

УДК 622.273:65.011.12

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Оригинальная статья

Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений

В.И. Голик 

Московский политехнический университет, Россия, 107023,
г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Статья поступила: 05.02.2025, доработана: 04.03.2025, принята к публикации: 07.03.2025

Резюме: Рассмотрены условия применения сейсмобезопасных технологий при разработке рудных месторождений. Дана оценка сейсмического действия взрыва на подземные и поверхностные объекты инфраструктуры предприятия, обоснованы мероприятия по снижению сейсмического действия взрыва при разработке месторождений. **Актуальность исследований** определяется необходимостью повышения качества добываемых руд и ослабления вредного влияния производства на экологическую обстановку региона. **Цель исследований.** Совершенствование научных основ природоохранных и ресурсосберегающих технологий разработки рудных месторождений. **Методы исследований.** Данные о поведении массивов металлосодержащих пород исследованы известными статистическими методами. **Результаты исследований.** Показана важность учета сейсмического действия взрыва при использовании сейсмобезопасных технологий разработки месторождений для сохранения инфраструктуры предприятий. Обобщены сведения о допустимой скорости смещения для сооружений. Показано, что скорость смещения земной поверхности является функцией массы заряда ВВ. Детализирована стабилизирующая и ограничительная роль заполнения выработанного пространства твердеющими смесями, природными и наведенными напряжениями в управлении напряжениями, а также направленности фронта взрывной волны. Даны модели для расчета сейсмобезопасной массы заряда для объектов инфраструктуры и горных выработок. Даны рекомендации по управлению интенсивностью сейсмических колебаний под воздействием технологических факторов. Предложен критерий оценки опасности сейсмического действия взрыва в виде скорости смещения пород. Обобщены сведения о сейсмобезопасной массе заряда при взрыве его в скважине. Разработаны регламент и периодичность мониторинга состояния рудовмещающего массива и инфраструктуры над ним. Результаты исследования представляют интерес для разработки твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: рудные месторождения, породный массив, сейсмика, взрыв, мониторинг, геофизика.

Для цитирования: Голик В.И. Сейсмобезопасные технологии подземной разработки рудных месторождений. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(1): 56-64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Original paper

Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits

V.I. Golik 

Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya Str., Moscow 107023,
Russian Federation, e-mail: v.i.golik@mail.ru

Received: 05.02.2025, revised: 04.03.2025, accepted: 07.03.2025

Abstract: The conditions for the use of earthquake-safe technologies in the development of ore deposits are considered. An assessment of the seismic effect of the explosion on the underground and surface infrastructure facilities of the enterprise is given, and measures to reduce the seismic effect of the explosion during field development are substantiated. **The relevance** of the research is determined by the need to improve the quality of the extracted ores and reduce the harmful effects of production on the ecological situation of the region. **Aim.** Improvement of the scientific foundations of environmental protection and resource-saving technologies for the development of ore deposits. **Methods.** Data on the behavior of arrays of metal-bearing rocks have been studied by well-known statistical methods. **Results.** The importance of taking into account the seismic effect of an explosion when using earthquake-safe field development technologies to preserve its infrastructure is shown. Information about the permissible displacement velocity for structures has been provided. It is shown that the rate of displacement of the Earth's surface is a function of the mass of the explosive charge. The stabilizing and restrictive role of filling the developed space with hardening mixtures by natural and induced stresses in stress management, as well as the direction of the blast wave front, is detailed. Models for calculating the earthquake-safe charge mass for infrastructure facilities and mining operations are given. Recommendations on managing the intensity of seismic vibrations under the influence of technological factors are given. A criterion for assessing the danger of the seismic effect of an explosion in the form of a rock displacement rate is proposed. The information about the earthquake-safe mass of the charge during their explosion in wells is summarized. The regulations and frequency of monitoring the state of the ore-bearing massif and the infrastructure above it have been developed. The results of the study are of interest for the development of solid minerals.

Keywords: ore deposits, rock mass, seismic, explosion, monitoring, geophysics.

For citation: Golik V.I. Earthquake safe technologies of underground mining of ore deposits. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(1): 56-64. DOI: 10.46698/VNC.2025.55.34.005

Введение

Оптимизация проектов буровзрывных работ достигается за счет точности и надежности расчетов параметров взрыва, благодаря учету влияния участвующих факторов на результаты и безопасность работ и является перспективным резервом уменьшения негативного влияния на природную среду.

Научно-технические основы сейсмобезопасной технологии подземной разработки месторождений с учетом геодинамики массива сформулированы работами исследователей, в том числе [Ляшенко и др., 2006; Голик и др., 2019].

Характер и параметры влияния свойств массива на его сейсмическую активность исследованы в работах [Zaalishvili et al., 2016; Козырев и др., 2018; Козырев и др., 2021; Музаев и др., 2022; Заалишвили, Голик, 2024; Бурдзиева и др., 2024].

Распределение сейсмических событий в массиве горных пород и связь его с тектоническим строением при отработке удароопасных месторождений носит устойчивый характер [Котиков и др., 2020; Жукова и др., 2022].

Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении сейсмоопасных месторождений обеспечивается методами шахтной геофизики [Ляшенко, Кислый, 2015; Голик и др., 2023; Еременко и др., 2022; Январёв, Бобомуротов, 2024].

Результаты ретроспективного анализа показателей сейсмической опасности крупных сейсмических событий в подземных шахтах получены рядом ученых [Nordström et al., 2020; Wang et al., 2021; Chakraborty, Goswami, 2021].

Для безопасности горных объектов наибольшую опасность представляют вибрации породного массива при взрыве горных пород [McQuillan, Bar, 2023; Yin et al., 2021; Gonen, 2022; Разумов и др., 2022; Рукавишников и др., 2023; Фоменко и др., 2022; Беляков, Емельянов, 2023].

Материал и методы исследований

Обобщение, анализ, инженерное прогнозирование. Используются результаты ранее выполненных исследований и публикации ГФИ ВНИЦ РАН и других специализированных организаций и материалы автора. Используются методы корреляционного анализа и другие способы обработки информации.

Результаты исследований и их обсуждение

При разработке рудных месторождений, сложенных скальными породами относительные деформации в рудовмещающих породах должны подчиняться условию:

$$E_{\epsilon} \leq E_{\delta}.$$

где E_{δ} – допустимая деформация; E_{ϵ} – относительная деформация.
Скорость смещения пород при взрыве U_{ϵ} не должна превышать допустимую U_{δ} :

$$U_{\epsilon} \leq U_{\delta}$$

Параметры смещения пород и сооружений приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Допустимая скорость смещения для сооружений по классам /
Permissible displacement rate for structures by class

Наименование пород / The name of the breeds	Скорость продольных волн, м/с*10 ³ / Name Velocity of longitudinal waves, m/s*10 ³ rocks	Допустимая скорость смещения для сооружений, классы, см/с / Permissible displacement velocity for structures, classes, cm/s			
		1	2	3	4
Обломочные отложения / Block deposits	1–2	4.2	8.3	12.3	20.3
Скальные весьма трещиноватые/ The rocks are very fractured	3–4	9.6	19.2	28.4	47.7
Слабо трещиноватые / Slightly fractured	5–6	14.7	29.6	44.6	74.5
Монолитные без трещин /Monolithic without cracks	6–7	17.5	35.4	53.2	89.3

При производстве взрывов сейсмические сотрясения испытывают, и поверхностные, и подземные объекты. Скорость смещения земной поверхности является функцией массы заряда ВВ (Q):

$$U = 38,4 \left[\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right]^{1,12}, \text{ см/с.}$$

Стабилизирующую и ограничительную роль в управлении напряжениями играет феномен заполнения выработанного пространства твердеющими смесями (рис. 1).

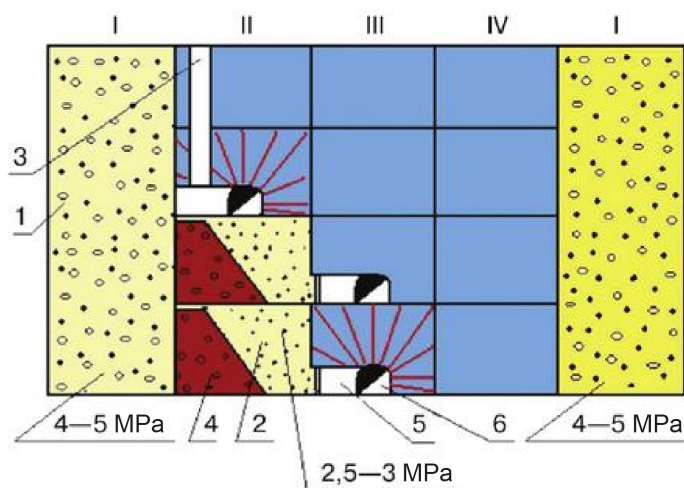


Рис. 1. Подэтажно-камерная система разработки с закладкой твердеющими смесями:
1 – прочность 4 МПа, 2 – прочность 3 МПа, 3 – отрезной восстающий, 4 – породный навал,
5 – погрузочный заезд, 6 – бурно-доставочный орт /

Fig. 1. A sub-floor-chamber development system with a foundation of hardening mixtures:
1 – strength of 4 MPa, 2 – strength of 3 MPa, 3 – cut-off rising, 4 – rock bulk, 5 – loading run,
6 – drilling and delivery ort

Этому же способствует и рациональная направленность фронта взрывной волны при образовании экранирующей щели (рис. 2).

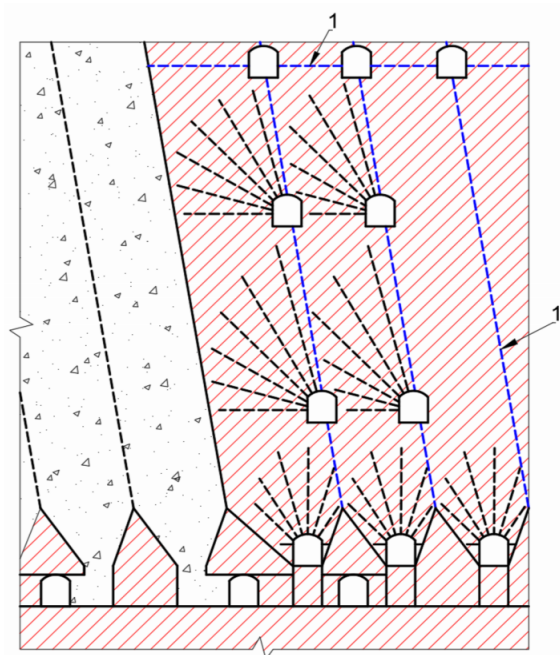


Рис. 2. Вариант системы разработки с наклоном стенок камер на закладочный массив:
1 – контурная экранирующая щель /

Fig. 2. Variant of the development system with chamber walls inclined to the backfill massif:
1 – contour shielding slot

Сейсмобезопасная масса заряда для объектов инфраструктуры:

$$Q = \left(\frac{U_d}{38,4} \right)^{2,68} \cdot R^3, \text{ кг.}$$

Сейсмобезопасная масса заряда для подземных сооружений:

$$Q = \left(\frac{U_d}{575} \right)^{1,44} \cdot R^3, \text{ кг.}$$

При расположении выработок параллельно вееру:

$$U = 575r^{2,08}, \text{ см / с}$$

При расположении выработок нормально к вееру:

$$U = 145r^{2,08}, \text{ см / с.}$$

Интенсивность сейсмических колебаний при прохождении взрывных волн через выработанное пространство уменьшается.

Изменение интенсивности сейсмических колебаний при взрывной отбойке происходит под воздействием технологических факторов, в том числе:

- в тылу взрыва заряда скорость возмущения массива в 1,5 раза больше, чем во флангах и в 2 раза, чем во фронтальной части;
- наличие отрезной щели снижает сейсмический эффект в 1,5 раза;
- при прохождении через выработанное пространство сейсмическое действие взрывной волны уменьшается в разы.

Критерием оценки опасности сейсмического действия взрыва является скорость смещения пород.

Уровень воздействия сейсмовзрывных колебаний устанавливается по скорости смещения U , которая формируется в среде при взрыве заряда Q на расстоянии r от сооружения (рис. 3).

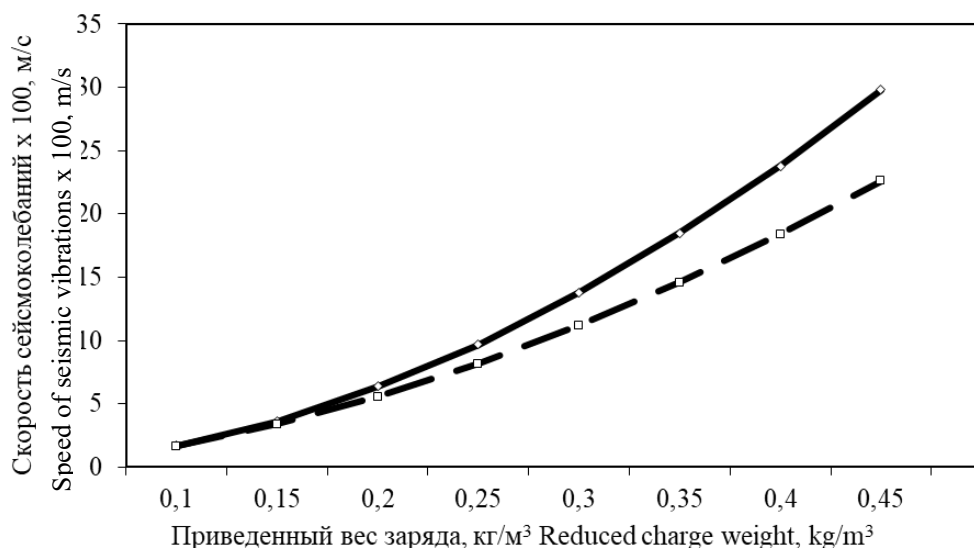


Рис. 3. Зависимость скорости сейсмоколебаний от приведенного веса заряда для условий:

1 – рудник 1; 2 – рудник 2 /

Fig. 3. Dependence of the seismic vibration velocity on the reduced charge weight for the conditions of:

1 – mine 1; 2 – mine 2

Интенсивность сейсмических колебаний во многом зависит от расположения охраняемых объектов относительно фронта взрывных работ, поэтому необходимо стремиться к удалению фронта горных работ от зданий и осуществлять мониторинг напряженно-деформированного состояния массива в основании зданий и сооружений (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Регламент и периодичность мониторинга /
Regulations and frequency of monitoring**

Регламент / Regulations	Содержание и задачи / Content and tasks	Мероприятия / Events	Периодичность / Periodicity
Диагностика пород / Breed diagnostics	Определение характера сдвижения пород, прогноз величин сдвижений и деформаций. Determination of the nature of rock displacement, prediction of the magnitude of displacements and deformations.	Оборудование подземных наблюдательных станций. / Equipment of underground observation stations.	Ежемесячно / Monthly
	Определение предельного состояния массива пород, профилактика критических деформаций. Determination of the limiting state of the rock mass, prevention of critical deformations.	Звукометрические и акустические наблюдения / Sonometric and acoustic observations	Ежемесячно / Monthly
	Контроль напряженно-деформированного состояния пород. Control of the stress-strain state of rocks.	Геофизические исследования / Geophysical research	Систематически / Systematically
Контроль состояния пород / Rock condition monitoring	Определение зон обрушения стенок выработок. Identification of areas of collapse of the walls of workings /	Визуальные наблюдения / Visual observations	Еженедельно / Weekly
	Уточнение формы отработок / Clarifying the form of workings	Инструментальные маршейдерские съемки / Instrumental surveying	При необходимости / If necessary
	Определение предельного состояния массивов пород и выработок / Determination of the limiting state of rock massifs and workings	Звукометрические наблюдения / Sonometric observations	Еженедельно / Weekly

Обеспечение безопасности горных работ во многом определяется эффективностью мер по снижению динамических форм проявления горного давления и методикой геофизического менеджмента горных работ.

Выводы

Сейсмовзрывные импульсы не должны превышать допустимые пределы: для зданий в хорошем состоянии – 3,0 см/с; в удовлетворительном – 2,0 см/с; в неудовлетворительном – 1,0 см/с.

При изменении фронта горных работ, введении в эксплуатацию новых блоков необходимо проведение контрольных замеров уровня сейсмозрывных сотрясений для уточнения условий распространения сейсмозрывных колебаний и корректирования существующих зависимостей определения сейсмобезопасной массы заряда и сейсмобезопасного интервала замедления с учетом горнотехнических условий производства горных работ.

Приведенные выше рекомендации могут быть использованы при выборе технологий выемки залежей руд с другим минералогическим составом.

Литература

1. Беляков Н.А., Емельянов И.А. Методика применения высокоточного массирования многокомпонентным датчиком одновременного преодоления. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2023. – № 1(69). – С. 31–38. DOI 10.21440/2307-2091-2023-1-31-38.
2. Бурдзиева О.Г., Ревазов М.О., Кортиев А.Л., Гогичев Р.Р. Влияние воздействия геодинамических процессов на геоэкологическую нагрузку горного региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014
3. Голик В.И., Бурдзиева О.Г. К концепции разработки месторождений Садонского рудного пояса. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014.
4. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З. Повышение безопасности подземной добычи руд учетом геодинамики массива. // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-8-36-42.
5. Заалишвили В.Б., Голик В.И. Геофизическое обеспечение горного производства. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d.
6. Жукова С.А., Журавлева О.Г., Онуприенко В.С., Стрешнев А.А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 7. – С. 5–17. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-7-0-5.
7. Козырев А.А., Батугин А.С., Жукова С.А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин. // Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06.
8. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83.
9. Котиков Д.А., Шабаров А.Н., Цирель С.В. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением. // Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.
10. Ляшенко В.И., Кислый П.А. Обоснование сейсмобезопасных параметров взрывов при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой. // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 2. – С. 84–93.
11. Ляшенко В.И., Савельев Ю.Я., Ткаченко А.А. Научно-технические основы сейсмобезопасной технологии подземной разработке урановых месторождений. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 6. – С. 107–111.
12. Музаев И.Д., Харебов К.С., Музаев Н.И. Математическое моделирование сдвиговых сейсмических колебаний массива состоящего из рекультивированного материала отложения горно-рудной промышленности (хвосты). // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 2. – С. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002.
13. Разумов Е.Е., Простов С.М., Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д. Алгоритмы обработки сейсмической информации. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 17–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.
14. Рукавишников Г.Д., Мулев С.Н., Гаврилов А.Г. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга GITS на Таштагольском железорудном месторождении. // Горная промышленность. – 2023. – № 1S. – С. 90–95.
15. Фоменко В.А., Соколов А.А., Лолаев А.Б., Аймбетова И.О. Некоторые результаты работ по оценке эманаций радона Унальского хвостохранилища. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. № 4(54). – С. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.
16. Январев Г.С., Бобомуротов Б.Б. Объемная цифровая модель тектонической струк-

туры глубоких горизонтов Урупского медно-колчеданного месторождения (Северный Кавказ). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 143–153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011.

17. Chakraborty A., Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability analysis using stability charts. // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2021. – Vol. 15. Issue 5. – pp. 642–649.

18. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. No. 1. – pp. 10–19. DOI: 10.1134/s1062739122010021.

19. Gonen A. Investigation of fault effect on blast induced vibration. // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12. – Issue 5. – Art. No. 2278.

20. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2023. – Vol. 123. No. 2. – pp. 63–69.

21. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). // Pure and Applied Geophysics. – 2020. – Vol. 177. – pp. 763–785.

22. Wang Y.-Q., Gong L.-J., An N.N., Peng X.-B., Wang W. et al. Field investigation of blasting-induced vibration in concrete linings during expansion of old highway tunnel. // Advances in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 2021. – Art. No. 8820544.

23. Yin T., Zhou C., Zheng C., Fu J., Guo Z. The vibration characteristics of ground of rock blasting in silt-rock strata. // Shock and Vibration. – 2021. – Vol. – 2021. – Art. No. 3318965.

24. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. // International Journal of GEOMATE. – 2016. – Vol. 10. No. 1. – pp. 1670–1674. DOI: 10.21660/2016.19.5312.

References

1. Belyakov N.A., Emelyanov I.A. Technique for assessing the stress state of a rock mass by a multicomponent displacement sensor using the overcoring method. News of the Ural State Mining University. 2023. No. 1. Issue 69. pp. 31–38. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-1-31-38. (In Russ.)

2. Burdzieva O.G., Revazov M.O., Kortiev A.L., Gogichev R.R. Influence of geodynamic processes on the geoecological load of mountain region. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 166–179. DOI: 10.46698/VNC.2024.50.44.014. (In Russ.)

3. Golik V.I., Burdzieva O.G. Geophysical monitoring of Sadon field development technology. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 180–192. DOI: 10.46698/VNC.2023.26.85.014. (In Russ.)

4. Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S., Streshnev A.A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny massif. Mining Information and Analytical Bulletin. 2022. No. 7. pp. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5. (In Russ.)

5. Zaalishvili V.B., Golik V.I. Geophysical support of mining production. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 85–98. DOI: 10.46698/t6803-6487-0430-d. (In Russ.)

6. Kozyrev A.A., Batugin A.S., Zhukova S.A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. Mining Journal. 2021. No. 1. pp. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06. (In Russ.)

7. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Panteleev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. Mining Information and Analytical Bulletin. 2018. No. 12. p. 74–83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83. (In Russ.)

8. Kotikov D.A., Shabarov A.N., Tsirel S.V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. Mining Journal. 2020. No. 1. pp. 28–32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05. (In Russ.)

9. Liashenko V.I., Kislyi P.A. Substantiation of seismic safety parameters of explosions in underground mining of the near-surface reserves of the field under urban development. *Minerals and Mining Engineering*. 2015. No. 2. pp. 84–93. (In Russ.)
10. Liashenko V.I., Savelyev Y.Ya., Tkachenko A.A. Scientific and technical foundations of seismic safe technology of underground development of uranium deposits. *Metallurgical and Mining Industry*. 2006. No. 6. pp. 107–111. (In Russ.)
11. Muzaev I.D., Harebov K.S., Muzaev N.I. Mathematical modeling of shear seismic vibrations of an array consisting of recultivated material deposits of the mining industry (tailings). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 2. pp. 19–33. DOI: 10.46698/VNC.2022.34.57.002. (In Russ.)
12. Razumov E.E., Prostov S.M., Mulev S.N., Rukavishnikov G.D. Seismic information processing algorithms. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022. No. 2. pp. 17–29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17. (In Russ.)
13. Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrilov A.G. Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit. *Russian Mining Industry*. 2023. No. 1S. pp. 90–95. (In Russ.)
14. Fomenko V.A., Sokolov A.A., Lolaev A.B., Aimbetova I.O. Some results of the work on the evaluation of radon emanations at Unal tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022. Vol. 14. No. 4. Issue 54. pp. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585. (In Russ.)
15. Yanvarev G.S., Bobomurotov B.B. A volumetric digital model of the tectonic structure of the deep horizons of the Urup copper-pyrite deposit (North Caucasus). *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 143–153. DOI: 10.46698/VNC.2024.76.38.011. (In Russ.)
16. Chakraborty A., Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability analysis using stability charts. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2021. Vol. 15. Issue 5. pp. 642–649.
17. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58. No. 1. pp. 10–19. DOI: 10.1134/s1062739122010021.
18. Gonen A. Investigation of fault effect on blast induced vibration. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 5. Art. No. 2278.
19. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023. Vol. 123. No. 2. pp. 63–69.
20. Nordström E., Dineva S., Nordlund E. Back analysis of short-term seismic hazard indicators of larger seismic events in deep underground mines (LKAB, Kiirunavaara Mine, Sweden). *Pure and Applied Geophysics*. 2020. Vol. 177. pp. 763–785.
21. Wang Y.-Q., Gong L.-J., An N.N., Peng X.-B., Wang W. et al. Field investigation of blasting-induced vibration in concrete linings during expansion of old highway tunnel. *Advances in Civil Engineering*. 2021. Vol. 2021. Art. No. 8820544.
22. Yin T., Zhou C., Zheng C., Fu J., Guo Z. The vibration characteristics of ground of rock blasting in silt-rock strata. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021. Art. No. 3318965.
23. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Kanukov A.S., Dzeranov B.V., Shepelev V.D. Application of microseismic and calculational techniques in engineering-geological zonation. *International Journal of GEOMATE*. 2016. Vol. 10. No. 1. pp. 1670–1674. DOI: 10.21660/2016.19.5312.