

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219

Использование свойств дискретных пород для оптимизации процессов погашения выработанного пространства

Голик В. И.¹, Буй Хуан Нам², Масленников С. А.³, Анищенко В. И.⁴

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт, (СКГТУ), Владикавказ, Россия,

²Горно-Геологический Университет, Ханой, Вьетнам.

³Донской государственный технический университет (филиал), Шахты, Россия

⁴LLC "Spetsmodulproekt", Нью-Йорк, США

Аннотация: Оптимизация процессов погашения выработанного пространства осуществляется за счет использования свойств дискретных пород. Новое направление совершенствования технологий основано на феномене реализации остаточной прочности пород при заклинивании в процессе подземной разработки структурно-нарушенных скальных месторождений. Целью исследований является уменьшение затрат на погашение выработанного пространства при обеспечении безопасности работ. Цель достигается сравнением вариантов погашения в зависимости от образования свода естественного равновесия пород. Исследование базируется на основе положений строительной механики и механики сплошных сред с использованием феномена проявления остаточной прочности дискретных пород вследствие их заклинивания. Сформулирована концепция погашения выработанного пространства. Приведены сведения о геологическом строении исследуемого сложноструктурного месторождения скальных руд и роли тектонических структур в поведении рудовмещающего массива при вскрытии горными выработками. Приведены результаты исследования состояния массива с выделением характерных инженерно-геологических участков. Рассмотрены варианты поведения рудовмещающего массива в зависимости от естественного заклинивания элементарных структурных блоков пород в пределах свода. Уточнена возможность комбинирования способов погашения изолацией и закладкой твердеющими смесями. Рекомендована область применения результатов исследования при разработке месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом. Определение границ области опасных сдвижений в толще пород на основе использования механизма заклинивания дискретных пород обеспечивает возможность отработки месторождений с большей эффективностью при обеспечении безопасности горных работ. Результаты исследования могут быть востребованы при подземной добыче твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: порода, прочность, погашение, выработанное пространство, заклинивание, управление, безопасность.

Для цитирования: Голик В. И., Буй Хуан Нам, Масленников С. А., Анищенко В. И. Использование свойств дискретных пород для оптимизации процессов погашения выработанного пространства. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):213-219. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219.

Using Properties of Discrete Rocks to Optimize Backfilling

V. I. Golik¹, Xuan Nam Bui², S. A. Maslennikov³, V. I. Anischenko⁴

¹North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute (SKGTU), Vladikavkaz, Russia, ✉

²Geology and Mining University, Hanoi, Vietnam.

³Donskoi State Technical University, Shakhty, Russia.

⁴LLC "Spetsmodulproekt", New York, USA

Abstract: Backfilling optimization is carried out through the use of discrete rock properties. A new line of the process improvement is based on the phenomenon of performance of residual rock strength when jamming in the process of underground mining of deposits within faulted rocks. The research is aimed at reducing costs of backfilling while ensuring the work safety. The goal is achieved by comparing backfilling options depending on the formation of rock natural self-supporting arch. The study is based on the provisions of structural mechanics and continuum mechanics using the phenomenon of performance of residual rock strength due to rock jamming. The backfilling concept has been formulated. Information on geological structure of the studied rocky ore deposit of complicated



tectonic structure and the roles of tectonic framework in the behavior of the ore-hosting rock mass in the course of opening by mine workings are presented. The findings of the study of the rock mass condition with determination of characteristic geotechnical domains are presented. Variants of the ore-hosting rock mass behavior are considered depending on natural jamming of elementary structural rock blocks within the arch. The possibility of combining sealing and setting-mix backfilling methods has been clarified. The area of the research findings application in mineral underground mining is recommended. The determination of dangerous displacement area boundaries in rock mass using the mechanism of discrete rock jamming allows achieving higher mining effectiveness while ensuring mining safety. The study results can be used in underground mining of minerals.

Keywords: rock, strength, backfilling, goaf, jamming, management, safety.

For citation: Golik V. I., Bui Xuan Nam, Maslennikov S. A., Anischenko V. I. Using properties of discrete rocks to optimize backfilling. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):213-219 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219.

Введение

Погашение выработанного пространства является ответственным этапом эксплуатации месторождения, потому что последствия неправильно выбранного решения откорректировать трудно. Одним из направлений совершенствования технологии погашения является использование породных несущих конструкций с реализацией их механической прочности [1–3].

Концепция погашения выработанного пространства основана на том, что устойчивые во время отработки породы с течением времени обрушаются или до предельного свода равновесия, образованного заклинившимися структурными блоками, или до высоты, определяемой коэффициентом обрушения пород [4–8].

Целью исследования является снижение затрат на погашение за счет использования энергии заклинивания для управления массивом.

Результаты

В геологическом строении скальных месторождений участвуют породы различного возраста. Ведущая роль в структуре и рудоносности месторождения принадлежит разломам, к которым приурочена рудоносность (рис. 1).

Вблизи тектонических разломов трещиноватость увеличивается, достигая миниму-

ма в опережающих нарушениях и вблизи них (рис. 2).

Вывалы происходят чаще всего при пересечении сопряжений крутых и пологих зон, а также если один из швов тектонического нарушения является стенкой выработки.

Внутри геологического поля можно выделить инженерно-геологические участки (табл. 1).

Соотношение размеров допустимого по устойчивости пролета и пролета свода обрушения становится основным критерием безопасности и еще более значимым при использовании технологий с подработкой пород на большой площади, например с выщелачиванием металлов из рудных залежей значительной площади [9–11].

При возникновении свода естественного равновесия параметры погашаемой выработки определяются в первую очередь размерами структурного породного блока:

$$a = d_1 \left(\frac{10R_{сж}}{kH\gamma} - 1 \right),$$

где a – полупролет свода естественного равновесия, м; d_1 – горизонтальный размер элементарного блока пород, м; 10 – коэффициент перевода кг/см^2 в т/м^2 ; $R_{сж}$ – временное сопротивление пород сжатию, кг/см^2 ; k – коэффициент запаса; H – глубина расположения пяты от поверхности, м; γ – объемный вес пород, кг/м^3 .

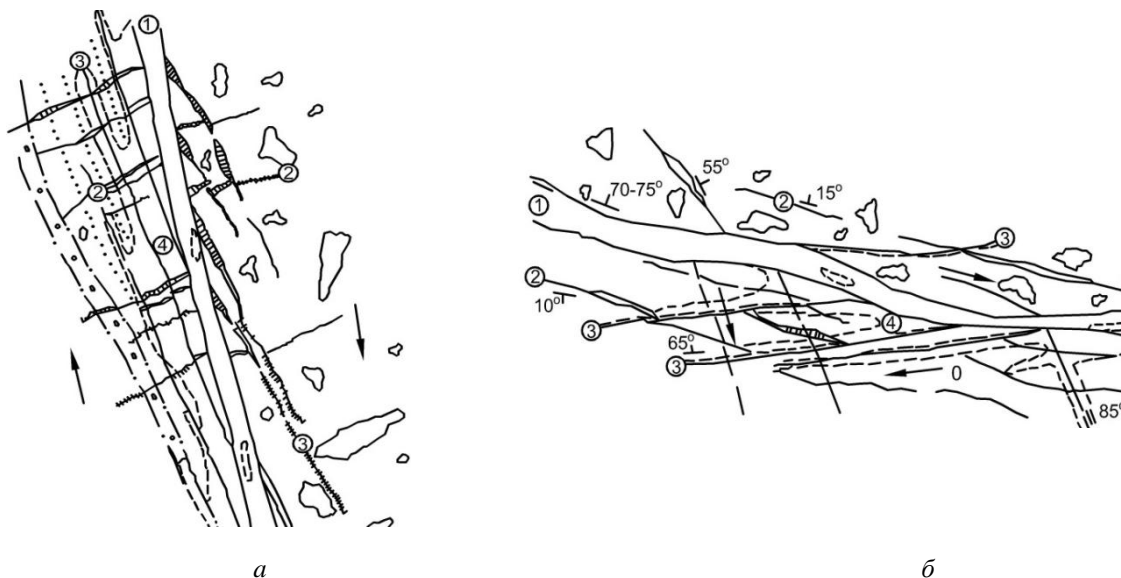


Рис. 1. План (а) и разрез (б) разлома:

1 – зона расслоения; 2 – трещины отрыва; 3 – трещины скола с глиной трения; 4 – оруденение

Fig. 1. Fault plan (a) and cross-section (b):

1 – stratification zone; 2 – ruptures; 3 – shear fractures with clay gauge; 4 – mineralization

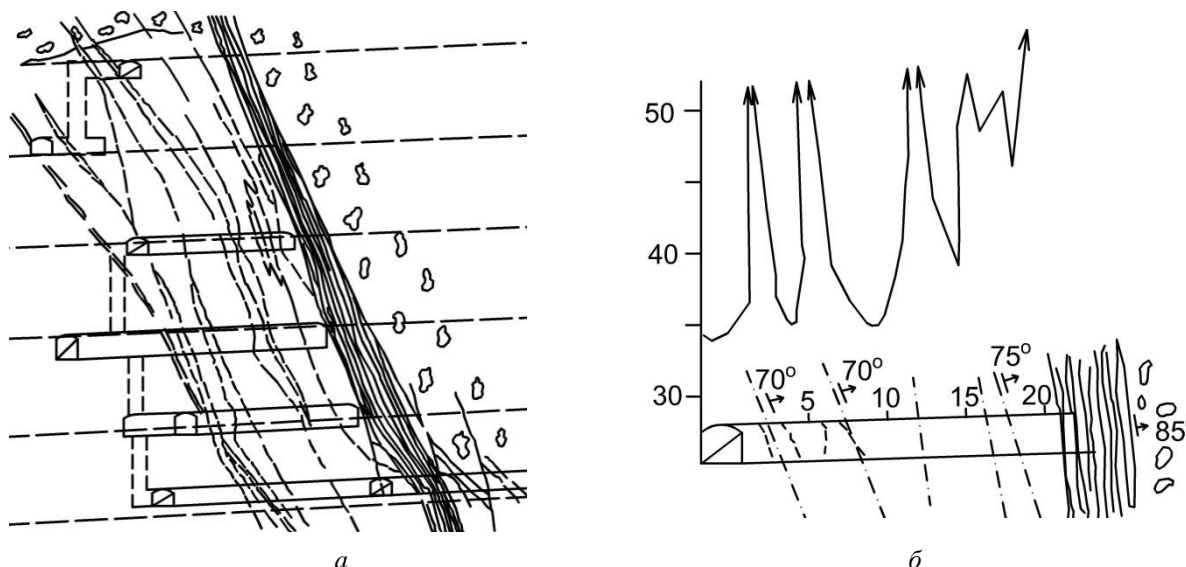


Рис. 2. Положение рудоносных структур в лежащем боку разлома (а) и характер распределения трещин в орте (б)

Fig. 2. Position of ore-bearing structures in fault footwall (a) and the nature of fracture distribution in cross drift (b)

Таблица 1

Инженерно-геологическая характеристика месторождения Ишимское

Geotechnical characteristics of Ishimskoe deposit

Характеристика участка	Объемный вес пород, т/м ³	Прочность пород, кг/см ²	Размер структурного блока, м	Коэффициент ослабления пород
Узлы сопряжений разломов с контактной зоной	2,65	639	0,4×0,4	0,37
Зоны крупных разломов и контактные зоны	2,65	587	0,8×1,6	0,43
Части тектонических блоков между разломом и контактной зоной	2,65	570	1,8×4,0	0,62

Самозаклинивание элементарных блоков пород может произойти, если пролет предельного свода B больше пролета зоны обрушения пород:

$$B \geq 2a.$$

На рис. 3 и 4 представлена зона обрушения пород для случаев, когда угол наклона очистной выработки больше угла обрушения пород:

$$\alpha \geq \frac{90^\circ + \varphi}{2};$$

$$B = \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}} + \frac{m}{\sin \alpha},$$

где α – угол наклона выработки, град; φ – угол внутреннего трения пород, град (45–50°); h – высота выработки, м; m – ширина выработанного пространства, м; h_{oc} – высота свода заклинивания, м.

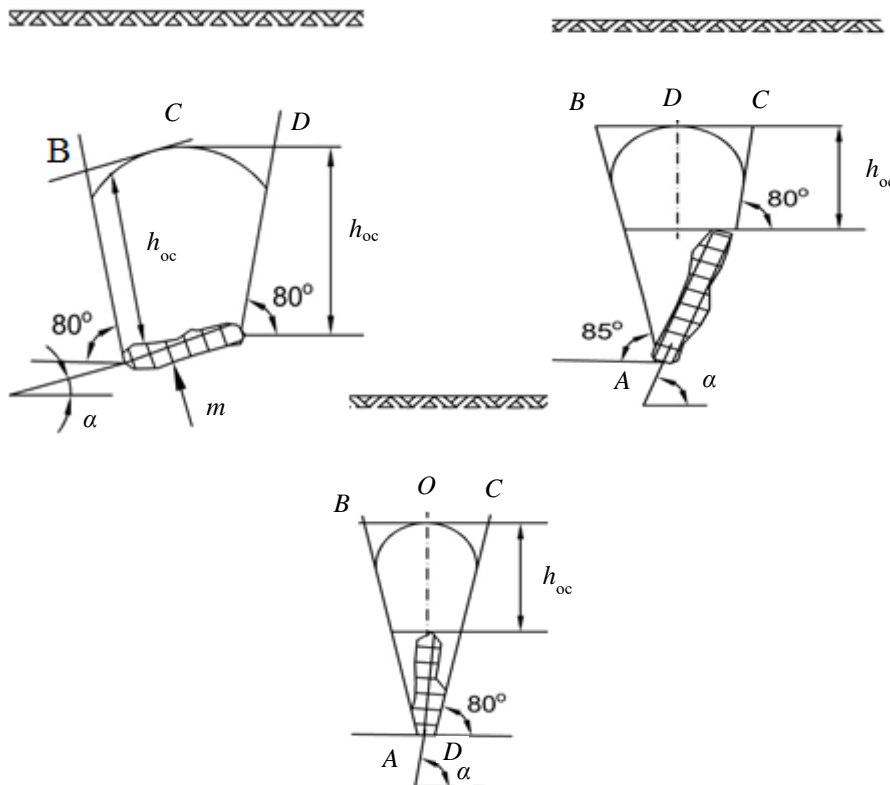


Рис. 3. Построение границ области опасных сдвижений в толще пород на разрезах вкрест простирания

Fig. 3. Construction of dangerous displacement area boundaries in rock mass on sections across the strike

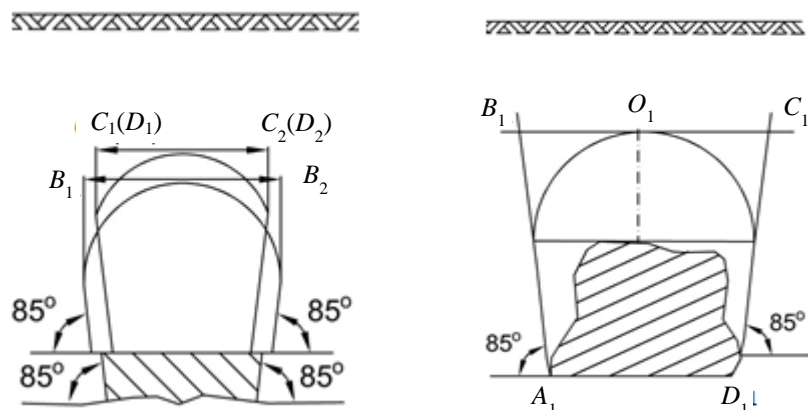


Рис. 4. Построение границ области опасных сдвижений в толще пород в вертикальной проекции

Fig. 4. Construction of dangerous displacement area boundaries in rock mass in elevation view

Высота свода самозаклинивания h_c :

– при $2a = B$:

$$h_c = \frac{a}{\nu},$$

где a – полупролет свода без учета коэффициента запаса k ; ν – коэффициент устойчивости трещиноватых пород:

$$\nu = 2 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1},$$

где $\frac{d_2}{d_1}$ – соотношение вертикального и горизонтального размеров структурных блоков пород;

$\frac{R_{сж}^{11}}{R_{сж}^1}$ – отношение временного сопротивления горных пород сжатию R^1 в направлении распора свода и в направлении действия веса пород.

Если предельный свод пересекает весьма трещиноватые породы, показатели d_2 и $R_{сж}^{11}$ характеризуют породы разломов и зоны их влияния.

Если предельный свод пересекает весьма трещиноватые породы, показатели d_2 и $R_{сж}^{11}$ характеризуют породы разломов и зоны их влияния.

– при $2a > B$ в формулах вместо полупролета предельного свода (a) подставляется полупролет зоны обрушения пород ($0,5B$):

$$h_c = \frac{B}{2\nu}, \text{ и } h_c = \frac{B}{4}.$$

Условие сохранения земной поверхности для случая обрушения пород с образованием свода:

$$H^1 > h_c,$$

где H^1 – расстояние от верхней границы выработанного пространства до выветрелых пород и рыхлых отложений, м.

При несоблюдении условия выработанное пространство закладывается так, чтобы при его уменьшенной высоте обеспечивалось неравенство:

$$H^1 > h_c = \frac{B}{2\nu} = \frac{B}{4 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1}},$$

где h_c – подъем свода при частично заполненном выработанном пространстве, м.

Высота h_3 , на которую заполняется выработанное пространство:

$$\text{– при } \alpha \geq \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

$$h_3 > h + \left(\frac{m}{\sin \alpha} - 2H^1 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1} \right) \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2},$$

при отрицательном значении h_3 закладывать выработанное пространство не нужно;

$$\text{– при } \alpha < \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

$$h_3 > h + \left(\frac{m}{\sin \alpha} - 4H^1 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1} \right) \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}.$$

Если свод естественного равновесия не возникает, высота обрушения определяется коэффициентом разрыхления пород, а зона опасного сдвижения пород – по ВНИМИ (см. рис. 3 и 4).

Если $H' < h_{oc}$, то высота массива закладки, при которой сдвижение поверхности не произойдет:

$$h_3 = \frac{khmt \operatorname{tg} \alpha - H^1 (K_p - 1)(m \operatorname{tg} \alpha + h \sin \alpha)}{kmt \operatorname{tg} \alpha - H^1 (K_p - 1) \sin \alpha},$$

где h – полная высота выработанного пространства, включая высоту массива закладки (h_3), м; m – нормальная ширина выработанного пространства, м; α – угол наклона выработанного пространства, град; K_p – коэффициент разрыхления; H^1 – глубина верхней границы выработанного пространства от выветрелых пород и отложений, м:

$$H^1 = \frac{khmt \operatorname{tg} \alpha}{(K_p - 1)(m \operatorname{tg} \alpha + h \sin \alpha)}.$$

Условие устойчивого состояния земной поверхности по ВНИМИ:

$$H^1 > H_p^1 = K_1 l_{эКВ},$$

где H_p^1 – глубина устойчивого состояния земной поверхности; K_1 – коэффициент, учитывающий прочностные свойства горных пород $l_{эКВ}$ – эквивалентный пролет:

$$l_{\text{экв}} = \frac{Ll^1}{\sqrt{(L^2 + (l^1)^2)}}$$

где L – размер выработанного пространства по простиранию, м; l^1 – размер горизонтальной поверхности выработанного пространства вкрест простирания, м.

Результаты исследования согласуются с выводами специалистов России и зарубежья [12–18]. Они могут быть востребованы при разработке месторождений скального и полускального типов при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом.

Библиографический список

- Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Springer, 2014. – 312 p.
- Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2013. – Vol. 20. – No. 11. P. 7777–7786.
- Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30th International Conference on Ground Control in Mining. 2011. Pp. 74–79.
- Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. No. 60. Pp. 345–352.
- Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 64. P. 20–31.
- Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 79. P. 99–108.
- Голик В. И., Полухин О. Н. *Природоохранные геотехнологии в горном деле*. Белгород: Изд-во БГУ, 2013.
- Дмитрак Ю. В., Голик В. И., Дзеранов Б. В. Сохранение земной поверхности от разрушения при подземной добыче руд. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2018. № 1. С. 12–22.
- Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. P. 166–179.
- Емельяненко Е. А. Снижение влияния горнотехнических систем на среду обитания человека при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений комбинированной геотехнологией // *Тр. науч.-практ. конф. с международным участием «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых»*. М.: ФГУП «ВИМС», 2016. С. 301–305.
- Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // *Горный журнал*. 2013. № 12. С. 29–33.
- Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. *Archives of Mining Sciences*. 2010. Vol. 55. No. 2. Pp. 263–278.
- Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol.10. No.16. Pp. 6787–6792.
- Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 70. Pp. 115–122.
- Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2017. № 1. С. 170–182.

Заключение

При подземной разработке месторождений скальных руд построение границ области опасных сдвижений в толще пород на основе использования феномена заклинивания дискретных пород является важным компонентом оптимизации технологий погашения выработанного пространства, обеспечивающим возможность отработки месторождений с получением эколого-экономического эффекта при обеспечении безопасности горных работ.

16. Дмитрак Ю. В., Логачева В. М., Подколзин А. А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 35–36.

17. Комащенко В. И., Васильев П. В., Масленников С. А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2016. № 2. С. 101–114.

18. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. №12. С. 65–73.

References

1. Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. Engineering Geology for Underground Works. Springer, 2014. 312 p.
2. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // Environmental Science and Pollution Research. – 2013. – Vol. 20. – No. 11. Pp. 7777–7786.

3. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30th International Conference on Ground Control in Mining. 2011, pp. 74–79.

4. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013, No. 60. Pp. 345–352.

5. Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // Computers and Geotechnics. 2015, Vol. 64, pp. 20–31.

6. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015, Vol. 79. P. 99–108.

7. Golik V.I., Polukhin O.N. Environment protecting geotechnologies in mining (*Prirodookhrannyye geotekhnologii v gornom dele*). Belgorod: Publishing house of BSU, 2013 (in Russ.).

8. Dmitrak Yu. V., Golik V. I., Dzeranov B. V. Preservation of the earth's surface from failure during underground ore mining. Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2018, No. 1, pp. 12–22 (in Russ.).

9. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013, Vol. 58, pp. 166–179.

10. Emelianenko E.A. Reducing the impact of mining systems on the human environment during the integrated development of copper-pyrite deposits using combined geotechnology // Proceedings of scientific-practical conference with international participation "Geotechnological methods for development of mineral deposits." M.: FSUE "VIMS" Publ., 2016, pp. 301-305 (in Russ.).

11. Kaplunov D.R., Rynnikova M.V., Radchenko D.N. Expansion of resources base of mining enterprises based on multiple use of deposit mineral resources // Mining Journal (*Gornyy Zhurnal*), 2013, No. 12, pp. 29–33 (in Russ.).

12. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. Archives of Mining Sciences. 2010, Vol. 55, No. 2, pp. 263–278.

13. Molev M. D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol.10. No.16, pp. 6787–6792.

14. Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, Vol. 70, pp. 115–122.

15. Kachurin N. M., Stas G. V., T. V. Korchagina, Zmeev M. V. Geotechnical and gas dynamic consequences of undermining of mining lease areas for Eastern Donbass mines. Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2017, No. 1, pp. 170–182 (in Russ.).

16. Dmitrak Yu.V., Logacheva V.M., Podkolzin A.A. Geophysical prediction of broken condition and watering of rock mass. Mining Informational and Analytical Bulletin (magazine), 2006, no. 11, pp. 35-36 (in Russ.).

17. Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. Reliable raw material base for KMA deposit underground mining // Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2016, No. 2, pp. 101–114 (in Russ.).

18. Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zemtsovsky A.V. Geotechnical substantiation of extraction of deep level reserves under complicated mining, geological and geodynamic conditions. Mining Informational and Analytical Bulletin (magazine), 2018, no. 12, pp.65–73 (in Russ.).