

К управлению состоянием рудовмещающих массивов путем регулирования напряжений при подземной добыче руд

В.И. Голик✉

Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

Резюме: Техногенное вмешательство в недра при добыче полезных ископаемых сопровождается развитием действующих напряжений в рудовмещающих массивах. Недостаточный учет геомеханических условий разработки сопровождается высокими потерями и разубоживанием руд. Эколого-экономические показатели эксплуатации горных объектов могут быть улучшены при регулировании природных и техногенных напряжений с введением массивов в режим объемного сжатия. Теоретические и практические аспекты управления напряжениями в породном массиве детализируются полученными при исследованиях данными. Определение структурной ослабленности пород, установление закономерности распределения тектонических трещин и приуроченности к тектоническим структурам, формирование инженерно-геологической модели массива. Моделирование состояния массива выполнено на эквивалентных материалах по критерию геомеханической опасности. Прогнозирование геолого-структурных факторов разрушения объектов проведено на основе расчета деформаций массивов. Установлены закономерности поведения природных и искусственных массивов в зависимости от динамики перераспределения напряжений в скальном массиве. Уточнена математическая модель процессов потери прочности горных объектов под влиянием критических напряжений. Разработана методика оценки состояния окружающей среды как функция суммы природных и техногенных факторов. Обоснованы оптимизированные по фактору сопротивления перераспределению напряжений в массиве параметры упрочнения скальных массивов. Предложена методика расчета экологически корректных и экономически целесообразных параметров управления состоянием горных объектов и даны примеры ее реализации. Проблема обеспечения качества добываемого минерального сырья решается путем управления напряженностью массивов и может решаться на основе дальнейших исследований. Результаты исследования могут быть востребованы при подземной разработке твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: скальный массив, геомеханические процессы, объемное сжатие, природные напряжения, техногенные напряжения, горные объекты

Для цитирования: Голик В.И. К управлению состоянием рудовмещающих массивов путем регулирования напряжений при подземной добыче руд. *Горная промышленность*. 2025;(1):123–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-123-128>

On managing the state of ore-bearing massifs by controlling the stresses during underground mining of ores

V.I. Golik✉

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ v.i.golik@mail.ru

Abstract: Man-made intervention in the subsurface during mining is accompanied by the development of existing stresses in the ore-bearing rock masses. Insufficient consideration of geomechanical conditions of mining is accompanied by high losses and dilution of ores. Environmental and economic performance of mining facilities can be improved by controlling natural and man-made stresses through introducing the rock masses into the triaxial compression state. Details of the theoretical and practical aspects of stress management in the rock mass are provided by the data obtained in the research. Determination of the structural weakening of rocks, defining regularities in tectonic fracture distribution and confinement to tectonic structures, creation of the engineering-geological model of the rock mass. Modeling of the rock mass state was performed on the equivalent materials based on the geomechanical hazard criterion. Prediction of the geological and structural factors of facilities failure was made through calculation of the rock mass deformations. Regularities in behavior of natural and man-made rock masses have been identified depending on changes in the stress redistribution within the rock mass. A mathematical model has been refined that describes the strength loss processes in the rock structures under the impact of critical stresses. A methodology of environmental assessment as a function of the total of natural and man-made factors has been developed. The rock mass consolidation parameters that are optimized by the factor of resistance to the stress redistribution in the rock massif have been

justified. A method to calculate environmentally correct and economically feasible parameters for managing the state of mining facilities is proposed and examples of its implementation are provided. The task of assuring the quality of the mined mineral raw materials is addressed by controlling the stress state of the rock masses and can be solved based on further research. The results of the study can be relevant in the underground development of solid minerals.

Keywords: rock mass, geomechanical processes, triaxial compression, natural stresses, man-made stresses, mining facilities

For citation: Golik V.I. On managing the state of ore-bearing massifs by controlling the stresses during underground mining of ores. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-123-128>

Введение

Строительство и эксплуатация горных объектов осложняется геомеханическими явлениями, недостаточный учет которых снижает экономическую и экологическую эффективность их строительства и эксплуатации. Альтернативой существующему положению является конструирование системы разработки рудных тел с максимальным учетом геомеханических условий разработки и даже с использованием горного давления в своих целях. Реализация управленческих решений на геомеханической основе защищает массив от разрушения, повышает эффективность использования объектов, улучшает экологию региона, поэтому является актуальной научно-практической задачей.

Исследования проведены в условиях одного из старейших по времени промышленного освоения месторождений России – Садонского (рис. 1).



Рис. 1
Структура и литология Садонского рудного узла:
1 – граниты;
2 – порфириты;
3 – песчаники и сланцы;
4 – тектонические нарушения;
5 – рудные тела;
6 – полиметаллы без пирротина;
7 – полиметаллы с пирротинном;
8 – пирротин

Fig. 1
Structure and lithology of the Sadonsky ore node:
1 – granites;
2 – porphyrites;
3 – sandstones and shales;
4 – tectonic disturbances;
5 – ore bodies;
6 – polymetallic ores without pyrrhotite;
7 – polymetallic ores with pyrrhotite;
8 – pyrrhotite

Вопросы совершенствования технологий подземной добычи руд в сложноструктурных породных массивах отличаются особенностями, которые рассмотрены в публикациях [1; 2]. Актуальность исследований теоретических и практических аспектов устойчивости рудовмещающих пород повышается рядом причин, одной из которых является использование несущей способности разрушенных пород [3].

Эффективное управление состоянием выработанного

пространства при производстве горных работ при добыче твердых полезных ископаемых обеспечивается геолого-геофизическим мониторингом [4], целью которого является определение параметров опасных зон при разработке месторождений [5] и выявление закономерностей проявления критических напряжений и индуцированных землетрясений на участках с предельно напряженным состоянием земной коры [6].

Основной задачей исследований на затронутую тему является научно-обоснованный прогноз и инструментальное подтверждение комплексными методами процессов деформирования горных пород и оседания земной поверхности [7; 8]. Приоритетным и универсальным методом управления состоянием рудовмещающих массивов являются технологии с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями [9; 10]. В последнее время развиваются исследования эколого-экономической эффективности и возможности реализации способа погашения выработанного пространства хвостами подземного блокового выщелачивания [11; 12].

Цель исследования – повышение надежности горных объектов за счет управления напряжениями и деформациями во вмещающем их скальном массиве, которое реализуется уменьшением размеров зоны опасных напряжений и деформаций при строительстве объектов с введением массивов в режим объемного сжатия.

Методические положения

Измерениями элементов структурной ослабленности установлен характер распределения тектонических трещин и закономерность их приуроченности к тектоническим структурам, на основе чего сформирована инженерно-геологическая модель массива.

Анализ расстояний между макротрещинами позволил построить геолого-структурные проекции и оценить роль мелких и макротрещин. Анализ отобранных из скважин кернов дал возможность дифференцированно определить коэффициент структурного ослабления как функции нарушенности массива.

Свойства пород напряженно-деформированного массива определены моделированием состояния массива на эквивалентных материалах. В качестве критерия оценки использован коэффициент геомеханической опасности.

Прогноз геолого-структурных факторов разрушения объектов осуществляется на основе расчета деформаций земной поверхности.

Результаты

Слагающие месторождение породы представляет собой дискретную среду с весьма различающимися физико-механическими свойствами и структурой, предрасположенной к деформированию и разрушению.

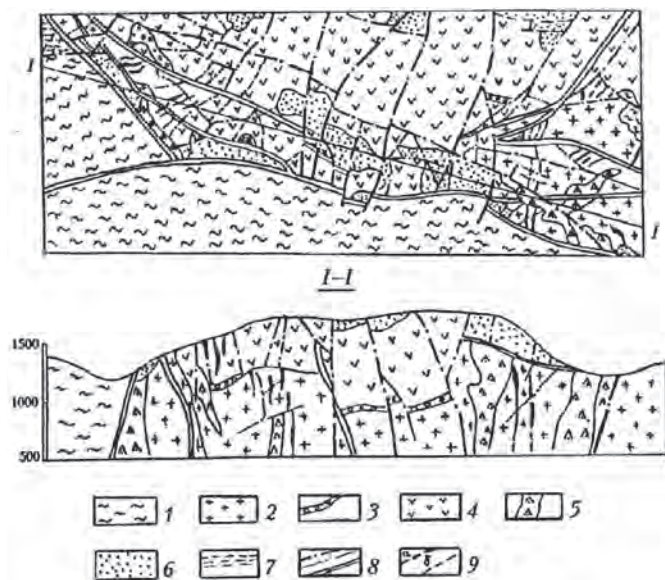


Рис. 2
Структура и литология месторождения Архон-Холстинское: 1 – сланцы; 2 – граниты; 3 – конгломераты; 4 – порфириты; 5 – дайки; 6 – песчаники; 7 – алевролиты; 8 – разломы; 9 – рудные тела

Fig. 2
Structure and lithology of the Archon-Kholstinskoye deposit: 1 – shales; 2 – granites; 3 – conglomerates; 4 – porphyrites; 5 – dikes; 6 – sandstones; 7 – siltstones; 8 – faults; 9 – ore bodies

Объект исследования – часть месторождения на отметках 1500...2500 м характеризуется приуроченностью к тектоническим структурам (рис. 2).

Вмещающие оруденение породы могут быть дифференцированы по величине структурных отдельностей (табл. 1).

Таблица 1
Районирование объектов

Исследуемые участки	Размер грани, м			Объем, м ³		
	Интервал	Средний	Вариация, %	Интервал	Средний	Вариация, %
Первый	0,4...1,8	0,8	18	0,6...2,8	1,4	11
Второй	0,3...1,2	0,5	13	0,4...1,8	0,8	11
Третий	0,4...1,9	0,6	15	0,5...2,6	1,25	8

Таблица 2
Размеры структурных блоков в элементах участков

Элементы	Высота, м		Объем, м ³	
	Интервал	Средняя	Интервал	Средний
Крайевые части разломов	0,4...4,0	1,8	1...19	6,8
Внутренние части разломов	0,3...2,8	1,5	0,9...15	4,2

Таблица 3
Инженерно-геологическая характеристика массивов

Участки	Породы	Физические параметры		
		Прочность при сжатии, МПа	Размер отдельностей, м	Коэффициент ослабления
Сопряжения разломов и зон их влияния	Метаморфизованные граниты, альбитофиры, сланцы, песчаники	80	0,3 x 0,5	0,30
Зоны влияния разломов	Брекчированные граниты, вулканогены, сланцы	70	0,5 x 0,8	0,45
Внутренние части участков	Граниты, пегматиты, аплиты	60	1,3 x 2,0	0,60

Наложением измеренных элементов на геолого-структурную карту установлена система нарушенности в границах тектонических участков (табл. 2).

На основе обследования и анализа геологической документации, построения геолого-структурных проекций и замеров трещин определены коэффициенты структурного ослабления. В результате совокупного анализа полученных результатов натуральных измерений сформирована инженерно-геологическая модель массива (табл. 3).

Наиболее ослаблены внутренние и краевые части зоны влияния разлома. Вне зон расщепления пород мощность развития макротрещин достигает 10 м. Коэффициент структурного ослабления для основной части массива составляет 0,03...0,9, а в зоне сгущения трещин он изменяется в пределах 0,4...0,6. Исследуемый массив представляет собой совокупность структурных отдельностей с независимым механизмом взаимодействия, что способствует развитию процессов деформирования при техногенном вмешательстве. Физико-механические свойства пород представлены в табл. 4. Породы характеризуются показателем удароопасности более 70% (табл. 5).

При моделировании поведения разнонарушенных массивов при техногенном вмешательстве модели различались мощностью разломов: в модели №1 мощность разлома составила 10 м, в модели №2 – 20 м, а в модели №3 – 30 м.

Моделированием установлено, что массив сложен хрупкими и крепкими породами, склонными к перераспределению напряжений в динамической форме, чему способствует тектоническая нарушенность.

Целью моделирования с отработкой трех серий моделей было установление особенностей поведения однородной среды и нарушенной разломом и трещинами.

Модель в масштабе 1:20000 имитирует породный массив

Table 1
Zoning of plots

Table 2
Dimensions of the structural blocks in the elements of the plots

Table 3
Engineering and geological characteristics of the rock masses

Таблица 4
Свойства пород

Породы	Коэффициент крепости	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, т/м³	Коэффициент структурного ослабления
Граниты	7...11	61...82	4,7...6,8	0,14...0,24	2,66	0,32...0,34
Покровные альбитофиры	6...9	71...112	6,1...7,3	0,26	2,67	0,42
Жильные альбитофиры	11...12	92...133	6,3...8,3	0,42	2,68	0,34...0,42
Среднезернистые граниты	15...16	91...122	5,7...7,2	0,37	2,72	0,52
Диоритовые порфириды	13...15	166...171	7,25...8,0	0,36	2,71	0,53...0,61
Кварцево-сульфидные жилы	11...14	92...153	6,4...7,6	0,24...0,36	3,2...3,4	0,56...0,64
Гранодиориты	13...15	121...205	5,4...6,5	0,44	2,76	0,55

Table 4
Properties of rocks

Таблица 5
Свойства пород

Плотность, кг/м³	Скорость продольной волны, м/с	Прочность на сжатие, МПа	Коэффициент удароопасности, %
Граниты			
2,78	5351	92,7	77,3
2,79	5765	111,3	89,6
2,80	5030	140,7	72,0
Альбитофиры покровные			
2,60	3970	77,3	76,1
2,65	3826	96,1	70,3
2,55	3861	67,2	75,7
Кварцево-сульфидные жилы			
2,74	4776	124,3	87,0
3,24	5464	131,4	97,0
3,75	4533	212,6	97,0

Table 5
Properties of rocks

Таблица 6
Напряжения в модели

Состояние массива	Напряжения, МПа			
	По оси X		По оси Y	
	Значение	Вариация	Значение	Вариация
Однородный	2,0	7	1,8	9
Нарушен трещинами	3,5	20	3,0	14
Нарушен разломом, в том числе:				
с заполнителем малой прочности	6,8	14	5,4	23
с заполнителем средней прочности	5,4	7	4,9	14
с заполнителем высокой прочности	5,1	15	3,9	15

Table 6
Stresses in the model

размерами: по простиранию 2500 м, по восстанию 500 м, мощность 10 м.

Свойства пород:

- объемный вес – 2,7 г/см³;
- предел прочности при сжатии 13 МПа, при растяжении 8 МПа;
- модуль сдвига 2,5*10⁻⁵ кг/см²;
- влажность 3–5%.

Объемный вес эпоксимала 1,2 г/см³, модуль упругости – 270 кг/см².

В качестве критерия оптимальности использован коэффициент геомеханической опасности, представляющий собой отношение максимальных напряжений к пределу прочности материала (табл. 6).

Для эксплуатации более безопасен однородный массив. Заполнение разлома малопрочным материалом увеличивает коэффициент опасности до максимального значения. Характеристика массивов в моделях представлена в табл. 7.

По условиям моделирования массив нарушен разломом I порядка и разломом II порядка, имитирующими крупные тектонические нарушения Садонского месторождения.

При отработке *сплошного* массива максимальное значение напряжений фиксируется в 0,3 м от камеры и умень-

Таблица 7
Геомеханическая характеристика породных массивов

Характеристика массива	Геомеханические параметры	
	Критические напряжения, МПа	Коэффициент опасности
Однородная структура	3,5	0,5
Разлом с малопрочным заполнителем	7,9	1,0
Разлом со среднепрочным заполнителем	6,5	0,8
Разлом с прочным заполнителем	5,8	0,7

Table 7
A geomechanical description of rock masses

шается до фоновой величины в нетронутом массиве. Величина напряжений не превышает 0,5 предела прочности пород на растяжение, поэтому отработка месторождения не разрушает массив и участок земной поверхности над ним.

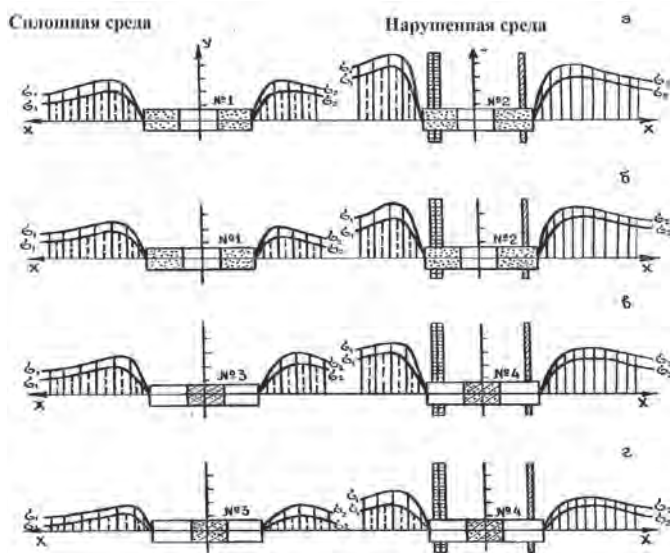


Рис. 3
Напряжения (максимум и минимум значений) в окрестностях выработки в разноразрушенной среде при различном состоянии выработанного пространства: а – без заполнения; б – с заполнением породой; в – с заполнением породой и твердеющими смесями; г – с заполнением твердеющими смесями; слева – в висячем боку, справа – в лежачем боку выработки

Fig. 3
Stresses (maximum and minimum values) in vicinity of a mine working in a heterogeneously disturbed environment with various states of the mined out space: а – without backfilling; б – with backfilling using rocks; в – with backfilling using rocks and hardening mixtures; г – with filling with hardening mixtures; left: in the hanging wall, right: in the footwall of the mine working

Отработка в *нарушенной* разломами среде увеличивает напряжения, которые на 20...30% превышают предел прочности пород, потому массив может разрушиться.

Твердеющие смеси прочностью до 1 МПа по сравнению с вариантом без заполнения выработанного пространства снижают напряжения в окрестностях выработки в 1,3...1,7 раз, что идентично варианту погашения с заполнением сухой закладкой с компрессией до 30%.

Прочная твердеющая смесь снижает уровень напряжений в 2 раза и более. Даже в зоне наибольшего ослабления у разлома I порядка напряжение не превышает 1/3 от базового (рис. 3).

Метод оценки геолого-структурных факторов разрушения горных объектов основан на определении деформаций и вычислении по ним показателя деформаций Δl :

$$\Delta l = l \sqrt{m_\varepsilon^2 \varepsilon^2 + m_k^2 H_3^2} / R^2,$$

где l – длина объекта по простиранию, м; m_ε – коэффициент горизонтальных деформаций; m_k – коэффициент кривизны фронта деформаций; ε – величина горизонтальной деформации; R – величина радиуса кривизны, м; H_3 – высота зоны влияния объекта, м.

При прогнозировании используется суммарная величина деформаций по длине объекта, определенная интегрированием расчетной функции.

При исследовании влияния положения объекта в зоне влияния тектоники на величину суммарных деформаций уточняется та часть показателя Δl , которая зависит от горизонтальных деформаций или величины суммарных горизонтальных деформаций Δl_ε .

Исследования проводились по направлениям:

Установление зависимости суммарных горизонтальных деформаций от положения объекта в зоне влияния тектоники при деформации ε_u в центральной части объекта ($\Delta l_\varepsilon = l \varepsilon_{u(z)}$) Определение зависимости суммарных горизонтальных деформаций основания от координаты z при том, что Δl_ε определяется как суммарное значение по длине объекта.

Для выявления названных зависимостей используется функция распределения горизонтальных деформаций – функция Гаусса, которая характеризует распределение сдвижений в зоне влияния тектоники. Для упрощения используется функция первой производной F' от функции Гаусса:

$$F' = \frac{-x \cdot e^{-x^2}}{\sqrt{2\pi}}$$

Характер распределения функции F' адекватен условию разрушения земной поверхности, а соответствующая длина полумульды L аппроксимируется в пределах изменения аргумента функции в пределах $-3,0 \dots +3,0$.

Полученные результаты указывают на зависимость величины показателя суммарных горизонтальных деформаций Δl от соотношения длин подрабатываемого участка месторождения и расчетной полумульды.

Суммарные горизонтальные деформации Δl_ε , рассчитанные на основе ε и путем интегрирования, различаются между собой на величину до 30%.

Методика исследования геолого-структурных факторов разрушения напряжений позволяет использовать механизм распределения напряжений для управления состоянием массива и избежать критических деформаций разрушения, являющихся реакцией массива на техногенное изменение его состояния.

Выводы

Техногенное вмешательство в недра активизирует развитие напряжений в породных массивах, недостаточный учет которых увеличивает потери и разубоживание руд.

Эколого-экономические показатели эксплуатации горных объектов улучшаются при регулировании природных и техногенных напряжений на основе данных исследований.

Поведение массивов закономерно зависит от динамики и механизма перераспределения напряжений и описывается математической моделью как функция суммы природных и техногенных факторов.

В зависимости от нарушенности и заполнения разломов величина напряжений изменяется в диапазоне 1,2...7,2 МПа, а величина коэффициента опасности $-0,5 \dots 1$.

Параметры деформаций земной поверхности определяются интегрированием расчетной функции с учетом геолого-структурных факторов.

Проблема обеспечения качества добываемого минерального сырья нуждается в постановке дальнейших исследований.

Список литературы / References

1. 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):36–42. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-8-36-42>
Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Safety improvement of the underground ore extraction considering mass geodynamics. *Occupational Safety in Industry*. 2019;(8):36–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-8-36-42>
2. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергетически нарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Friendly and resource-saving methods of underground ore mining in disturbed rock masses. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):104–118. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118>
3. 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>
4. Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
5. Айнбиндер И.И., Пацкевич П.Г., Красюкова Е.В. Обоснование параметров опасных зон при комбинированной разработке кимберлитовых месторождений Якутии. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;(3):48–60.
Aynbinder I.I., Patskevich P.G., Krasnyukova E.V. Substantiation of dangerous area parameters in the combined development of kimberlite deposits of Yakutia. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(3):48–60. (In Russ.)
6. Батугин А.С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках с предельно напряженным состоянием земной коры. *Горный журнал*. 2021;(1):22–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
Batugin A.S. General features of strong rock bursts and induced earthquakes in critical-stress areas of the Earth's crust. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):22–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
7. Buzylo V., Pavlychenko A., Borysovska O., Saveliev D. Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining. *E3S Web of Conferences*. 2019;123:01050. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301050>
8. Wojtecki Ł., Konieczek P., Mendecki M.J., Gołda I., Zuberek W.M. Geophysical evaluation of effectiveness of blasting for roof caving during longwall mining of coal seam. *Pure and Applied Geophysics*. 2020;177(2):905–917. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02321-1>
9. Yin S., Shao Y., Wu A., Wang H., Liu X., Wang Y. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;247:119590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119590>
10. Qi C., Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2019;144:106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
11. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental study of non-waste recycling tailings ferruginous quartzite. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(15):35410–35416. Available at: https://ripublication.com/ijaer10/ijaerv10n15_66.pdf (accessed: 30.11.2024).
12. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):406–415.
Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):406–415. (In Russ.)

Информация об авторе

Голик Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: vi.golik@mail.ru

Information about the author

Vladimir I. Golik – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Metallurgy of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: vi.golik@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.11.2024
Поступила после рецензирования: 09.01.2025
Принята к публикации: 11.01.2025

Article info

Received: 02.11.2024
Revised: 09.01.2025
Accepted: 11.01.2025