

УДК 622.765
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4838
Шифр специальности ВАК: 25.00.22
Научная статья

К феномену объемного сжатия закладочных смесей

В.И. Голик✉

Московский политехнический университет, Россия, г. Москва

✉v.i.golik@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* статьи объясняется необходимостью совершенствования способов регулирования уровня напряжений и деформаций рудовмещающих пород для целенаправленного использования высвобождающейся в ходе работ энергии при переводе закладочных массивов в режим объемного сжатия. *Цель исследования* состоит в разработке способов добычи руд, позволяющих регулировать уровень напряжений и деформаций для целенаправленного использования высвобождающейся в ходе работ энергии при переводе массивов в режим объемного сжатия. *Методика.* Цель достигается в результате анализа условий подземной разработки месторождений твердых полезных ископаемых и исследованием способов перевода искусственных массивов в условия объемного сжатия с использованием принятого арсенала способов и аппаратов для их реализации. *Результаты.* Приведены данные о способах перевода массивов в состояние объемного сжатия, в том числе: наклоне массива закладки на рудный массив, создании предохранительных массивов, упрочнении недостаточно устойчивых вмещающих пород анкерами и тросами, подаче твердеющей смеси на отбитую и магазинированную руду, отбойке руды на дискретную породную закладку, погашении выработанного пространства закладкой разнопрочными твердеющими смесями. Разработана типизация способов введения массивов в режим объемного сжатия. Показана необходимость обоснования технической возможности реализации и экономической целесообразности технологий подземного блокового выщелачивания металлов из руд. Получены закономерности поведения напряженно-деформированных массивов в условиях объемного сжатия. Разработано условие геомеханической сбалансированности системы руда-породы-искусственный массив при техногенном вмешательстве. Рекомендованы параметры технологий управления состоянием рудовмещающих массивов при вводе их в режим объемного сжатия. Перевод массивов закладки в условия объемного сжатия одним из рекомендованных способов комплексно решает основные задачи горного производства, в том числе экологической и технологической безопасности и технико-экономические.

Ключевые слова: напряжения, деформации, рудовмещающие породы, закладочный массив, объемное сжатие

Для цитирования: Голик В.И. К феномену объемного сжатия закладочных смесей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 179–185. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4838

UDC 622.765
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4838
Scientific paper

Phenomenon of volumetric compression of filling mixtures

V.I. Golik✉

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉v.i.golik@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to improve methods for regulating the level of stresses and deformations of ore-bearing rocks for the targeted use of energy released during work when transferring the laying arrays to the volumetric compression mode. *Aim.* To develop methods for mining ores that allow regulating the level of stresses and deformations for the targeted use of energy released during work when transferring arrays to the volumetric compression mode. *Methodology.* The goal is achieved as a result of analyzing the conditions of underground mining of solid mineral deposits and researching ways to convert artificial arrays into volumetric compression conditions using an accepted arsenal of methods and devices for their implementation. *Re-*

sults. The paper presents the data on methods of transferring arrays to a state of volumetric compression, including: tilting the laying array onto the ore massif, creating protective arrays, strengthening insufficiently stable enclosing rocks with anchors and cables, feeding a hardening mixture to beaten and mined ore, beating ore onto a discrete rock deposit, and extinguishing the depleted space by laying with various hardening mixtures. The author has developed the typification of the ways of introducing arrays into volume compression mode. The paper shows the necessity of substantiating the technical feasibility and economic feasibility of technologies for underground block leaching of metals from ores. The author obtained the patterns of behavior of stress-deformed arrays under conditions of volumetric compression and developed the condition for the geomechanical balance of the ore–rock–artificial massif system with man-made intervention. The parameters of technologies for controlling the state of ore-bearing arrays when they are put into volumetric compression mode are recommended. The transfer of bookmark arrays to volumetric compression conditions is one of the recommended methods that comprehensively solves the main tasks of mining, including environmental and technological safety, technical and economic.

Keywords: stresses, deformations, ore-bearing rocks, laying array, volumetric compression

For citation: Golik V.I. Phenomenon of volumetric compression of filling mixtures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 179–185. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4838

Введение

Важным и пока еще малоиспользуемым резервом управления состоянием массива остается перевод природных и искусственных массивов в состояние объемного сжатия.

Объемное сжатие происходит вследствие ограниченной возможности расширения. Поверхностные силы распределяются внутри пород в результате развития упругих деформаций. Поскольку порода не может двигаться вниз, возникает ограничение напряжения.

При равномерном всестороннем сжатии происходит только упругое изменение исследуемой породы без разрушения после снятия давления. Малопрочные, пористые породы при равномерном всестороннем сжатии деформируются до тех пор, пока возможно изменение их объема.

При всестороннем сжатии прочность горных пород увеличивается за счет объема минералов, входящих в их состав. В этом случае расстояние между зернами горной породы сокращается, что увеличивает прочность пород. В случае неравномерного всестороннего сжатия прочность горных пород значительно выше, чем при одноосном сжатии.

Основу технологий повышения объемного сжатия закладочных смесей при строительстве искусственных массивов составляют высокопроизводительные варианты этажно (подэтажно)-камерных систем разработки, основные принципы конструирования которых заключаются в следующем: сокращении сроков перехода закладочного массива из одноосного сжатия в режим объемного напряженного состояния; выемке руды сплошным фронтом с минимальным воздействием на массив технологическими процессами; отработке недостаточно-устойчивых участков без открытого выработанного пространства; дифференциации технологических решений с минимизацией затрат на закладочные работы.

Механизм работы твердеющих закладочных смесей в условиях объемного сжатия, использова-

ния потенциала природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергетически нарушенных массивах при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом рассмотрен в [1–3].

Результаты многофакторных экспериментов по управлению свойствами компонент, в том числе на основе отходов производства, и прогнозирование геомеханического состояния массива при использовании нетрадиционных методов управления приведены в работах [4–6].

Экономические аспекты диверсификации горных предприятий при конверсии на новые технологии, в том числе на основе утилизации горнопромышленных отходов, проработаны в статьях [7–9].

Новая концепция механизма горнотектонических ударов и других динамических явлений при разработке рудных месторождений, новые критерии предельного состояния горных пород и методология комплексного анализа технологий повышения устойчивого развития природно-технической системы даны в работах [10–12].

Методы решения пространственно-временных задач геоэкологии на основе междисциплинарного подхода, анализа уровней геомеханических рисков горнотехнических объектов [13, 14] и геоинформационных способов решения трехмерных геоэкологических задач [15–17], а также использования систем искусственного интеллекта в процедурах аудита современного горного производства рекомендованы в трудах [18–22].

Рассматриваемая проблема нашла освещение в трудах зарубежных специалистов горного профиля [23–27].

Методика исследования

Методика исследования включает в себя обзор литературных источников, анализ практики, расчет устойчивости несущих элементов породного массива, выявление механизма влияния закладки вы-

работанного пространства на устойчивость земной поверхности. Арсенал методов исследования включает в себя анализ, исследование, прогноз и конструирование технологий.

Результаты исследования

Наклон закладки на массив

Для оконтуривания камеры в рудной стенке и в кровле взрывают контурные скважины, служащие экраном, снижающим сейсмическое влияние взрывов. Экранирующая щель образуется опережающей отбойкой крайнего веера взрывных скважин и отсекает идущие от заряда в законтурный массив трещины, повышая устойчивость обнажений (рис. 1).

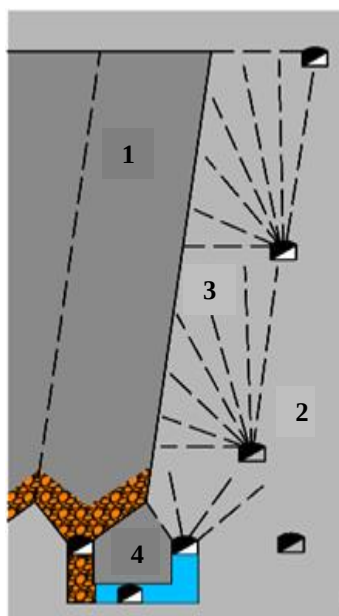


Рис. 1. Наклон рудной стенки на закладочный массив: 1 – закладочный массив; 2 – отбиваемая секция; 3 – взрывные скважины; 4 – выработки днища

Fig. 1. Ore wall slope on the laying array: 1 – laying array; 2 – chipped section; 3 – blast wells; 4 – bottom workings

Щель естественно заполняется разрыхленной породой шириной, демпфирующей колебания частиц в падающей волне взрыва.

Наклон скважин в веере обеспечивается в пределах 80° с соблюдением известного условия:

$$a = \frac{\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta}{cK_3 + 1},$$

где a – расстояние от вмещающих пород до скважины, м; β – угол наклона скважин; c – содержание металла в руде на контакте с породами, кг/т; α – угол наклона закладки на руду; K_3 – коэффициент эквивалентности.

Нормативная прочность твердеющей закладки может быть определена по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = \left(\frac{k_n k_\alpha \gamma_p L_\phi^2 d_1}{4 a_u d_2} + \gamma_s H_s \right) \frac{k_3}{100 k_\phi k_\sigma k_{\text{упр}}}$$

при $k_n=0,5$; $k_2=1$; $\gamma_p=2,75$ т/м³; $L_\phi=16$ м; $d_1=3$ м; $d_2=2$ м; $a_u=20$ м; $\gamma_s=2,0$ т/м³; $H_s=65$ м; $k_3=1,25$; $k_\phi=0,7$; $k_\sigma=0,65$; $k_{\text{упр}}=2,39$;

$$\sigma_{\text{сж}} = \left(\frac{0,5 \cdot 1 \cdot 2,75 \cdot 16^2 \cdot 3}{4 \cdot 20 \cdot 2} + 2 \cdot 65 \right) \times \frac{1,25}{100 \cdot 0,7 \cdot 0,65 \cdot 2,39} = 1,5 \text{ МПа}.$$

При отбойке камеры произошло незначительное обрушение стенок искусственного массива. Результаты отработки камер традиционным способом и с наклоном закладки на рудный массив представлены в табл. 1.

Таблица 1. Разубоживание руды закладкой

Table 1. Ore dilution by laying

Камеры Cameras	Размеры, м Dimensions, m		Угол наклона, град. Inclination angle, deg.		Разубоживание Dilution, %
	Высота Height	Длина Length	Расчетный Calculated	Фактический Actual	
1	65	16	77	83	2,3
2	65	15,6	79	81	2,2
3	65	16	77	80	2,15
4	65	15,2	76	79	1,8
5	65	16	78	81	2,4
6	45	18	90	90	5,1
7	52	8	90	90	6,4
8	59	15	90	90	5,9

Создание предохранительного массива

Предохранительный массив создается выемкой руды и закладкой камеры на контакте рудной залежи с вмещающими породами или отбойкой и закладкой нескольких малых камер.

Параметры предохранительного массива рассчитывают из условия нагружения защемленной плиты:

$$L_k = K \sqrt{\frac{g \alpha^2}{2 \sigma_p}}, \text{ м},$$

где K – коэффициент запаса; g – ускорение свободного падения, м/с²; α – ширина камеры, м; σ_p – прочность закладки на разрыв, МПа.

Расчеты показывают, что толщина предохранительного массива должна быть не менее 6 м.

На участках пересечения контакта руды с вмещающими породами и тектоническим разломом расчет предохранительного массива производится из условия:

$$L_k = K \sqrt{\frac{0,333\gamma g \alpha^2 H \operatorname{tg}(90 - \beta) \operatorname{tg} \frac{90 - \rho}{2}}{2\sigma_p}}, \text{ м,}$$

где β – угол падения трещины в теле разлома, град.

В процессе создания предохранительного массива вблизи всячего крыла разлома неустойчивый массив в первую очередь укрепили штангами.

Упрочнение вмещающих пород

Стальные канаты диаметром 18–25 мм помещают в скважины и бетонируют затвердевающей цементной смесью (рис. 2). Их использование объясняется экономической целесообразностью утилизации отслуживших свой срок канатов.

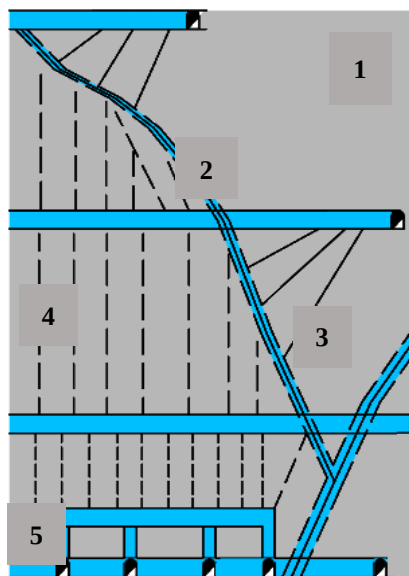


Рис. 2. Упрочнение пород анкерами: 1 – вмещающие породы; 2 – тектоническое нарушение; 3 – анкера; 4 – взрывные скважины; 5 – выработки днища

Fig. 2. Reinforcement of rocks with anchors: 1 – host rocks; 2 – tectonic disturbance; 3 – anchors; 4 – blast wells; 5 – bottom workings

В результате укрепления разубоживание руды снизилось до 2–3 %.

Подача смесей на отбитую руду

В верхней части камеры вынимают руду и закладывают выработанное пространство твердеющей смесью. Затем извлекается руда нижней части камеры (рис. 3).

Эффективность улучшения качества отбитой руды определена прямыми измерениями по общепринятой методике. Потери руды составили 5–6 %. Разубоживание руды снижено до 10 %, в том числе материалом закладки 2–3 %.

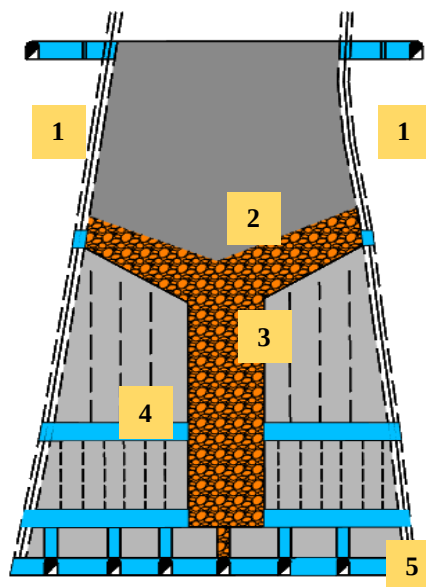


Рис. 3. Подача смеси на руду: 1 – тектонические нарушения; 2 – закладка; 3 – отбитая руда; 4 – взрывные скважины; 5 – выработки днища

Fig. 3. Mixture feed to the ore: 1 – tectonic disturbances; 2 – lay-in; 3 – beaten ore; 4 – blast wells; 5 – bottom workings

Магазинированная руда создает боковой подпор стенкам камер и условия для всестороннего сжатия закладки.

Отбойка руды на дискретную закладку

Запасы камеры вынимают без разделения на камеры и целики.

Отбитую в отрезной щели руду выпускают и отбивают запасы в подэтажах.

Отбитую руду из дучек выпускают, и закладывают выработанное пространство породой так, чтобы она располагалась под углом естественного откоса по отношению к запасам подэтажей.

Вариант позволяет использовать энергию взрыва на упрочнение дискретной закладки в режиме объемного сжатия.

Погашение разнопрочной закладкой

Погашение выработанного пространства камер, защищенных заклинившимися структурными блоками пород, смесями разной прочности из различных материалов:

- днища и потолочины – твердеющая смесь, $\sigma_{сж}=1,5\text{--}2$ МПа;
- верхняя часть камер – цементирование раздробленных пород, $\sigma_{сж}=0,8\text{--}1$ МПа;
- остальное – композитные составы, $\sigma_{сж}=0,2\text{--}0,8$ МПа.

Выработанное пространство образовано камерной системой с отбойкой руды из подэтажных выработок. После выпуска руды в основании камеры создали слой закладки высотой 10 м из твердеющей смеси с содержанием цемента 180 кг/м³.

Таблица 2. Способы перевода массивов в режим объемного сжатия

Table 2. Technologies for converting arrays to volumetric compression mode

Способ Way	Цель Goal	Эффективность Effectiveness	Условия применения Terms of use
Наклон закладки на массив Bookmark tilt on the array	Повышение качества руд Improving the quality of ores	Снижение разубоживания за- кладкой на 3–5 % Reducing the dilution by the bookmark by 3.5%	Крепкие породы, мощные заряды взрывчатых веществ Strong rocks, powerful explosive charges
Предохранительный массив Safety array	Упрочнение вмещающих пород Hardening of the host rocks	Снижение разубоживания и потерь Reduction of dilution and losses	Слабые вмещающие породы Weak host rocks
Упрочнение вмещающих пород Hardening of the host rocks	Сшивание пород анкерами Stitching of rocks with anchors	Снижение разубоживания руды на 2–3 % Ore dilution reduction by 2–3%	
Подача смесей на отбитую руды Feeding mixtures to the beaten ore	Создание бокового подпора рудой Creating a side support with ore	Снижение разубоживания руды на 5–10 % Ore dilution reduction by 5–10%	
Отбойка руды на дискретную закладку Ore mining for a discrete bookmark	Закладка камеры породой Camera bookmark with a rock	Уменьшение высоты блока Reducing the block height	
Погашение разнопрочной закладкой Repayment with a non-durable bookmark	Использование неактивных ресурсов Using inactive resources	Снижение затрат на погашение Reduction of repayment costs	Любые вмещающие породы Any host rocks

Вариант позволяет применять дифференциро-
ванные по прочности массивы: в местах наиболь-
ших напряжений прочные и менее прочные во
внутренних зонах закладочного массива.

Типизация способов введения в режим объемного сжатия

Способы введения искусственных массивов в
режим объемного сжатия обобщены в табл. 2.

Сравнительно новый способ управления состо-
янием массива с использованием хвостов подзем-
ного выщелачивания, которые по свойствам близ-
ки к малопрочным твердеющим смесям, находит-
ся в стадии внедрения и нуждается в проведении
исследований для обоснования технической воз-
можности реализации и экономической целесооб-
разности.

Выводы

1. Перевод массивов закладки в условия объемного сжатия одним из рекомендованных способов по-
вышает качество руд за счет предупреждения разу-
боживания руды материалом закладки на 3–10 %.
2. Перевод искусственных массивов в условия
объемного сжатия осуществим практически при
любой устойчивости рудовмещающих пород и
размерах выработанного пространства.
3. Эффективность рекомендуемой технологии состоит
в снижении потерь запасов, улучшении качества по-
лезных ископаемых, уменьшении объемов хвостов
обогащения со снижением нагрузки на окружаю-
щую среду в окрестностях горных предприятий.
4. Повышение управляемости природными и техноген-
ными массивами является реальным шагом в обеспе-
чении безопасности работников рудников и шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механизм работы твердеющих закладочных смесей / Г.О. Габараев, Е.Ю. Разоренова, В.П. Стась, П.П. Стась // Вектор
ГеоНаук. – 2020. – Т. 3. – № 4. – С. 8–20. DOI: 10.24411/2619-0761-2020-10038.
2. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной
добычи руд в энергетически напряженных массивах // Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5. – № 2. – С. 104–118. DOI:
10.17073/2500-0632-2020-2-104-118
3. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов,
Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Ю.С. Тюляева // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 3. – С. 405–415. DOI:
10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415
4. 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. – Vol. 10. – № 15. – P. 35410–35416.
5. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства /
В.Х. Дзапаров, Г.З. Харебов, В.П. Стась, П.П. Стась // Сухие строительные смеси. – 2020. – № 1. – С. 35–38.
6. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой / Я. Рыбак,
М.М. Хайрутдинов, Д.А. Кузиев, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Н.В. Бобырь // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. –
С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2
7. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region // *The
Social Sciences*. – 2015. – Vol. 10. – № 6. – P. 746–749.
8. Оценка коренных и техногенных месторождений PCO-Алания как возможных объектов применения технологии
подземного и кучного выщелачивания / К.К. Хулелидзе, Ю.И. Кондратьев, В.Б. Заалишвили, З.С. Бетров // Устойчивое
развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. – № 1. – С. 46–50. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51.

9. Комащенко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 23–30.
10. Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютин Н.С. Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. – 132 с.
11. Ловчиков А.В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5. – № 1. – С. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38
12. Modern technologies providing a full cycle of geo-resources development / C.B. Kongar-Syuryun, A.V. Aleksakhin, E.N. Eliseeva, A.V. Zhaglovskaya, R.V. Klyuev, D.A. Petrusevich // Resources. – 2023. – Vol. 12. – P. 50. DOI: 10.3390/resources12040050.
13. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем / Р.В. Ключев, Н.В. Мартюшев, В.В. Кукарцев, В.А. Кукарцев, В.С. Бригада // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 144–157. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144
14. Половов Б.Д., Валиев Н.Г., Кокарев К.В. Особенности имитационного анализа уровней геомеханических рисков горнотехнических объектов // Горный журнал. – 2016. – № 12. – С. 8–13. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.02.
15. Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов / П.А. Каунг, А.Е. Исаков, И.А. Панфилов, В.В. Тынченко, А.А. Ступина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 159–175. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.
16. Яицкая Н.А., Бригада В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 162–173. DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
17. Куликова Е.Ю., Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
18. Изыскание технологии подземной добычи полиметаллических руд для наращивания производственной мощности рудника / Н.Г. Валиев, В.Д. Пропп, В.Х. Беркович, Д.М. Шадрин, К.В. Барановский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 15–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_15.
19. Чотчаев Х.О., Бурдзиева О.Г., Заалишвили В.Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 81–94. DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.
20. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2016. – Vol. 37. – № 2. – P. 73–119.
21. Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development // Innovative Process Development in Metallurgical Industry / Ed. by V.I. Lakshmanan. – Switzerland: Springer International Publ., 2016. – P. 257–280. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.
22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050 // Geosciences. – 2012. – № 15. – P. 90–97.
23. Ground surface deformation in the hanging wall of the Jinshandian underground iron mine in China / Tianlong Wang, Congxin Chen, Kaizong Xia, Chuqiang Zhang, Yue Wang et al. // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Vol. 10. – 909466.
24. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses / J.C. Li, N.N. Li, S.B. Chai, H.B. Li // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2017. – Vol. 42. – № 1. – P. 95–109.
25. Gell E.M., Walley S.M., Braithwaite C.H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks // Rock Mechanics and rock Engineering. – 2019. – №3. – P. 1–13.
26. Investigation of mining-induced fault reactivation associated with sublevel caving in metal mines / Kaizong Xia, Congxin Chen, Tianlong Wang, Kuoyu Yang, Chuqiang Zhang // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2022. – Vol. 55. – P. 5953–5982.
27. Feasibility of broken ore flow simulation in block caving mining method using attribute stochastic medium theory / Bibo Dai, Xingdong Zhao, Zhonghua Zhu, Ganqiang Tao, Gui Yin // Minerals. – 2022. – Vol. 12. – Iss. 5. – 576.

Информация об авторах

Владимир Иванович Голик, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии Московского политехнического университета, Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, v.i.golik@mail.ru, orchid.org/0000-0002-1181-8452, mospolytech@mospolytech.ru

Поступила в редакцию: 25.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.11.2024

Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. Gabaraev G.O., Razorenova E.Y., Stas V.P., Stas P.P. Mechanism of work of hardening mixtures. *Vector of Geosciences*, 2020, vol. 3, no. 4, pp. 8–20. (In Russ.) DOI: 10.24411/2619-0761-2020-10038.
2. 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, vol. 5, no. 2, pp. 104–118. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-2-104-118.
3. Rybak Ya., Khairutdinov M., Kongar-Suryun Ch., Tyulyaeva Yu. Resource-saving technologies for the development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2021, vol. 13, no. 3 (49), pp. 405–415. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.

4. 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, vol. 10, no. 15, pp. 35410–35416.
5. Dzaparov V.Kh., Kharebov G.Z., Stas V.P., Stas P.P. Research of dry mixtures based on production waste for underground construction. *Dry building mixtures*, 2020, no. 1, pp. 35–38. (In Russ.)
6. Rybak J., Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Syuryun Ch.B., Babyr N.V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 61–70. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.2
7. Golik V.I., Khasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region. *The Social Sciences*, 2015, vol. 10, no. 6, pp. 746–749. (In Russ.)
8. Khulelidze K.K., Kondratyev Yu.I., Betzov Z.S., Zaalishvili V.B. Evaluation of original and technogenic deposits of the republic of north Ossetia-Alania as possible objects of application of underground and heap leaching technology. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 46–51. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-1-46-51
9. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of utilization of mining waste for the purpose of their processing. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 2015, no. 4, pp. 23–30. (In Russ.)
10. Norel B.K., Petrov Yu.V., Selyutina N.S. *Energy and time characteristics of the ultimate state of rocks*. St Petersburg, St Petersburg State University Publ., 2018. 132 p. (In Russ.)
11. Lovchikov A.V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Mining Science and Technology*. 2020, vol. 5, no. 1, pp. 30–38. (In Russ.) DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38
12. Kongar-Syuryun C.B., Aleksakhin A.V., Eliseeva E.N., Zhaglovskaya A.V., Klyuev R.V., Petrusevich D.A. Modern technologies providing a full cycle of geo-resources development. *Resources*, 2023, vol. 12, p. 50. DOI: 10.3390/resources12040050.
13. Klyuev R.V., Martyshev N.V., Kukartsev V.V., Kukartsev V.A., Brigida V. Analysis of geological information toward sustainable performance of geotechnical systems. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2024, no. 5, pp. 144–157. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_144.
14. Polovov B.D., Valiev N.G., Kokarev K.V. Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines. *Gornyi Zhurnal*, 2016, no. 12, pp. 8–13. (In Russ.) DOI: 10.17580/gzh.2016.12.02.
15. Kaung P.A., Isakov A.E., Panfilov I.A., Tynchenko V.V., Stupina A.A. Principles for forming environmentally safe and economically effective sustainable development of geo resources. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2024, no. 7-1, pp. 159–175. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.
16. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoeological problems. Spatial data interpolation. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 162–173. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.86.27.012.
17. Kulikova E.Yu., Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Comprehensive assessment of geoeological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
18. Valiev N.G., Propp V.D., Berkovich V.Kh., Shadrin D.M., Baranovsky K.V. Fining the technology for underground complex ore mining with a view to improving production capacity of a mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021, no. 11-1, pp. 15–26. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_15.
19. Chotchaev Kh.O., Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B. Zoning of high mountainous areas by geoeological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2021, vo. 11, no. 1, pp. 81–94. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC. 2021.15.66.007.
20. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
21. Parameswaran K. Sustainability considerations in innovative process development. *Innovative Process Development in Metallurgical Industry*. Ed. by V.I. Lakshmanan. Switzerland, Springer International Publ., 2016. pp. 257–280. DOI: 10.1007/978-3-319-21599-0_18.
22. Bloodworth A., Gunn G. The future of the global minerals and metals sector: issues and challenges out to 2050. *Geosciences*, 2012, no. 15, pp. 90–97.
23. Tianlong Wang, Congxin Chen, Kaizong Xia, Chuqiang Zhang, Yue Wang. Ground surface deformation in the hanging wall of the Jinshandian underground iron mine in China. *Frontiers in Earth Science*, 2022, vol. 10, pp. 909466.
24. Li J.C., Li N.N., Chai S.B., Li H.B. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2017, vol. 42, no. 1, pp. 95–109.
25. Gell E.M., Walley S.M., Braithwaite C.H. Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks. *Rock Mechanics and rock Engineering*, 2019, no. 3, pp. 1–13.
26. Kaizong Xia, Congxin Chen, Tianlong Wang, Kuoyu Yang, Chuqiang Zhang. Investigation of mining-induced fault reactivation associated with sublevel caving in metal mines. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, vol. 55, pp. 5953–5982.
27. Bibo Dai, Xingdong Zhao, Zhonghua Zhu, Ganqiang Tao, Gui Yin. Feasibility of broken ore flow simulation in block caving mining method using attribute stochastic medium theory. *Minerals*, 2022, vol. 12, Iss. 5, pp. 576.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr. Sc., Professor, Moscow Polytechnic University, 38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russian Federation, v.i.golik@mail.ru, <https://orchid.org/0000-0002-1181-8452>, mospolytech@mospolytech.ru

Received: 25.09.2024

Revised: 21.11.2024

Accepted: 14.07.2025