

К корреляции качества руд и состояния природных и искусственных массивов

В.И. Голик¹✉, А.В. Титова²

¹ Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского, г. Москва, Российская Федерация

✉ vi.golik@mail.ru

Резюме: Статья посвящена актуальным вопросам управления состоянием рудовмещающих пород для улучшения эколого-экономических показателей предприятий горнодобывающих отраслей народного хозяйства. Обобщаются, систематизируются и анализируются способы управления состоянием массива, устанавливаются закономерные связи и корреляция между качеством руд, делается прогноз улучшения показателей функционирования предприятий и даются рекомендации по совершенствованию технологий добычи и переработки руд. Сформирована модель определения прибыли от улучшения качества руд и результаты вариантов ее реализации в системе Mapl с количественной характеристикой соотношения между затратами на управление массивом и стоимостью погашения выработанного пространства. Показано, что увеличение площади обнажений пород и продолжительности отработки очистных камер повышает разубоживание, выборочная выемка разнородных руд осложняет процесс погашения выработанного пространства и повышает затраты на материалы. Приведен алгоритм извлечения металлов из разнородных руд, разработана схема комбинирования традиционных и инновационных горных технологий и приведены сведения о результатах комбинирования. Предложена модель для определения эффективности комбинирования технологий с независимыми переменными. Даны графики зависимости переменных факторов добычи и переработки золотосодержащих руд. Сделан вывод, что величина затрат на управление состоянием рудовмещающего массива является важным фактором формирования экономических показателей предприятий, а выработанное пространство представляет собой трехмерное вероятностное распределение, для которого объем выработок и свойства пород являются взаимозависимыми факторами. Результаты исследования могут быть востребованы при модернизации технологий подземной разработки, а также при подготовке кадров высшей квалификации.

Ключевые слова: породный массив, корреляция, качество руд, технология добычи руды, математическая модель, извлечение металлов

Для цитирования: Голик В.И., Титова А.В. К корреляции качества руд и состояния природных и искусственных массивов. *Горная промышленность*. 2026;(3):137–141. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-137-141>

Regarding correlation between the ore grade and the state of natural and man-made rock masses

V.I. Golik¹✉, A.V. Titova²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

² Vernadsky State Geological Museum, Moscow, Russian Federation

✉ vi.golik@mail.ru

Abstract: The article discusses topical issues of managing the condition of ore-bearing rocks to improve the environmental and economic performance of mining operations in the national economy. Methods of managing the state of the rock mass are summarized, systematized and analyzed, natural relationships and correlations between the ore grades are established, a forecast for improving the performance of operations is made, and recommendations on improving ore mining and processing methods are given. A model to determine the benefits from improving the ore grades and the results of its implementation options in the Mapl system with quantitative characteristics of the ratio between the cost of managing the rock mass and the cost of filling the worked-out space is formed. It is shown that an increase in the area of exposed rock and duration of the stoping operation scales up dilution, selective mining of high-grade ores makes the process of backfilling the worked-out space and

raises the material costs. An algorithm is presented for extracting metals from ores of different grades, a scheme for combining traditional and innovative mining methods is developed, and information on the results of the combination is provided. A model with independent variables is proposed to determine the efficiency of combining the methods. Dependence diagrams of variable mining and processing factors for gold-bearing ores are given. It is concluded that the cost of managing the condition of the ore-bearing rock mass is an important factor in shaping the economic performance of operations, and the worked-out space is a three-dimensional probability distribution for which the volume of the mine workings and the rock properties are interdependent factors. The research results can be used in upgrading underground mining technologies, as well as in training of highly qualified personnel.

Keywords: rock mass, correlation, ore grade, ore mining method, mathematical model, metal extraction

For citation: Golik V.I., Titova A.V. Regarding correlation between the ore grade and the state of natural and man-made rock masses. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):137–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-137-141>

Введение

Прогресс природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в сложно структурных и энергонарушенных массивах, а также параметры и технологии геомониторинга недропользования в рамках программы развития минерально-сырьевого сектора основывается на результатах комплексного анализа применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы [1–3].

При разработке рудных месторождений полезных ископаемых часть металлов теряется на месте добычи руд или при их транспортировке, а другая часть – в хвостах переработки. Чаще всего причиной потерь и разубоживания руд является состояние рудовмещающего массива в процессе добычных работ.

Инструментом управления состоянием массива на всех этапах горного производства и тем самым повышения эколого-экономических показателей предприятий является заполнение выработанного пространства бетонами или породами с определенным компрессионными свойствами. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ, определяющая перспективы возрождения разработки некогда флагманов отраслей, осуществляется в том числе на основе технологического картирования и переоценки остаточных балансовых запасов. Расчет безопасных параметров очистных выработок производится чаще всего методом нелинейной механики сплошных сред с инженерными нюансами [4–6].

Установление корреляционных связей качества руд и поведения природных и искусственных массивов с обеспечением устойчивого функционирования горнотехнических систем позволяет применять новые технологии и технические средства упрочнения вмещающих пород, например, с использованием геоэнергии и комбинирования вариантов технологий разработки рудных месторождений [7–9].

Вопросы корреляции качества руд и состояния природных и искусственных массивов рассмотрены в ряде публикаций российских и зарубежных исследователей [10–12].

Материалы и методы

В рамках исследования экологически безопасных и экономически эффективных технологий добычи руд обобщаются, систематизируются и анализируются способы управления состоянием массива, их показатели, достоин-

ства и недостатки. Устанавливается корреляция показателей вариантов качества и управления состоянием массива и формируется модель решения проблемы. На основании полученных результатов даются рекомендации по совершенствованию технологий добычи и первичной переработке руд.

Результаты

Способы управления состоянием массива различаются состоянием: оно остается открытым или заполняется бетоном или дискретным материалом. Первый вариант характеризуется более высокими потерями и разубоживанием руды при меньших затратах на ее добычу, а второй удорожает стоимость добычи за счет повышенных затрат на материал заполнителей выработанного пространства.

При добыче ценных руд с заполнением выработанного пространства снижение ущерба от потерь и разубоживания руды компенсирует увеличение затрат на материалы погашения (табл. 1).

Таблица 1
Исходные данные для моделирования

Table 1
Input data for modelling

Факторы	Единицы	Значения		
		Минимум	Среднее	Максимум
Ценность руды	руб./т	50	75	100
Потери руды	руб/т, %	0,28	0,74	1,10
Переработка руд	руб/т	2,40	5,05	7,54
Производительность труда	руб/т, %	0,02	0,04	0,06

Модель определения результирующего показателя имеет вид:

$$P_{\delta} = Ц - \frac{1 - П}{1 - R} Z - Y - \frac{1 - П}{1 - R} RY$$

где P_{δ} – прибыль, руб./т; $Ц$ – цена руды, руб./т; Z – затраты на погашение выработанного пространства, руб./т; $П$ – потери, %; R – разубоживание, %; Y – ущерб 1% от потерь руды, руб./т.

Таблица 2
Показатели вариантов расчёта
прибыли

Table 2
Indicators for profit calculation
options

Показатели	Без закладки	Доля смесей, %		
		50	75	100
Эксплуатационные затраты	5,9	7,4	7,6	7,5
Потери руды	5,7	1,9	1,6	1,5
Разубоживание руды	0,7	0,2	0,2	0,1
Затраты с учетом качества руды	12,5	9,3	9,2	9,3

Показатели вариантов при одинаковой ценности руды 75,6 руб./т (цены 1990 г.) приведены в табл. 2. Эффективность заполнения выработанного пространства бетоном представлена рис. 1.

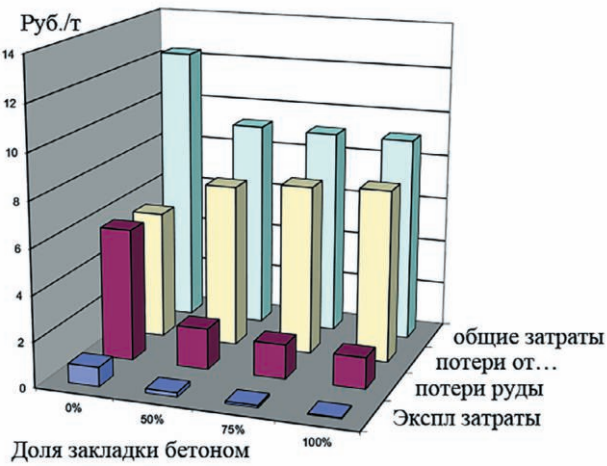


Рис. 1
Показатели технологии
с закладкой

Fig. 1
Indicators of the backfilling
technology

Качество руд и полнота извлечения запасов зависит от состояния выработанного пространства. Увеличение площади обнажений пород и продолжительности отработки очистных камер повышает разубоживание в 1,3...1,8 раз. Выборочная выемка разнородных руд усложняет процесс погашения выработанного пространства и повышает затраты на материалы. Этапы разработки месторождения и ценности в рамках единой системы представлены на рис. 2.

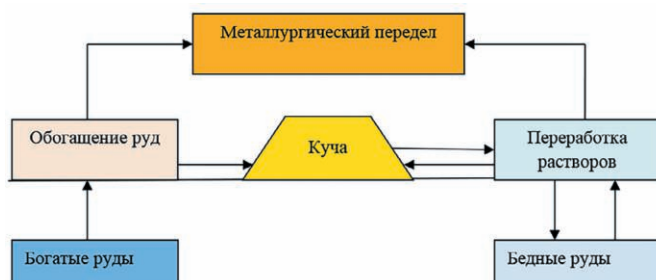


Рис. 2
Схема извлечения металлов
из разнородных руд

Fig. 2.
A block diagram of metal
extraction of from ores of
different grades

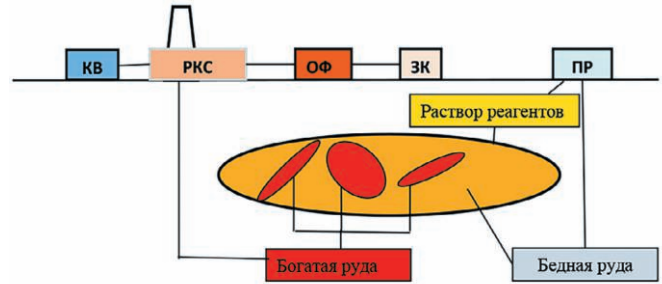


Рис. 3
Разработка месторождения
разнородных руд:
KB – выщелачивание;
РКС – сортировка;
ОФ – обогащение;
ЗК – закладочный комплекс;
ПР – приготовление реагентов

Fig. 3
Development of a deposit
with ores of different grades:
KB – leaching;
РКС – sorting;
ОФ – processing;
ЗК – backfilling complex;
ПР – preparation of reactants

Эффективность разработки месторождений повышается при комбинировании технологий добычи разнородных руд (рис. 3). Эффективность комбинирования технологий определяется сопоставлением показателей управления состоянием рудовмещающих массивов при сохранении прочих условий. Графики стоимости добычи и переработки руд представлены на рис. 4.

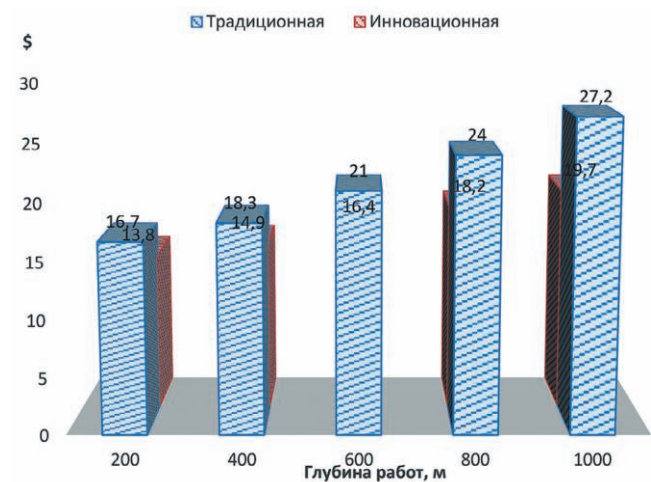


Рис. 4
Себестоимость руды
в зависимости от глубины
работ, \$/т

Fig. 4
Cost of ore production
depending on the depth
of mining operations, \$/t

Эффективность комбинирования технологий с независимыми переменными в безразмерном масштабе:

$$W = -0.365 \cdot X_1 + 68288.391 \cdot X_2 + 0.437 \cdot X_3 + 2215.482 \cdot X_4,$$

где W – прибыль, руб.; X_1 – горная масса, т; X_2 – металлы в руде, доли ед.; X_3 – извлечение металлов из руды, доли ед.; X_4 – рудничная себестоимость, руб/т.

Рассчитанные методом наименьших квадратов параметры регрессионной модели количественно характеризуются данными: коэффициент детерминации $R^2 = 0,9991$, критерий Фишера $F_{расч} = 1366$, табличное значение по Фишеру $F_{табл} = 12,25$. При $F_{расч} > F_{табл}$ гипотеза значима на уровне 5%

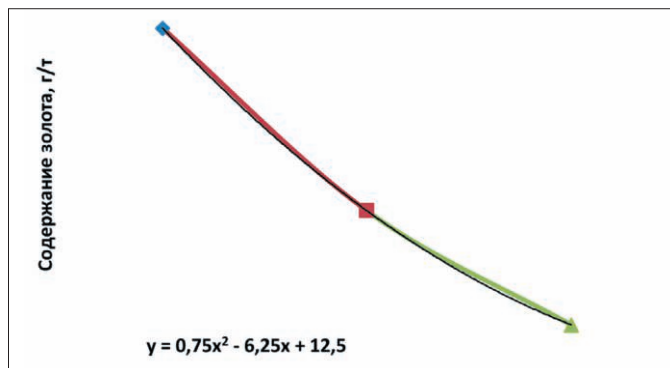


Рис. 5
Динамика содержания золота

Fig. 5
Changes in the gold content

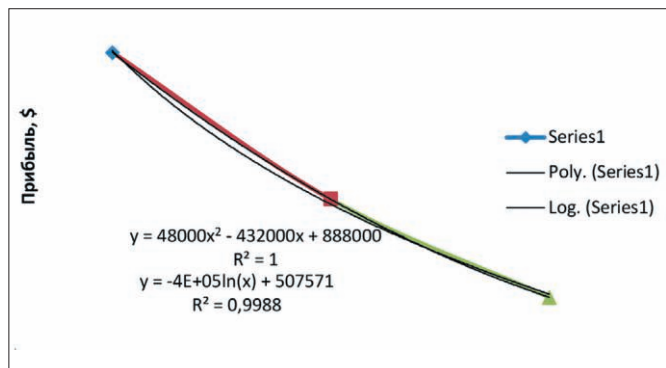


Рис. 7
Динамика прибыли

Fig. 7
Changes in the profits

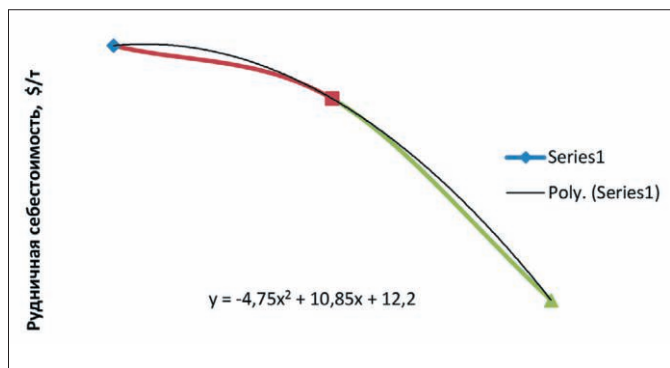


Рис. 6
Динамика рудничной себестоимости

Fig. 6
Changes in the mining cost

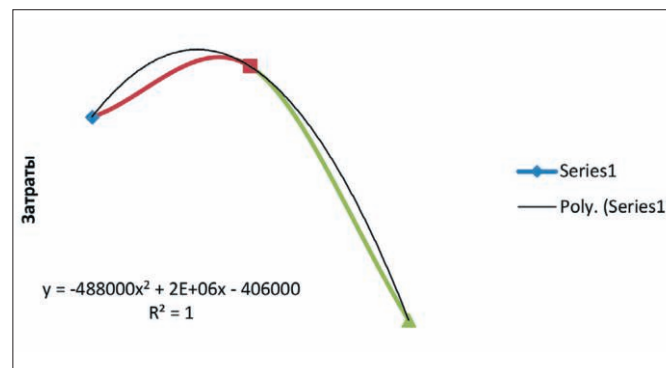


Рис. 8
Динамика затрат

Fig. 8
Changes in the costs

и является правдоподобной. Так как влияние фактора X_2 больше, чем фактора X_4 , содержание металлов в руде является приоритетным фактором и может быть использовано в качестве основного.

Графики зависимости факторов при условии, что остальные факторы остаются неизменными, приведены на рис. 5–8.

Математическая модель зависимости между факторами X_1, X_2, X_3, X_4 имеет вид:

$$X_4 = 23,092 - 0,005X_1^2 + 3,657X_2^2 + 0,015X_1 - 0,423X_1X_2 + 17,768X_2.$$

Коэффициент при X_2 на порядок больше остальных, поэтому принимается в качестве приоритетного.

Заключение

При добыче руд величина затрат на управление состоянием рудовмещающего массива является приоритетным фактором формирования экономических показателей предприятий. Выработанное пространство формирует трехмерное вероятностное распределение, для которого объем образованных выработок и прочность пород являются взаимозависимыми факторами.

Список литературы / References

1. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных 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>
2. Adero N.J., Drebenstedt C., Prokofeva E.N., Vostrikov A.V. Spatial data and technologies for geomonitring of land use under aspect of mineral resource sector development. *Eurasian Mining*. 2020;(1):69–74. <https://doi.org/10.17580/em.2020.01.14>

3. 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.)
4. 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;16(1):205–216. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216>
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;16(1):205–216. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216>
5. Хакулов В.А., Карамурзов Б.С., Сыцевич Н.Ф., Кононов О.В. Перспективы возрождения разработки Тырнаузского месторождения на основе технологического картирования и переоценки остаточных балансовых запасов. *Горный журнал*. 2015;(8):13–18. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.03>
Khakulov V.A., Karamurзов B.S., Sytsevich N.F., Kononov O.V. Prospects of mining revitalization at Tyrnyauzsky deposit based on geotechnical mapping and reappraisal of remaining reserves. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(8):13–18. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.03>
6. de Saracibar C.A. *Nonlinear continuum mechanics: An engineering approach*. Cham: Springer; 2023. 344 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15207-8>
7. Клюев Р.В., Мартюшев Н.В., Кукарцев В.В., Кукарцев В.А., Бригида В.С. Анализ геологической информации для обеспечения устойчивого функционирования горнотехнических систем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(5):144–157. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_144
Klyuev R.V., Martuyushev 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;(5):144–157. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_144
8. Хоменко О.Е., Ляшенко В.И. Новые технологии и технические средства крепления горных выработок с использованием геознергии. *Маркшейдерский вестник*. 2020;(4):54–61.
Khomenko O.E., Lyashenko V.I. New technologies and technical means of fixing mine workings using geo-energy. *Mine Surveying Bulletin*. 2020;(4):54–61. (In Russ.)
9. Голик В.И., Комашенко В.И., Качурин Н.М. Концепция комбинирования технологий разработки рудных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015;(4):76–88.
Golik V.I., Komashchenko V.I., Kachurin N.M. Concept of combining technologies by mining ore deposits. *Izvestiya Tuls'kogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2015;(4):76–88. (In Russ.)
10. Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020;37(5):1385–1399. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-1>
11. Голик В.И., Титова А.В. Моделирование показателей разработки рудных месторождений Садона. *Горная промышленность*. 2022;(4):82–87. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-82-87>
Golik V.I., Titova A.V. Modelling of mining performance indicators for the Sadon ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(4):82–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-82-87>
12. Zhang Y., Wu J., Liu M., Tan A. TSN-based routing and scheduling scheme for Industrial Internet of Things in underground mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022;115:105314. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105314>

Информация об авторах

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
Титова Ася Владимировна – доктор технических наук, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Information about the authors

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
Asya V. Titova – Dr. Sci. (Eng.), Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.02.2026
Поступила после рецензирования: 24.03.2026
Принята к публикации: 01.04.2026

Article info

Received: 16.02.2026
Revised: 24.03.2026
Accepted: 01.04.2026