соответственно, наибольшую вероятность динамических проявлений горного давления можно прогнозировать на наиболее короткой его стороне в зонах максимальной кривизны борта карьера в плане. Возникающие избыточно высокие уровни действующих напряжений в сопряжении дна карьера и откоса борта могут провоцировать разрушение горных пород с образованием трещин отрыва. Формой динамических проявлений горного давления будет, скорее всего, отрыв и сдвиг отдельных блоков пород по существующим тектоническим нарушениям.

Заключение

Таким образом, динамические проявления горного давления непосредственно на открытых горных работах уже стали реальностью в пределах карьера «Центрального» АО «Апатит», а в ближайшее время могут стать реальностью на большинстве крупных глубоких карьеров, ведущих горные работы в скальных тектонически напряжённых массивах. Поэтому при проектировании мощных глубоких карьеров необходимо учитывать не только исходное напряженное состояние массива горных пород на место-



рождении, но и перераспределение напряжений вблизи формирующегося контура карьера, которое связано как с извлечением больших масс горной породы, так и размещением их в непосредственной близости от карьера в отвалах, что неизбежно приводит к общей неравномерной нагруженности массива, а также к возможному проявлению или увеличению техногенной сейсмичности.

Опасность реализации динамических форм горного давления на открытых горных работах при действии повышенных напряжений в массиве требует проработки рациональных способов и порядка ведения горных работ,

специальных профилактических мероприятий, а также соответствующих методов и средств геомеханического контроля. В связи с этим на предприятиях, ведущих горные работы открытым способом на глубинах свыше 400–500 м, необходимо наличие специальных служб геодинамической безопасности, задачей которых является непрерывный контроль геодинамических процессов в прибортовом массиве и своевременное применение соответствующих профилактических мероприятий для безопасного ведения горных работ.

Список литературы

1. Козырев А.А., Панин В.И., Савченко С.Н., Козырев С.А., Мальцев В.А., Рыбин В.В. и др. *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты; 2002. 325 с.
2. Kozyrev A.A., Maltsev V.A., Kasparian E.V., Rybin V.V., Reshetnyak S.P. Mining-Induced Earthquakes in the Open Pits of the Kola Peninsula. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds). *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, Perth (Australia), March 9–11, 2005*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2005, pp. 575–577. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_64
3. Xia K., Chen C., Fu H., Pan Y., Deng Y. Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines: A case study. *Engineering Geology*. 2016;210:212–230. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.018>
4. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):549–561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>
5. Karakus M., Zhukovskiy S., Goodchild D. Investigating the influence of underground ore productions on the overall stability of an existing open pit. *Procedia Engineering*. 2017;191:600–608. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.223>
6. Zhenwei Wang, Gaofeng Song, Kuo Ding. Study on the Ground Movement in an Open-Pit Mine in the Case of Combined Surface and Underground Mining. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020:8728653. <https://doi.org/10.1155/2020/8728653>
7. Sepehri M., Apel D.B., Adeeb S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering Geology*. 2020;266:105457. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>
8. Lisjak A., Mahabadi O.K., He L., Tatone B.S. A., Kaifosh P., Haque S.A., Grasselli G. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing. *Computers and Geotechnics*. 2018;100:84–96. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.011>
9. Мельников Н.Н., Козырев А.А., Решетняк С.П., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Мелик-Гайказов И.В. и др. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении. В кн.: Мельников Н.Н., Решетняк С.П. (ред.) *Горное дело в Арктике: труды 8-го Междунар. симпозиума, г. Апатиты, 20–23 июня 2005 г.* СПб.: Типография Иван Фёдоров; 2005. С. 2–14.
10. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines. *Eurasian Mining*. 2019;(2):23–26. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.05>
11. Батугин А.С. Участки предельно напряженного состояния земной коры как среда для техногенных землетрясений. В кн.: Селюцкая О.В. (ред.) *Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов 2-й Всерос. науч. конф. с международным участием, г. Москва, 29–30 сентября 2021 г.* М.: Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН; 2021. С. 22–23.
12. Козырев А.А., Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Решетняк С.П. Анализ условий возникновения динамических проявлений горного давления на месторождениях Кольского полуострова, разрабатываемых открытым способом. В кн.: Мельников Н.Н. (ред.) *Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика: сб. докл. междунар. совещания, г. Кировск, 14–16 апреля 2004 г.* Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2004. Ч. 1. С. 89–94.

References

1. Kozyrev A.A., Panin V.I., Savchenko S.N., Kozyrev S.A., Maltsev V.A., Rybin V.V. et al. *Seismicity in mining operations*. Apatity; 2002. 325 p. (In Russ.)
2. Kozyrev A.A., Maltsev V.A., Kasparian E.V., Rybin V.V., Reshetnyak S.P. Mining-Induced Earthquakes in the Open Pits of the Kola Peninsula. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds). *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, Perth (Australia), March 9–11, 2005*. Perth: Australian Centre for Geomechanics; 2005, pp. 575–577. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_64



3. Xia K., Chen C., Fu H., Pan Y., Deng Y. Mining-induced ground deformation in tectonic stress metal mines: A case study. *Engineering Geology*. 2016;210:212–230. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.06.018>
4. Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(3):549–561. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>
5. Karakus M., Zhukovskiy S., Goodchild D. Investigating the influence of underground ore productions on the overall stability of an existing open pit. *Procedia Engineering*. 2017;191:600–608. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.223>
6. Zhenwei Wang, Gaofeng Song, Kuo Ding. Study on the Ground Movement in an Open-Pit Mine in the Case of Combined Surface and Underground Mining. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020:8728653. <https://doi.org/10.1155/2020/8728653>
7. Sepehri M., Apel D.B., Adee S., Leveille P., Hall R.A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering Geology*. 2020;266:105457. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105457>
8. Lisjak A., Mahabadi O.K., He L., Tatone B.S. A., Kaifosh P., Haque S.A., Grasselli G. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing. *Computers and Geotechnics*. 2018;100:84–96. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.011>
9. Melnikov N.N., Kozyrev A.A., Reshetnyak S.P., Kasparyan E.V., Rybin V.V., Melik-Gaikazov I.V. et al. Conceptual basis for optimization of the final wall design for open pits on the Kola Peninsula. In: Melnikov N.N., Reshetnyak S.P. (eds) *Mining in the Arctic: Proceedings of the 8th International Symposium, Apatity, June 20–23, 2005*. St. Petersburg: Tipografiya Ivan Fedorov; 2005, pp. 2–14. (In Russ.)
10. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines. *Eurasian Mining*. 2019;(2):23–26. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.05>
11. Batugin A.S. Areas of the boundary state of stresses in the Earth's crust as an environment for human-caused earthquakes. In: Selyutskaya O.V. (ed.) *Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction: 2nd All-Russian Scientific Conference with International Participation, II All-Russian Scientific Conference with International Participation, Moscow, September 29–30, 2021*. Moscow: Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics RAS; 2021, pp. 22–23. (In Russ.)
12. Kozyrev A.A., Kasparyan E.V., Rybin V.V., Reshetnyak S.P. Analysis of conditions for dynamic manifestations of rock pressure in the Kola Peninsula open-pit mines. In: Melnikov N.N. (ed.) *Technogenic seismicity in mining operations: source models, prediction, prevention: Proceedings of the International Workshop, Kirovsk, April 14–16, 2004*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2004. Part 1, pp. 89–94. (In Russ.)

Информация об авторах

Рыбин Вадим Вячеславович – доктор технических наук, доцент, руководитель лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: v.rybin@ksc.ru

Константинов Константин Николаевич – научный сотрудник лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация, e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Калюжный Антон Сергеевич – научный сотрудник лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Российская Федерация, e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.01.2023

Поступила после рецензирования: 01.02.2023

Принята к публикации: 04.02.2023

Information about the authors

Vadim V. Rybin – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief of Laboratory of Geomonitoring and Slope Stability, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: v.rybin@ksc.ru

Konstantin N. Konstantinov – Researcher, Laboratory of Geomonitoring and Slope Stability, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Anton S. Kalyuzhny – Researcher, Laboratory of Geomonitoring and Slope Stability, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kalyuzhny@ksc.ru

Article info

Received: 19.01.2023

Revised: 01.02.2023

Accepted: 04.02.2023