УДК 622.274.4: 622.34 DOI: 10.21440/0536-1028-2025-3-27-33

Принципы совершенствования технологии подземной разработки рудных месторождений

Заалишвили В. Б.[1]*, Выскребенец А. С.[2], Мулухов К. К.[2], Старцев В. А.[3], Бойков И. С.[3]

[1] Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН (филиал), г. Владикавказ, Россия

[2] Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Россия

[3] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: vzaal@mail.ru

Реферат

Актуальность. *Приведена характеристика сложноструктурных рудных месторождений и обозначена концепция зависимости механо-структурных характеристик рудовмещающих пород от глубины добычных работ. Показано, что технологии управления геомеханическим состоянием рудовмещающих массивов не всегда в полной мере учитывают важность регулирования напряжений в ходе выемки руд при разработке подземным способом.*

Методика исследований *включает наблюдения, обобщение передового опыта, физическое и математическое моделирование, натурные и лабораторные исследования, организацию и постановку экспериментов, а также анализ результатов.*

Результаты исследований*. Обозначена роль природных и наведенных технологических напряжений в поведении рудовмещающих горных массивов. Показано, что устойчивость горных выработок и земной поверхности над ними определяется напряженностью пород в зонах влияния выработок различного назначения. Приведена модель рудовмещающего массива как дискретной среды, жесткость которой изменяется в широких пределах в зависимости от перераспределения действующих природных и техногенных напряжений. Обоснована возможность минимизации затрат труда и материалов на погашение выработанного пространства. Приведены примеры активации компонентов смеси в дезинтеграторе, модель оценки эффективности технологий. Показано, что породные конструкции из заклинившихся пород позволяют снизить требования к прочности искусственных массивов. Дан прогноз, что оптимизация горных технологий приведет к созданию системы автоматизации проектирования и планирования горных работ и повышению безопасности окружающей среды. Сделан шаг к разработке принципов совершенствования технологии подземной разработки рудных месторождений сложной структуры.*

Область применения. *Материалы статьи могут быть востребованы при проектировании новых и модернизации действующих горных предприятий.*

Ключевые слова: *месторождение; руда; подземная разработка; недра; окружающая среда; зона влияния; зона напряжения.*

Введение. Сложноструктурные месторождения формируются скальными и полускальными минералами с развитием коры выветривания. При отработке таких месторождений напряженность с глубиной увеличивается и в большей степени зависит от механо-структурных характеристик вмещающих пород, чем от глубины. Существующие технологии управления геомеханическим состоянием рудовмещающих массивов не в полной мере учитывают возможность

сохранения рудовмещающих пород от разрушения с помощью регулирования напряжений путем увязки выемочных процессов во времени и пространстве и других факторов [1, 2].

Добыча минерального сырья сопряжена с решением проблемы минимизации ущерба, наносимого природе подземными работами. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений обобщены в трудах ряда авторов [3, 4]. Гарантом сохранности геосистемы и недр являются технологии разработки с закладкой выработанного пространства, доля участия которых в общем объеме добычи минерального сырья превышает 60 % [5–8]. Принципы ресурсо- и природосбережения при освоении месторождений полезных ископаемых сформулированы в трудах [9, 10], отдельные аспекты затронутой проблемы рассмотрены в трудах [11–15].

С увеличением глубины работ возрастает естественная напряженность разрабатываемых массивов, влияющих на свойства слагающих их пород. Ослабление пород увеличивает пригрузку искусственных массивов породами, что требует увеличения прочности закладки. Гипотеза об увеличении напряженности массивов с глубиной не всегда подтверждается практикой разработки месторождений.

Результаты разработки месторождений позволяют сформулировать зависимости между напряженностью массивов, свойствами слагающих их пород и эффективностью управления ими с сохранением земной поверхности. Технологии подземной разработки сложноструктурных месторождений совершенствуются на основе установления закономерностей поведения массивов, сбалансированности напряжений в природно-техногенной системе, оптимизации параметров технологий и элементов систем разработки.

Цель исследования – детализация направлений совершенствования технологии подземной разработки рудных месторождений сложной структуры.

Методика исследований – комплексное изучение и обоснование эффективных вариантов горнодобывающего производства, в том числе исследования и контрольные наблюдения, математическое и физическое моделирование, лабораторные исследования и натурные эксперименты, а также анализ результатов геомеханического мониторинга.

Результаты исследований. Особенности разработки сложноструктурных месторождений заключаются в контрастности распределения запасов металла в рудах, невыдержанности размещения руд в пространстве и наличии породных включений.

Исследуемые сложноструктурные месторождения сложены скальными и полускальными породами осадочно-вулканического и интрузивного происхождения с коэффициентом удароопасности до 96 %, прочностью 100–200 МПа. При разнообразии условий формирования горных массивов установлено следующее:

– вертикальная составляющая гравитационно-силового поля отличается от расчетной;

– главные нормальные горизонтальные напряжения превосходят вертикальную составляющую;

– диапазоны изменений абсолютных величин напряжений в нетронутом массиве на глубине 100 и 500 м от поверхности (вертикальные – 32–50 МПа, горизонтальные – 1–46 МПа).

Горизонтальные сжимающие напряжения являются направляющими плоскостями для движений земной коры, поэтому определение прочности искусственных массивов как функции глубины работ не точны. Так, при бурении скважины

коэффициент структурного ослабления пород на глубине 500–1000 м изменялся в пределах 0,076–0,060. Увеличение глубины залегания пород в диапазоне 500–1500 м изменяет коэффициент хрупкости пород в пределах 18–20, коэффициент крепости по М. М. Протодьяконову – 11–18.

Нормативная и фактическая прочность закладочных смесей различается в диапазоне 20–50 %. До 60 % выработанного пространства заполнено твердеющими закладочными смесями, прочность которых составляет 60–70 % от нормативной, но это не снижает устойчивости массивов и земной поверхности.

В процессе проходки вокруг выработок создаются зоны различных напряжений из заклинившихся пород, определяющие устойчивость выработки и земной поверхности над ней (рис. 1).

Напряжения и прочность искусственных массивов зависят от величины плоских пролетов выработок. Система представляет собой дискретную среду, жесткость которой изменяется в зависимости от перераспределения напряжений, вызванных потерей несущей способности пород. Оптимизация параметров технологии осуществляется на основе перевода геоматериалов в режим объемного сжатия, минимизирующего отрицательное влияние на окружающую среду.

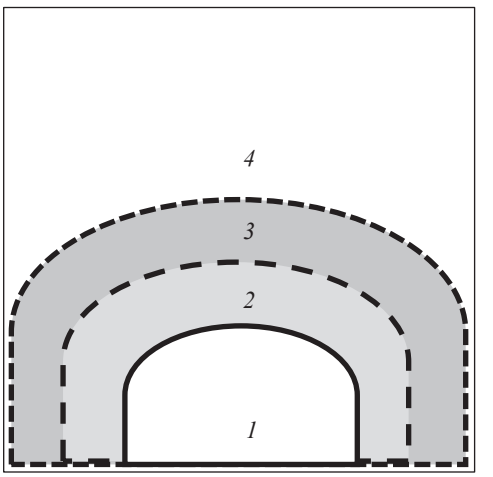

Рисунок 1. Зоны напряжений в окрестностях выработки: *1* – выработка; *2* – максимальные напряжения; *3* – минимальные напряжения; *4* – ненарушенные породы

Figure 1. Stress zones in the vicinity of the mine: *1* – mine working; *2* – maximum stresses; *3* – minimum stresses; *4* – undisturbed rocks

Разделение месторождений естественными и искусственными массивами позволяет применять технологии с изоляцией пустот перемычками при разработке пологих рудных тел и с заполнением выработанных пространств закладочной смесью прочностью до 1,2 МПа при разработке крутопадающих месторождений. Для приготовления такой закладочной смеси используются отходы производства и дешевые минеральные ресурсы.

Снижение потерь и разубоживания руды достигается путем бурения взрывных скважин на контакте с закладочным массивом; применения вариантов с подэтажной выемкой и твердеющей закладкой, гибких разделяющих перекрытий; укрепления вмещающих пород взрывоинъекцией и армирующими элементами.

На горных предприятиях применяли закладочную смесь, 1 м^3 которой состоит из 30–50 кг цемента марки М400, 190–220 кг доменного шлака, 1500 кг мелкого песка с содержанием глины до 30 % и 380 л шахтной воды. Средний расход цемента – 40 кг/м^3.

Шлаки активировали в дезинтеграторе ДУ-65 с переводом в активное состояние до 55 % и повышением прочности смеси на 10–40 % (рис. 2).

Бесцементные твердеющие закладочные смеси достигают прочности до 7,5 МПа при расходе компонентов на 1 м^3 смеси: песок – 1200 кг; шлаки металлургического завода – 400 кг; вода – 400–450 л. Оптимальная тонкость помола

шлака составляет 50–60 % частиц крупностью – 0,074 мм. Для снижения себестоимости в закладочную смесь добавляют горные породы. Состав 1 м^3 смеси: шлак – 200–300 кг; песок – 650–750 кг; порода дробленая – 750 кг; вода шахтная – 300–400 л. В качестве компонентов смеси используют хвосты кучного выщелачивания и хвосты гидрометаллургического передела, шахтные воды, золы и сточные воды ТЭЦ. Состав твердеющей смеси с использованием золы электрофильтров в расчете на 1 м^3: песок – 1200 кг, зола ТЭЦ – 200 кг, вода – 400–450 л.

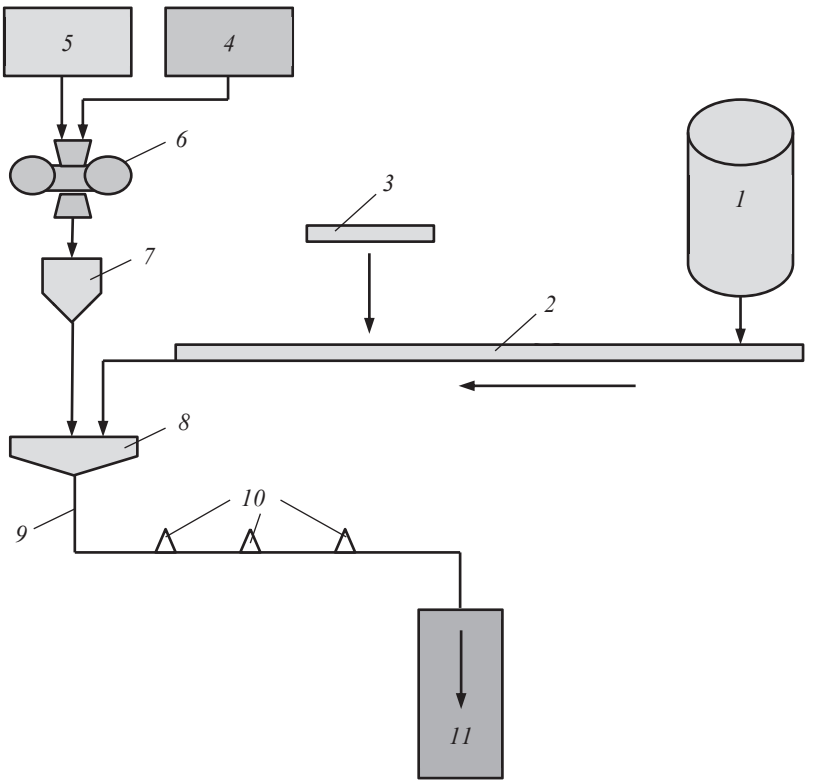

Рисунок 2. Схема комплексной активации твердеющих смесей: *1* − бункер цемента; *2* − конвейер; *3* – виброгрохот инертных заполнителей; *4* – активированная вода затворения; *5* – доменный шлак; *6* − дезинтегратор; *7* − вибро-мельница; *8* − смеситель; *9* – закладочный трубопровод; *10* − вибраторы; *11* − камера блока

Figure 2. Scheme of complex activation of hardening mixtures: *1* − cement hopper; *2* − conveyor; *3* – vibrating screen of inert aggregates; *4* – blast furnace slag; *5* – activated mixing water; *6* − disintegrator; *7* − vibrating mill; *8* − mixer; *9* – filling-up pipeline; *10* − vibrators; *11* − block chamber

Эффективность горной технологии определяется сравнением вариантов разработки с учетом затрат на всех переделах:

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n} \left[\left(Ц_{др} - С_{др} \pm \left(У + З_{н} \right) \right] \right. \frac{1}{1+E^{t-1}} \cong \max,$$

где $Ц_{др}$ – суммарная извлекаемая ценность конечной продукции из металлосодержащих руд, ден. ед.; $С_{др}$ – суммарные затраты на добычу и получение конечной продукции, ден. ед.; У – суммарный ущерб, наносимый (–) окружающей среде

или предотвращаемый (+) с учетом затрат на защиту населения, проживающего в зоне влияния горных предприятий $З_н$, ден. ед.; E – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени *t* применения оцениваемой технологии, доли ед.

Заключение. Возникающие естественным путем в массивах породные конструкции позволяют снизить требования к прочности искусственных массивов при соблюдении граничных условий.

В современном производстве усиливаются тенденции ужесточения требований к охране окружающей среды и недр, сокращению расхода компонентов твердеющей закладочной смеси, что повышает актуальность использования высвобождающейся при их разрушении потенциальной энергии, а также активации компонентов смеси на стадиях приготовления и транспортирования в выработанные пространства.

Совершенствование методических основ оптимизации горной технологии может привести к созданию системы автоматизации проектирования и планирования горных работ и повышению безопасности окружающей среды в горнодобывающем регионе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жабко А. В. Энергия сейсмических событий и критерии склонности горных пород к динамическому разрушению // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2024. № 2. С. 51–66. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66

2. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma, Xiaolin Yang. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength // International journal of mining science and technology. 2019. Vol. 29. Iss. 4. P. 571–576.

3. Хоменко О. Е., Ляшенко В. И. Геоэнергетические основы подземной разработки рудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 8. С. 10–18.

4. Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. 2020. № 5(1). С. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-3

5. Ляшенко В. И. Повышение безопасности подземной разработки месторождений сложной структуры // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 1(99). С. 23–36.

6. Гуриев Г. Т., Воробьев А. Е., Голик В. И. Человек и биосфера: устойчивое развитие. Владикавказ: Терек, 2001. 475 с.

7. Ляшенко В. И., Коваленко В. Н., Голик В. И., Габараев О. З. Бесцементная закладка на горных предприятиях. М.: ЦНИИЭИЦМ, 1992. 167 с.

8. Shenghua Yin, Yajian Shao, Aixiang Wu, Hongjiang Wang, Xiaohui Liu, Yong Wang. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China // Journal of cleaner production. 2020. Vol. 247. Art. 119590. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119590

9. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 3(49). С. 405–415.

10. 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 bock mechanics and geotechnical engineering. 2019. Vol. 11. No. 3. P. 549–561. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.010

11. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines // Journal of rock mechanics and geotechnical engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1036–1043. DOI:10.1016/j.jrmge.2019.07.005

12. Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 2(44). С. 283–290.

13. Клюев Р. В., Босиков И. И., Егорова Е. В., Гаврина О. А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с использованием математических моделей // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 3(45). С. 418–427.

14. Qinghua Lei, Ke Gao. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks // International journal of rock mechanics and mining sciences. 2019. Vol. 113. P. 121–133.

15. Валиев Н. Г., Беркович В. Х., Пропп В. Д., Боровиков Е. В. Практика совершенствования системы разработки горизонтальными слоями с гидрозакладкой при отработке крутопадающего жильного месторождения // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 171–182.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 года

Сведения об авторах:

Заалишвили Владислав Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель Геофизического института Владикавказского научного центра РАН (филиал). E-mail: vzaal@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0596-1148
Выскребенец Александр Степанович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин Северо-Кавказского горно-металлургического института. E-mail: sasha.viskrebenets51@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-1231-1537
Мулухов Казбек Казгериевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры деталей машин Северо-Кавказского горно-металлургического института. E-mail: skgmi-gtu.ru
Старцев Василий Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: starcev.1992@list.ru; https://orcid.org/0009-0008-7562-5191
Бойков Иван Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: i.boikov@bk.ru; https://orcid.org/0009-0002-7928-6840

DOI: 10.21440/0536-1028-2025-3-27-33

Principles for improving the technology of mining ore deposits by the underground method

Vladislav B. Zaalishvili[1], Aleksandr S. Vyskrebenets[2], Kazbek K. Mulukhov[2], Vasilii A. Startsev[3], Ivan S. Boikov[3]
[1] Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of RAS (branch), Vladikavkaz, Russia.
[2] North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
[3] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research relevance. *The article provides the characteristic of complex-structured ore deposits and outlines the concept of dependence between the mechanical and structural characteristics of ore-bearing rocks and the depth of mining. It has been shown that technologies for controlling the geomechanical state of ore-bearing masses do not always fully take into account the importance of stress regulation when mining ore by the underground method.*

Methods of research *include observations, generalization of best practices, physical and mathematical modeling, field and laboratory studies, organization and staging of experiments, as well as analysis of results.*

Research results. *The role of natural and induced technological stresses in the ore-bearing masses behavior is indicated. It is shown that the stability of mine workings and the earth's surface above them is determined by the stress level of rocks in the zones of influence of various mine workings. A model of an ore-bearing mass as a discrete medium is presented. The rigidity of the medium varies over a wide range depending on the redistribution of existing natural and mining-induced stresses. The possibility of minimizing labor and material costs for goaf recovery is justified. Examples of mixture components activation in a disintegrator are provided. A model for evaluating the effectiveness of technologies is presented. It is shown that rock structures made of wedged rocks can reduce the requirements for the artificial masses strength. It is predicted that the optimization of mining technologies will lead to the creation of a system computer-aided mine design and planning and improve environmental safety. A step has been taken to develop the principles for improving the technology of mining complex-structured ore deposits by the underground method.*

Application of research results. *The research results may be in demand when designing new and modernizing existing mining enterprises.*

Keywords: *deposit; ore; underground mining; subsoil; environment; zone of influence; stress zone.*

REFERENCES

1. Zhabko A. V. Seismic events energy and criteria of rock tendency for dynamic fracture. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2024; 2: 51–66 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-51-66.

2. Jinglin Wen, Husheng Li, Fuxing Jiang, Zhengxing Yu, Haitao Ma et al. Rock burst risk evaluation based on equivalent surrounding rock strength. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2019; 29(4): 571–576.

3. Khomenko O. E., Liashenko V. I. Geoenergetic fundamentals of ore deposits underground mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2017; 8: 10–18. (In Russ.)

4. Lovchikov A. V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia).* 2020; 5(1): 30–38. (In Russ.) Available from: doi: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-3.

5. Lyashenko V. I. Improvement of safety of underground mining of deposits with complex structures. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use.* 2019; 1(99): 23–36. (In Russ.)

6. Guriev G. T., Vorobyov A. E., Golik V. I. *Man and the biosphere: sustainable development.* Vladikavkaz: Terek Publishing; 2001. (In Russ.)

7. Liashenko V. I., Kovalenko V. N., Golik V. I., Gabaraev O. Z. *Cement-free backfilling at mining enterprises.* Moscow: TsNIIEITsM Publishing; 1992. 167 p.

8. Shenghua Yin, Yajian Shao, Aixiang Wu, Hongjiang Wang, Xiaohui Liu, Yong Wang. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *Journal of cleaner production.* 2020; 247: 119590. Available from: doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119590

9. Rybak Ia., Khairutdinov M. M., Kongar-Siuriun Ch. B., Tiuliaeva Iu. S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2021; 13; 3(49): 405–415. (In Russ.)

10. 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 bock mechanics and geotechnical engineering.* 2019; 11(3): 549–561. Available from: doi: 10.1016/j.jrmge.2018.08.010

11. Simser B. P. Rock burst management in Canadian hard rock mines. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering.* 2019; 11(5): 1036–1043. Available from: doi:10.1016/j.jrmge.2019.07.005.

12. Kliuev R. V., Bosikov I. I., Maier A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2020; 2: 283–290. (In Russ.)

13. Kliuev R. V., Bosikov I. I., Egorova E. V., Gavrina O. A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2020; 12; 3(45): 418–427. (In Russ.)

14. Qinghua Lei, Ke Gao. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences.* 2019; 113: 121–133.

15. Valiev N. G., Berkovich V. Kh., Propp V. D., Borovikov E. V. Practice of improving the system of developing horizontal layers with waterproof when exploiting a low-resident residential deposit. *Izvestiia Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences.* 2020; 1: 171–182. (In Russ.)

Received 28 August 2024

Information about the authors:

Vladislav B. Zaalishvili – DSc (Physico-mathematical sciences), Professor, Chief Research Officer, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of RAS (branch). E-mail: vzaal@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-0596-1148

Aleksandr S. Vyskrebenets – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machinery, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: sasha.viskrebenets51@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-1231-1537

Kazbek K. Mulukhov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Machinery Parts, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). E-mail: skgmi-gtu.ru

Vasilii A. Startsev – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining, Ural State Mining University. E-mail: starcev.1992@list.ru; https://orcid.org/0009-0008-7562-5191

Ivan S. Boikov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining, Ural State Mining University. E-mail: i.boikov@bk.ru; https://orcid.org/0009-0002-7928-6840

Для цитирования: Заалишвили В. Б., Выскребенец А. С., Мулухов К. К., Старцев В. А., Бойков И. С. Принципы совершенствования технологии подземной разработки рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2025. № 3. С. 27–33. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-3-27-33

For citation: Zaalishvili V. B., Vyskrebenets A. S., Mulukhov K. K., Startsev V. A., Boikov I. S. Principles for improving the technology of mining ore deposits by the underground method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2025; 3: 27–33 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2025-3-27-33