

УДК 504. 55. 054: 622(470.6)

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМИ МАССИВАМИ ТАЛНАХА РАЗГРУЗКОЙ НАПРЯЖЕНИЙ

Голик Владимир Иванович^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

¹ Московский политехнический университет,
Россия, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38.

² Геофизический институт Владикавказского научного центра,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а.

Актуальность. Подземная разработка скальных массивов мощных месторождений на глубоких горизонтах сопровождается геомеханическими явлениями, которые предупреждаются возведением в выработанном пространстве искусственных сооружений из твердеющих смесей. Управление геомеханикой массива повышает полноту использования недр и является актуальным направлением горного производства.

Цель: детализация технологии управления состоянием массива путем рационального регулирования напряжений в массиве.

Объект: массивы месторождений Талнахского рудного узла.

Методы: моделирование и эксперимент, результаты которых являются основой для разработки модели и рекомендаций.

Результаты. Дана оценка поведению природных и искусственных массивов дифференцированно для основных месторождений рудного узла. Установлены закономерности комбинирования вариантов разгрузки массивов от критических напряжений: с надработкой и с подработкой защитным слоем. Обобщены принципы оптимизации технологии добычи руд с учетом геомеханических особенностей массивов. Рекомендованы меры повышения объемного сжатия закладочных смесей для вариантов камерных систем разработки. Приведены результаты моделирования влияния объемов породных включений на эффективность разработки месторождения. Предложена модель эколого-экономической оценки технологий с учетом затрат на создание защитных слоев и уменьшения разубоживания руд. Разгрузка массивов от напряжений предоставляет возможность регулировать уровень напряжений со снижением деформаций, в том числе при селективной выемке руд с оставлением в недрах породных прослоев.

Выводы. Разгрузка массивов от действующих напряжений является действенной мерой решения основных проблем недропользования одновременно. Реализация этого направления в условиях локализации месторождений талнахского рудного месторождения может быть осуществлена опережающей выемкой слоя по почве. Эффективность отработки напряженно-деформированных массивов достигается рациональным взаимодействием природных и технологических факторов разработки.

Ключевые слова:

месторождения, массивы, напряжения, разгрузка, экономика, окружающая среда, управление.

Введение

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается негативными геомеханическими явлениями, снижающими экономическую и экологическую эффективность добычи руд [1–3].

Одно из направлений оптимизации методов управления массивами заключается в регулировании природных и техногенных напряжений в них путем предварительной разгрузки проходкой выработок, что защищает массив от разрушения и улучшает показатели горного передела [4–6].

Эти процессы влияют на состояние окружающей среды, вызывая необратимые последствия [7–10].

В массивах коренных месторождений, особенно на участках сочленения крупных рудных тел, величина напряжений и деформаций определяется при прочих равных условиях схемой и стадийностью развития горных работ и временем.

Показатели разработки месторождений улучшаются применением технологий с предварительной разгрузкой массива от напряжений проходкой выработок или бурением скважин.

Целью исследования данного направления является разработка методов управления напряжениями в массиве [11–13].

Методология исследования

Методы исследования включают в себя систематизацию и критический анализ публикаций, моделирование процессов и эксперименты [14–17].

Результаты натурных и лабораторных исследований обобщаются и анализируются, после чего становятся основой для разработки математико-экономической модели определения эффективности разработки месторождения. Для повышения репрезентативности результатов при моделировании варианты технологий поставлены в одинаковые условия.

По результатам моделирования феномена влияния объемов породных включений для вариантов с разгрузкой напряжений в кровле и в почве рекомендуются меры оптимизации технологии разработки [18–21].

Результаты исследования

Проблемные участки месторождения отрабатывают слоевой выемкой (рис. 1).

Исследуемая залежь медистых руд разделена породным прослоем толщиной до 10 м на верхнюю часть мощностью до 5 м и нижнюю часть мощностью 10–15 м, что позволяет комбинировать варианты разгрузки.

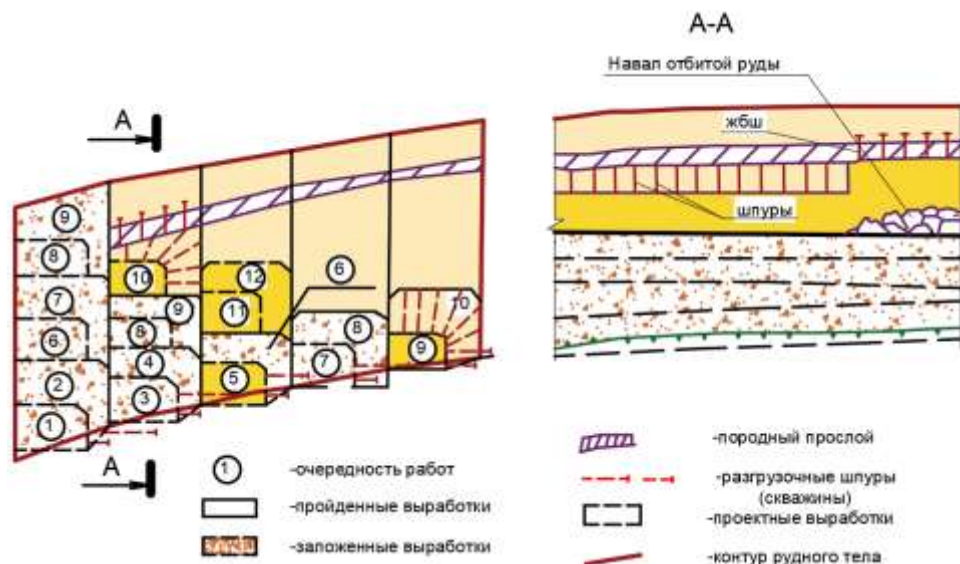


Рис. 1. Выемка участков массива горизонтальными слоями

Fig. 1. Excavation of the array sections by horizontal layers

Исследованы два варианта отработки залежи.

Вариант 1. Защитный слой образуется выработками размерами 4×4 м с оставлением рудных целиков или с созданием массивов из твердеющих смесей.

Вариант 2. Защитный слой по почве рудного тела отработывают с опережением основных слоев.

Рудная стенка выработки разгружается от напряжений на глубину не менее 2 м. Защитный слой может быть образован выработками с размерами не более 4 м. Забой в нижней части рудного тела отстает от контакта прослоя с нижней рудой, а остальная руда извлекается вместе с породным прослоем.

Показатели эффективности вариантов разгрузки различаются не на много (табл. 1).

Поведение рудовмещающих массивов для месторождений Норильского рудного узла оценивается дифференцированно.

Талнахское месторождение характеризуется слоистой структурой и разделением рудного тела на пачки, что требует селективизации очистной выемки. В этих условиях целесообразна опережающая выемка защитного слоя по почве или по кровле рудного тела (рис. 2).

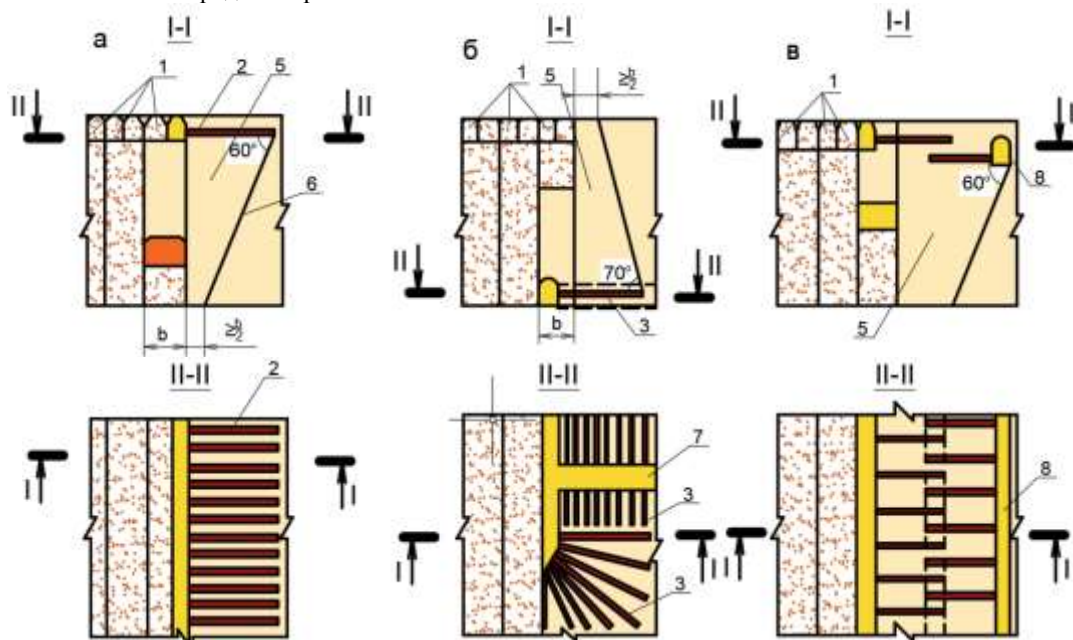


Рис. 2. Разгрузка массива от напряжений: а) в кровле; б) в почве; в) в теле массива; 1 – выработки защитного слоя; 2, 3 – скважины; 4 – веерные скважины; 5 – защищенная зона; 6 – граница защищенной зон; 7 – слоевой орт; 8 – транспортная выработка; b – ширина ленты

Fig. 2. Unloading of the array from stresses: a) in the roof; b) in the soil; c) in the area of the array; 1 – workings of the protective layer; 2, 3 – wells; 4 – fan wells; 5 – protected zone; 6 – border of protected zones; 7 – layer ort; 8 – trans-tailor production; b – width of the tape

Таблица 1. Характеристика комбинированных вариантов разгрузки

Table 1. Characteristics of combined unloading options

Вариант Option	Объем выработок, м ³ /1000 т Volume of workings, m ³ /1000 t	Производительность, м ³ /год Capacity, m ³ /year
по кровле by roof	123,7	38400
по почве by soil	124,4	39200

Принципы оптимизации технологии добычи руд для Талнахского месторождения включают в себя:

- раскройка на выемочные панели со смещением фронтов;
- восходящая выемка горизонтальными слоями с разгрузкой;
- ориентация выемочных выработок под углом к фронту работ;
- ограничение размеров целиков до 8–12 м на глубине до 800 м и 9–15 м на глубине более 800 м.

Месторождение «Октябрьское». Меры геомеханической профилактики:

- выемка участков мощностью до 10–12 м с разгрузкой массива;
- сохранение линейного фронта работ с равномерным подвиганием забоев;
- разгрузка массива проходкой выработок с оставлением неопасных целиков;
- взрывание камуфлетных зарядов в боках выработок.

Повышению объемного сжатия закладочных смесей способствуют варианты камерных систем разработки, эффективность которых заключается в следующем:

- минимизация сроков перехода массива в режим объемного сжатия;
- заполнение очистных камер закладочной смесью по всему объему;
- организация очистных работ сплошным фронтом;
- минимизация времени «стояния» открытого очистного пространства.

Таблица 2. Селективность выемки руд при добыче с защитными слоями

Table 2. Selectivity of ore extraction during mining with protective layers

Объем запасов, тыс. м ³ Volume of reserves, thousand m ³		Варианты разгрузки Unloading options			
		В кровле In roof		В почве In soil	
Руда Ore	Порода Breed	Руда Ore	Порода Breed	Руда Ore	Порода Breed
200	100	200	80	200	50
Извлечение из недр, % Extraction from the subsurface, %		100	80	100	50
Оставлено в недрах, % Left in the bowels, %		0	20	0	50
Относительный эффект, % Relative effect, %		0		0	28

Для повышения репрезентативности результатов при моделировании варианты технологий поставлены в одинаковые условия. Результаты моделирования влияния объемов породных включений для вариантов с надработкой и с подработкой приведены в табл. 2.

Данные для моделирования получены обработкой рудничных документов (табл. 3).

Таблица 3. Исходные данные для моделирования параметров технологии

Table 3. Initial data for modeling technology parameters

Технологические процессы Technological processes	Трудоёмкость, чел. ч/м ³ Labor intensity, pers. h/m ³	Себестоимость, ден. ед./м ³ Cost price, den. units/m ³
Подготовительные работы Preparatory workings	1,2	12
Очистные выработки Sewage treatment works	1,4	13
Оборудование защитного слоя Protective layer equipment	2,0	30
Отбойка руды Ore extraction	0,12	1,5
Выпуск руды из слоев Ore release from layers	0,10	0,14
Выпуск руды из камеры Ore release from the chamber	0,12	2,2
Закладка пустот смесями Laying voids with mixtures	0,18	25

Примечание: цены по состоянию на 1990 г.

Note: prices are as at 1990.

Полученные показатели позволяют сопоставить варианты технологий между собой (табл. 4).

Таблица 4. Показатели технологий добычи руд

Table 4. Indicators of ore extraction technologies

Показатели технологий Technology indicators	Единицы измерения Units	Варианты технологий Разработки Variants of development technologies			
		1	2	3	4
Мощность залежи Indicators of options	м/м	20	20	20	20
Производительность панели Panel performance	тыс. м ³ /г 1000 m ³ /g	80	100	50	120
Расход выработок Expense of workings	м ³ /тыс. т m ³ /1000 t	120	95	105	60
Производительность забойщика Slaughterer productivity	м ³ /см m ³ /cm	5	6	5	8
Себестоимость руды, франко лок Cost of ore, franco hatch	р/м ³ руды rub/m ³ of ore	4,5	5,2	5,9	3,9
Разубоживание прослоем Thinning by interlayer	%	48	28	33	69

Условные обозначения: 1 – комбинированная технология с разгрузкой по кровле; 2 – комбинированная технология с разгрузкой по почве; 3 – слоевая выемка с разгрузкой по кровле; 4 – камерная система без разгрузки от напряжений.

Symbols: 1 – mixed technology with unloading by roof; 2 – mixed technology with unloading by soil; 3 – leaf mining with unloading by roof; 4 – single-stall system without unloading from voltages.

Вариант с разгрузкой по почве обеспечивает меньшее разубоживание руд породой прослоя, не уступая другим вариантам по остальным показателям.

Обсуждение результатов

Результаты выполненных исследований являются элементом общей системы мониторинга состояния массива, используемой для оптимизации основного производства [22, 23].

Для талнахских месторождений одной из главных проблем является снижение разубоживания руд, поэтому актуальны варианты селективной выемки руды. При сравнении альтернативных вариантов разработки оценивается возможность оставления породных прослоев в недрах.

Вариант нисходящих слоев с выемкой защитного слоя по кровле при прочной руде становится невыгодным.

Камерный вариант без защитного слоя не обеспечивает сохранность стенок выработок и характеризуется повышенным разубоживанием.

Комбинированные варианты с опережающей выемкой защитного слоя по кровле и по почве рудного тела по показателям практически одинаковы, однако различаются по критерию селективности выемки.

Вариант с разгрузкой в кровле характеризуется работой под защитным слоем при мощности верхних руд 3–5 м и не позволяет оставлять в недрах прослой, предъявляет повышенные требования к прочности твердеющих смесей и не позволяет оперативно реагировать на уменьшение мощности рудных тел.

Вариант с разгрузкой в почве характеризуется протяженностью фронта отработки. Для обеспечения соотношения между фронтами производится подготовка и выемка сначала нижних, а затем верхних руд, что позволяет оставлять не отбитым породный прослой мощностью не менее минимальной толщины потолочины.

В основу варианта с наклоном стенок камер на рудный массив положено соотношение размеров камер и угла наклона стенок. Наклоняя стенку на массив, увеличивают длину и высоту камеры без снижения устойчивости.

Для участков пониженной устойчивости рекомендуется создание предохранительного массива из твердеющей смеси на границе рудной залежи с зоной нарушенности, толщина которого рассчитывается из условия нагружения защемленной плиты.

При подаче смесей на магазинированную руду в первую стадию отбивают и выпускают руду из верхней части камеры, закладывают выработанное пространство, после чего извлекают руду из нижней части камеры. Нижняя часть камеры поддерживается магазинированной рудой, а в верхней части напряжения уменьшаются за счет сокращения времени существования выработанного пространства. Руда не пропитывается закладкой и не образует монолитной массы, потому что вязущий раствор проникает вглубь руды не более чем на 0,5 м.

Эффективность опережающей разгрузки массивов складывается совместным влиянием геомеханических, экологических и экономических факторов разработки.

Сведения о поведении напряженно-деформированных массивов при отработке дают возможность оптимизировать технологии по фактору учета действующих напряжений.

Разгрузка массива от высоких напряжений целесообразна при сближении выработок на расстояние 8 м. Если это требование не соблюдается, разгрузка повышенных напряжений осуществляется созданием выше выработки защитного слоя.

Фронт очистных панелей должен опережать фронты смежных панелей на установленную для данных условий величину.

Эффективность управления разрабатываемыми массивами определяется совокупностью природных и технологических ресурсов, величиной наносимого горными работами ущерба и упущенной выгодой от нерационального использования недр.

Формализованная запись этого условия:

$$Y_6 - Y_T = f(P, Z),$$

где Y_6 – ущерб недрам при базовой технологии; Y_T – ущерб окружающей среде при технологии с разгрузкой массива; P – прибыль от использования технологии; Z – затраты на реализацию технологии.

Математическая модель эколого-экономической оценки технологий:

$$P = A(C - Z) - (Y_6 - Y_T).$$

Затраты могут быть определены методом последовательного перебора вариантов:

$$h_0 = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где h_0 – оптимизируемый параметр; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – переменные параметры.

Экономическая эффективность оптимизированных по фактору учета горного давления технологий:

$$\Delta = (\Sigma Z_6 - \Sigma Z_0)A.$$

Результаты исследования могут быть использованы при эксплуатации мощных месторождений ценных руд в сложных условиях для оптимизации технологий разработки в направлении снижения разубоживания руд.

Заключение

Разгрузка массивов от действующих напряжений позволяет снизить деформации массива и оставлять в недрах породные прослой, что повышает качество добытых руд.

Для месторождений талнахского рудного узла целесообразны варианты технологии с разгрузкой напряжений опережающей выемкой слоя по почве.

Эффективность отработки напряженно-деформированных массивов описывается моделью, увязывающей природные и технологические факторы разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белодедов А.А., Должиков П.Н., Легостаев С.О. Анализ механизма образования деформаций земной поверхности над горными выработками закрытых шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 1. – С. 160–169.
2. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – Вып. 1. – С. 170–182.
3. Mining in the Arctic environment. A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives / A. Tolvanen, P. Eilu, A. Juutinen, K. Kangas, M. Kivinen, M. Markovaara-Koivisto, A. Naskali, V. Salokannel, S. Tuulentie, Ju. Similä // Journal of Environmental Management. – 2019. – V. 23. – P. 832–844.
4. Голик В.И. Геомеханические аспекты комбинирования технологий разработки месторождений Садона // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 2. – С. 222–234.
5. Экологические особенности добычи руд в горах Кавказа / В.И. Голик, Н.Г.О. Валиев, А.А. Белодедов, С.О. Версиков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 2. – С. 3–13.
6. Gasho E.G., Gasho I.A. Economics and ecology symbiosis: transition to principles of Best Available Techniques // Journal of physics: conference series. – 2018. – P. 22–24.
7. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company / J. Rybak, S. Gorbatyuk, K. Bujanovna-Syuryun, A. Khairutdinov, Y. Tyulyaeva, P. Makarov // Metallurgist. – 2021. – V. 64. – P. 851–861.
8. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center / V.B. Zaalishvili, D.A. Melkov, B.V. Dzeranov, F.S. Morozov, G.E. Tuaeov // International Journal of GEOMATE. – 2018. – № 15 (47). – P. 158–163.
9. Deformation response of roof in solid backfilling coal mining based on viscoelastic properties of waste gangue / P. Huang, J. Zhang, A.J.S. Spearing, M. Li, X. Yan, S. Liu // International journal of mining science and technology. – 2021. – V. 31. – № 2. – P. 279–289. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.004.
10. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst / Jiangong Li, Qianting Hu, Minggao Yu, Xuelong Li, Jie Hu, Huiming Yang // Energy Science & Engineering. – 2019. – V. 7. – Iss. 2. – P. 443–456.
11. К вопросу мониторинга геоэкологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр / А.С. Батугин, С.В. Шевчук, С.С. Шерматова, И.В. Головкин, Бямбасурэн Зундуйжамц // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 10-1. – С. 63–73.
12. Проблемы отработки предохранительных целиков при эксплуатации рудных месторождений / Н.Г. Валиев, В.Х. Беркович, В.Д. Пропп, К.В. Кокарев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 2. – С. 4–9.
13. Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., Hui Zhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: a review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2021. – V. 13. – Iss. 1. – P. 221–247. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.008.
14. Исследование процесса деформирования массива горных пород в предохранительном целике / О.З. Габараев, И.А. Засеев, Ю.А. Майстров, А.О. Габараева // Труды СКГМИ (ГТУ). – 2021. – № 28. – С. 5–9.
15. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия / Ю.С. Петров, Е.А. Хадзаратова, А.А. Соколов, Г.Х. Шарипзянова, А.В. Таскин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 11-1. – С. 178–188.
16. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model / M. Sepehri, D.B. Apel, S. Adeeb, P. Leveille, R.A. Hall // Engineering Geology. – 2020. – V. 266. – P. 105–117. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457.
17. Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock // Deep Rock Behaviour in Engineering Environments. – 2020. – V. 2020. – P. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8891248.
18. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. – London: Taylor & Francis Group, 2021. – P. 422–429.
19. Протосеня А.Г., Куранов А.Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Коашвинского месторождения // Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 67–71.
20. 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.
21. Naithani A.K. Rock mass classification and support design using the Q-system // Journal of the Geological Society of India. – 2019. – № 94 (4). – P. 443. DOI: 10.1007/s12594-019-1336-0.
22. Khairutdinov A., Paleev I., Artemov S. Replacement of traditional components of the waste mixture with man-made waste // IOP Conf. Ser. Earth Environment. Sci. – 2021. – V. 942. – 012005. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012005> (дата обращения 15.01.2023).
23. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. – London: Taylor & Francis Group, 2018. – V. 1. – P. 47–62.

Поступила: 10.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.03.2023 г.

Информация об авторах

Голик В.И., доктор технических наук, профессор кафедры металлургии Московского политехнического университета; доктор технических наук, главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра.

UDC 504.55.054:622(470.6)

CONTROLLING STRESS-DEFORMED TALNAKH ARRAYS BY STRESS UNLOADING

Vladimir I. Golik^{1,2},
v.i.golik@mail.ru

¹ Moscow Polytechnic University,
38, B. Semenovskaya street, Moscow, 107023, Russia.

² Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center,
93a, Markov street, Vladikavkaz, 362002, Russia.

Relevance. Underground mining of rock massifs of powerful deposits on deep horizons is accompanied by geomechanical phenomena, which are prevented by the construction of artificial structures made of solid mixtures in the developed space. Controlling geomechanics of the massif increases the completeness of subsoil use and is an actual direction of mining production.

Objective: detailing the array state management technology by rationally regulating the voltages in the array.

Object: arrays of deposits of the Talnakh ore node.

Methods: modeling and experiment, the results of which are the basis for the development of a model and recommendations.

Results. The paper introduces the assessment of the behavior of natural and artificial massifs differentially for the main deposits of the ore node. The regularities of combining options for unloading arrays from critical stresses are established: with overworking and with a protective layer underworking. The principles of optimization of ore mining technology taking into account the geomechanical features of the arrays are summarized. Measures to increase the volumetric compression of filling mixtures for variants of chamber systems of development are recommended. The results of modeling the influence of the volumes of rock inclusions on the efficiency of field development are presented. A model of ecological and economic assessment of technologies is proposed, taking into account the costs of creating protective layers and reducing the dilution of ores. Unloading of arrays from stresses provides an opportunity to regulate the stress level with a decrease in deformations, including during selective excavation of ores with the abandonment of rock layers in the bowels.

Conclusions. Unloading arrays from operating stresses is an effective measure to solve the main problems of subsurface use at the same time. The implementation of this direction in the conditions of localization of the Talnakh ore deposits can be carried out by advanced excavation of the soil layer. The efficiency of working out stress-deformed arrays is achieved by the rational interaction of natural and technological factors of development.

Key words:

deposits, arrays, stresses, unloading, economy, environment, management.

REFERENCES

- Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Nevskii L.N., Shempelev A.G. Geophysical fields above volcanic edifices in the North Caucasus. *J. Volcanolog. Seismol.*, 2015, vol. 9, pp. 333–338.
- Kachurin N.M., Stas G.V., Korchagina T.V., Zmeev M.V. Geomechanical and aerogasodynamic consequences of mining the territories of mining branches of the mines of Eastern Donbass. *Izvestiya Tula State University. Earth sciences*, 2017, Iss. 1, pp. 170–182. In Rus.
- Tolvanen A., Eilu P., Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä Ju. Mining in the Arctic environment. A review from ecological, socio-economic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 23, pp. 832–844.
- Golik V.I. Geomechanical aspects of combining technologies for the development of Sadon devices. *Izvestiya Tula State University. Earth sciences*, 2022, no. 2, pp. 222–234. In Rus.
- Golik V.I., Valiev N.G.O., Belodedov A.A., Versilov S.O. Ecological peculiarities of ore mining in the Caucasus mountains. *Izvestiya Tula State University. Earth sciences*, 2022, no. 2, pp. 3–13. In Rus.
- Gasho E.G., Gasho I.A. Economics and ecology symbiosis: transition to principles of Best Available Techniques. *Journal of physics: conference series*, 2018, pp. 22–24.
- Rybak J., Gorbatyuk S., Bujanovna-Syuryun K., Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Makarov P. Utilization of mineral waste: a method for expanding the mineral resource base of a mining and smelting company. *Metallurgist*, 2021, vol. 64, pp. 851–861.
- Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuayev G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. *International Journal of GEOMATE*, 2018, vol. 15 (47), pp. 158–163.
- Huang P., Zhang J., Spearing A.J.S., Li M., Yan X., Liu S. Deformation response of roof in solid backfilling coal mining based on viscoelastic properties of waste gangue. *International journal of mining science and technology*, 2021, vol. 31, no. 2, pp. 279–289. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.01.004.
- Jiangong Li, Qianting Hu, Minggao Yu, Xuelong Li, Jie Hu, Huiming Yang. Acoustic emission monitoring technology for coal and gas outburst. *Energy Science & Engineering*, 2019, vol. 7, Iss. 2, pp. 443–456.
- Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Melkov D.A., Makiev V.D., Dzubelova L.V. Development of a unified model of geoinformation system for city planning and integration. *International Journal of GEOMATE*, 2018, vol. 15, no. 51, pp. 160–166.
- Valiev N.G., Berkovich V.Kh., Propp V.D., Kokarev K.V. Problems of working off pre-storage targets during the exploitation of ore deposits. *News of higher educational institutions. Mining magazine*, 2018, no. 2, pp. 4–9. In Rus.
- Fanzhen Meng, Gui Yuan Wang L., HuiZhou. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: a review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, vol. 13, Iss. 1, pp. 221–247. DOI: 10.1016/j.jmge.2020.06.008.
- Gabaraev O.Z., Zasseev I.A., Maistrov Yu.A., Gabaraeva A.O. Investigation of the deformation process of a rock mass in a safety target. *Proceedings of the SCGMI (GTU)*, 2021, no. 28, pp. 5–9. In Rus.
- Petrov Yu.S., Hadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.H., Taskin A.V. Basic principles of obtaining, transmitting and storing information about the parameters of the technological cycle of a mining and metallurgical enterprise. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, no. 11-1, pp. 178–188. In Rus.
- Sepehri M., Apel D. B., Adeeb S., Leveille P., Hall R. A. Evaluation of mining-induced energy and rockburst prediction at a diamond mine in Canada using a full 3D elastoplastic finite element model. *Engineering Geology*, 2020, vol. 266, pp. 105–117. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105457.
- Aizhong Lu, Ning Zhang, Guisen Zeng. An extension failure criterion for brittle rock. *Deep Rock Behaviour in Engineering Envi-*

- ronments, 2020, vol. 2020, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8891248.
18. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Dmitrak Yu.V. Analysis of hazardous processes in the natural-industrial system. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. London, Taylor & Francis Group, 2021. pp. 422–429.
19. Protosenya A. G., Kuranov A.D. Methodology for predicting the stress-strain state of a mountain massif during the combined development of the Koashvinsky deposit. *Mining Journal*, 2015, no. 1, pp. 67–71. In Rus.
20. Rybak Ya., Khairutdinov M.M., Kuziev D.A., Kongar-Suryun Ch.B., Bobyr N.V. Forecasting the geomechanical state of the massif during the development of salt deposits with a bookmark. *Notes of the Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 61–70. In Rus.
21. Naithani A.K. Rock mass classification and support design using the Q-system. *Journal of the Geological Society of India*, 2019, vol. 94, pp. 443. DOI: 10.1007/s12594-019-1336-0.
22. Khairutdinov A., Paleev I., Artemov S. Replacement of traditional components of the waste mixture with man-made waste. *IOP Conf. Ser. Earth Environment. Sci*, 2021, vol. 942, 012005. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/942/1/012005> (accessed 15 January 2023).
23. Li C.C. Dynamic rock support in burst-prone rock masses. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium*. London, Taylor & Francis Group, 2018. Vol. 1, pp. 47–62.

Received: 10 February 2023.

Reviewed: 20 March 2023.

Information about the authors

Vladimir I. Golik, Dr Sc., professor, Moscow Polytechnic University; chief researcher, Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center.