

К оценке геомеханических особенностей разработки месторождений твердых полезных ископаемых

В.И. Голик *Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация* v.i.golik@mail.ru

Резюме: Введение. В статье дан анализ влияния природных и техногенных факторов на состояние рудовмещающих массивов при разработке твердых полезных ископаемых подземным способом. Показано, что учет геодинамики массива является важным фактором эффективности функционирования горных предприятий, а уровень напряжений может корректироваться на этапах разработки месторождений. Среди актуальных методов управления производством минерального сырья приоритетом пользуется концепция геодинамического районирования месторождения в процессе разработки с совмещением функций пригружающего и несущего элементов массива в рамках геомеханической системы. Целью статьи является развитие концепции ресурсосберегающего геопользования при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом. **Методы.** Обобщение и анализ исследований, эксперименты, моделирование и инженерное прогнозирование с использованием методов математической статистики и информационных технологий. **Результаты.** Дан анализ критерии сохранности земной поверхности при горных работах как гаранта безопасности разработки месторождений. Показано, что горные выработки находятся в поле напряжений и перемещений, вызванных совокупным воздействием естественных и техногенных факторов. Определено, что породы при подработке образуют устойчивые системы из естественно заклинивающихся структурных отдельностей и такие системы можно создавать инженерными решениями: созданием искусственных массивов, разделением рудного поля на безопасные участки и др. Приведена типизация методов расчета устойчивых пролетов обнажений кровли горных выработок на время окончания погашения выработанного пространства. Отмечено, что хвосты блокового подземного выщелачивания руд за счет природных вяжущих веществ могут приобретать прочность до 1 МПа и участвовать в управлении горным давлением. Предложенный критерий надежности технологий погашения выработанного пространства оценивается соотношением объемов выемки руд и твердеющей закладки. Установлено, что перевод динамических явлений в статические осуществляется разгрузкой его от критических напряжений. **Выводы.** Учет геомеханического состояния участка земной коры участвует в решении задач горного производства: безопасность горных работ, качество добытой руды и экономические показатели.

Ключевые слова: полезные ископаемые, подземный способ, массив, выщелачивание золота, природные напряжения, техногенные напряжения, геомеханика

Для цитирования: Голик В.И. К оценке геомеханических особенностей разработки месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2025;(5):28–31. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-28-31>

On assessment of geomechanical features of mining solid minerals

V.I. Golik *Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation* v.i.golik@mail.ru

Abstract: *Introduction.* The paper analyzes the influence of natural and man-made factors on the state of ore-bearing rock masses during underground mining of solid minerals. It has been demonstrated that consideration of the rock mass geodynamics is an important factor in the efficient operation of mining companies, and that the stress level can be regulated during different stages of the deposit development. One of the priority methods to manage production of mineral resources is the concept of geodynamic zoning of the deposit during the mining phase with combined functions of the loading and bearing elements of the rock mass as part of the geomechanical system. The purpose of the article is to develop a concept of resource-saving geological management in underground mining of solid minerals. **Methods.** The methods applied included generalization and analysis of research, experiments, modeling and engineering forecasting using the methods of mathematical statistics and information technology. **Results.** The analysis of criteria are provided for the preservation of the land topography during mining operations, as a guarantee of safe development of the deposit. It is shown that mining operations are located within the field of stresses

and displacements caused by the combined effects of natural and man-made factors. It is determined that the rocks form stable systems made of naturally wedging structural units during the mining process, and that such systems can be created by engineering solutions, e.g. creating man-made rock masses, dividing the ore field into the safe areas, etc. Types have been identified of the methods to calculate stable spans of roof exposures in the mining workings during the time when stowing of the mined-out space is completed. It is noted that the strength of the tailings resulted from block underground ore leaching can reach up to 1 MPa due to presence of natural binders, and these tailings can be used in rock pressure management. The proposed criterion for the reliability of the mined-out space stowing technologies is controlled by the ratio of the extracted ore volumes and consolidating stowing. It is established that transformation of the dynamic phenomena within the rock mass into the static ones is carried out by unloading the rock mass below the critical stresses. *Conclusions.* Accounting of the geomechanical state of the earth's crust is involved in solving the mining tasks, including the safety of mining operations, the quality of the mined ore and other economic indicators.

Keywords: minerals, underground mining, rock mass, gold leaching, natural stresses, man-made stresses, geomechanics

For citation: Golik V.I., Titova A.V. On assessment of geomechanical features of mining solid minerals. *Russian Mining Industry*. 2025;(5):28–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5-28-31>

Введение

Состояние современного горного производства характеризуется поиском резервов увеличения объемов добычи минерального сырья, в том числе за счет использования отходов традиционного передела металлосодержащих руд [1–3].

Среди современных методов, методик и технических средств управления производством минерального сырья приоритетом пользуется концепция геодинамического районирования месторождения в процессе разработки и погашения выработанного пространства [4; 5].

Разработка месторождений подземным способом требует совмещения функций пригружающего и несущего элементов массива в рамках геомеханической системы. Протекающие в недрах геомеханические процессы действуют одновременно и требуют комплексных решений, наиболее характерными из которых являются установление закономерностей напряженно-деформированного состояния рудовмещающих массивов и выявление механизма влияния подземного выработанного пространства на земную поверхность [6–8].

Способы управления состоянием массивов, позволяющие при минимальных затратах обеспечить высокое качество и полноту извлечения руды из недр, нуждаются в совершенствовании и формируют в совокупности важную и актуальную проблему. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд связано с поведением рудных массивов при разработке месторождений. В ряде случаев безопасность подземной добычи руд определяется в первую очередь геодинамикой массива.

В качестве критерия безопасности технологии принято условие сохранности земной поверхности, определенное работами В. Риттера, М.М. Протодьяконова, П.М. Цимбаревича, А.А. Борисова и др.

В разрабатываемом массиве возникают породные конструкции, прочность которых и определяет уровень безопасности разработки месторождений. В результате действия силовых полей у разломов и очистных выработок формируются зоны активизации напряжений с разрушением пород. Горные выработки и технологические сооружения в них находятся в поле напряжений и перемещений, вызванных совокупным воздействием естественных и техногенных факторов.

Учет напряженности пород при погашении запасов второй очереди, выемке целиков и освоении новых технологий в период перехода к концепции обрушения пород и кrite-

рию устойчивости выработок в виде свободного пролета рекомендуется в качестве важного фактора управления напряжениями в природных и искусственных массивах [9; 10].

Исследованию изменчивости напряжений в гетерогенных трещиноватых породах и корректировке поведения массива заполнением выработанного пространства твердеющими смесями посвящены работы зарубежных специалистов данного направления горного дела [11; 12].

Целью исследования является детализация концепции природоохрannого и ресурсосберегающего геопользования при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом.

Методы

Для решения поставленных задач используют обобщение и анализ исследований, эксперименты, моделирование и инженерное прогнозирование с использованием методов математической статистики и информационных технологий.

Результаты

Слагающие массив породы при подработке могут образовывать устойчивые системы при условии естественного заклинивания структурных отдельностей между собой.

Несущая способность пород корректируется в процессе развития работ упрочнением пород, созданием искусственных массивов, разделением рудного поля на безопасные участки и другими инженерными мерами (рис. 1–3).

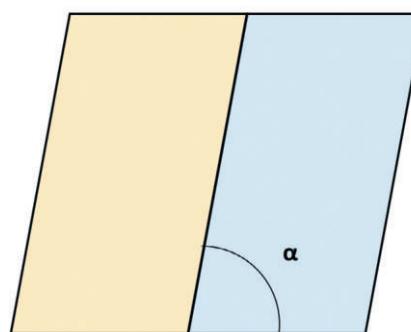


Рис. 1
Наклон закладочного массива
на руду

Fig. 1
Resting the stowing against
the ore mass

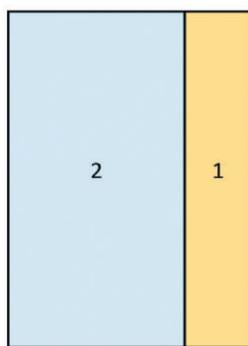


Рис. 2
Опережающая отработка с закладкой твердеющими смесями

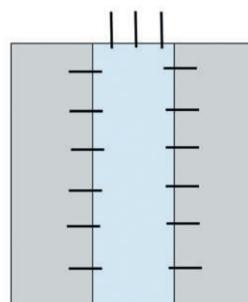


Рис. 3
Упрочнение рудовмещающих пород анкерами

При отделении пород от массива породы ведут себя как жесткие тела с упругим контактированием в режиме крупных деформаций. Условие прочности заклинивания системы описывается моделью:

$$\sigma_n \pm \sigma_m \leq \sigma_{cjk} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(x_1, dx_2, \dots dx_n),$$

где σ_n – природные напряжения, МПа; σ_t – техногенные напряжения, МПа; σ_{cjk} – предельные напряжения, МПа; L_{\max} – максимальный пролет плоской формы кровли, м; L_{\min} – минимальный пролет плоской формы кровли, м; $x_1 \dots x_n$ – свойства пород.

Напряжения заклинивания пород определяются силой распора:

$$\sigma_n \pm \sigma_m - \sigma_p \leq \sigma_{cjk} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(x_1, dx_2, \dots dx_n) = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f(dh),$$

где σ_p – напряжение распора пород над выработкой, м.

Методы расчета устойчивых пролетов обнажений кровли могут быть типизированы по типу массива (табл. 1).

Способы управления массивом погашением классифицируют по принципу состояния выработанного пространства на время окончания погашения.

Оставление выработанного пространства незаполненным менее затратно, но возможное обрушение налагающих пород и отчуждение земель от пользования ограничивает область применения способа.

Основным препятствием способа закладки твердеющими смесями является высокая стоимость закладочных материалов, достигающая 2/3 расходов на добычу руд.

Таблица 1
Типизация методов расчета устойчивых пролетов обнажений кровли

Table 1
Types of the methods to calculate stable spans of roof exposures

Тип массива	Несущий элемент	Гипотеза
Сплошной в гравитационном поле	Плита или сплошная балка	Своды: давления (Слесарев), обрушения (Протодьяконов) и др.
Сплошной с гравитационно-тектонически-структурным полем	Плита или балка с трещинами Столбы	
Дискретный с гравитационно-тектонически-структурным полем	Плита или балка Система столбов	Зоны: обрушения (Борисов), консоли (Кузнецков)
	Арка блочной структуры	Своды равновесия (Ветров)

Хвосты блокового подземного выщелачивания руд за счет природных вяжущих веществ могут приобретать прочность до 1 МПа.

Опасности технологий погашения выработанного пространства оцениваются по соотношениям объемов выемки руд и материала заполнения:

$$K = \frac{V_3}{V_o},$$

где V_3 – объем заполнения горных выработок, м³; V_o – объем горных выработок, м³.

Перевод динамических явлений в массиве в статические осуществляется разгрузкой его от напряжений. Наиболее безопасно строительство массивов из твердеющих смесей. Несущая способность закладочного материала при объемном сжатии повышается, по А.Л. Требукову, в 2–3,7, Д.М. Бронникову – в 2–3, М.Н. Цыгалову – в 3,5 раза.

Опыт управления состоянием рудовмещающего массива позволяет утверждать, что параметры добычных работ должны определяться с учетом геомеханического состояния участка земной коры (рис. 4).

Управление массивом путем регулирования природных и техногенных напряжений позволяет решать одновременно главные задачи горного производства: безопасность горных работ, качество добываемой руды и экономические показатели функционирования предприятия.

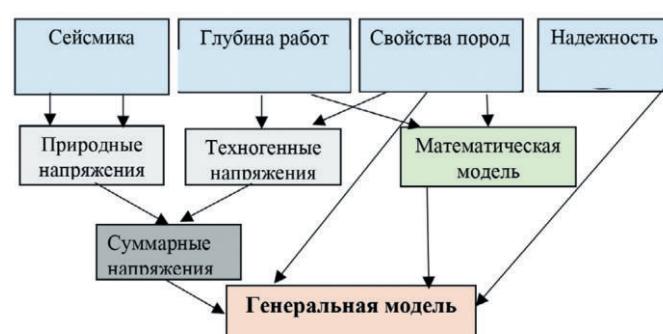


Рис. 4
Геомеханическая модель управления массивом

Fig. 4
A geomechanical model of the rock mass control

Выходы

1. Оптимальным способом управления геомеханикой массива является заполнение выработанного пространства твердеющими смесями с переводом твердеющих закладочных смесей в условия объемного сжатия с помощью инженерных методов.
2. В пределах свода естественного равновесия породы ведут себя как жесткие тела с упругим контактиро-

ванием в режиме хрупких и квазихрупких деформаций, но их несущая способность повышается за счет распора.

3. Перевод динамических явлений в массиве в статические, как и другие меры воздействия на массив, способствует решению приоритетных задач горного производства.

Список литературы / References

1. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Technology for nonwaste recovery of tailings of the Mizur mining and processing plant. *Metallurgist*. 2023;66(11-12):1476–1480. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01462-y>
2. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist*. 2023;67(1-2):96–103. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01493-5>
3. Brigida V.S., Golik V.I., R Klyuev.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023;67(3-4):398–408. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01526-z>
4. Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Урманов Д.И., Шакиров А.И. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022;(5):99–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>
Shevchuk R.V., Manovich A.I., Akmatov D. Zh., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):99–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>
5. Батугин А.С., Мороз Н.Е. История развития и перспективы дальнейшего применения метода геодинамического районирования. *Горная промышленность*. 2024;(3S):14–19. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>
Batuigin A.S., Moroz N.E. History of development and prospects for further application of the geodynamic zoning method. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):14–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-14-19>
6. 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;12(2):283–290.
Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020;12(2):283–290. (In Russ.)
7. 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):171–182. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-171-182>
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. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(1):171–182. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-171-182>
8. Абрамкин Н.И., Ефимов В.И., Мансуров П.А. Эмпирические методики оценки состояния массива горных пород. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2022;(2):68–76. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-2-68-76>
Abramkin N.I., Efimov V.I., Mansurov P.A. Empirical techniques for assessing rock mass condition. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal*. 2022;(2):68–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2022-2-68-76>
9. 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>
10. Pereira F.C., Lima T., Chaves S.S., Vilca Y.C., Canabrava L.P. Stability analysis of free span in excavations with diameter greater than 10 meters – Study case in the córrego do sítio mine. In: *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development – Full Papers : Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering. Ser. Proceedings in Earth and Geosciences*. London: CRC Press; 2020. Vol. 6, pp. 878–883.
11. Lei Q., Gao K. A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019;113:121–133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.001>
12. 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>

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: v.i.golik@mail.ru

Information about the author

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.05.2025
Поступила после рецензирования: 09.07.2025
Принята к публикации: 10.07.2025

Article info

Received: 29.05.2025
Revised: 09.07.2025
Accepted: 10.07.2025