

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОТКРЫТОЙ К ПОДЗЕМНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЕМКИ КРУТОПАДАЮЩЕЙ ЗАЛЕЖИ СИСТЕМАМИ С ОБРУШЕНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД

А. Н. Авдеев¹, О. В. Зотеев¹, Е. Л. Сосновская¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

Аннотация: На руднике Бозымчак, Киргизия, в настоящее время происходит переход от открытой разработки запасов к подземной. Запасы планируется отработать в течение ограниченного времени системами с обрушением. Вследствие сложной горно-технической ситуации возникла актуальная необходимость проанализировать геомеханические условия с целью оценки степени опасности действующих и вновь проводимых горных выработок. В процессе исследований были проанализированы горно-геологические условия месторождения и проектные решения по отработке запасов. Установлено, что подработка карьера системами с обрушением горных пород вызывает активное проявление процессов сдвижения и горного давления. При выемке запасов в неустойчивых серпентинитах возможны проявления воздушной волны, при перепускании пустых пород из внутрикарьерного отвала – их зависания. В процессе доработки временного междублокового целика по центру залежи, особенно на нижних горизонтах рудника, возникает опасность динамических проявлений горного давления. Выявлено, что наиболее опасными элементами геотехнологии являются висячий и лежачий бока рудной залежи и временный междублочный целик, формируемый в процессе горных работ по центру залежи. Рекомендуемые мероприятия по обеспечению безопасности горных работ – горно-капитальные выработки располагать за пределами зоны сдвижения, в горно-подготовительных, нарезных и разведочных выработках предусмотреть ведение геомеханического мониторинга. Контроль состояния внутрикарьерного отвала производить дистанционными маркшейдерскими методами. При погашении междублочного целика осуществлять мониторинг горного давления визуальными и аппаратными способами, производить разгрузку целика камуфлетным взрыванием скважин, осуществлять контроль отставания фронта горных работ нижнего подэтажа, отрабатывать целик одним забоем. При выемке запасов в неустойчивых породах рекомендуется локализовывать пустоты перемычками обрушенных пустых пород.

Ключевые слова: устойчивость выработок и целиков, системы с обрушением, комбинированные геотехнологии, геомеханический мониторинг, техногенные напряжения, горное давление, сдвижение горных пород.

Благодарность: Статья подготовлена в рамках Госзадания №075–00581–19–00. Тема № 0405–2019–0007.

Для цитирования: Авдеев А. Н., Зотеев О. В., Сосновская Е. Л. Прогноз развития геомеханической ситуации при переходе от открытой к подземной технологии выемки крутопадающей залежи системами с обрушением горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–2. – С. 6–15. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_6.

Geomechanical situation prediction in transition from open to underground mining of steeply dipping ore body by systems with caving

A. N. Avdeev¹, O. V. Zoteev¹, E. L. Sosnovskaya¹

¹ Institute of Mining Ural branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Abstract: Bozymchak mine in Kyrgyzstan is currently transitioning from open pit to underground mining. The reserves are planned to be extracted within a limited time by sub-level caving systems. Due to the difficult geotechnical situation, there is an urgent need to analyze the geomechanical conditions in order to assess the level of danger of the existing and newly driven underground excavations. During the research, the geological conditions of the deposit and the design solutions of mining were analyzed. It is found that undermining of the pit by caving systems induces displacements and dynamic phenomena caused by the confining pressure. Mining in unstable serpentinite can cause air waves. When waste rocks are bypassed from the bottom of the pit, they are apt to arching. During extraction of the reserves from the temporary level pillar in the center of the deposit, especially on the lower horizons of the mine, there is a hazard of dynamic events generated by the confining pressure. It is found that the most dangerous elements of the geotechnology are the hanging wall, footwall and the temporary level pillar established in the center of the deposit. The recommended measures to ensure safety of mining operations include arrangement of permanent openings outside the displacement zone and implementation of geomechanical monitoring in preparatory, access and exploration drives. The internal dump in the pit can be controlled by remote surveying. When extracting reserves from the level pillar, it is advisable to undertake ground control by visual inspection and using instrumentation, to carry out destress blasting of the pillar, to monitor the lag of the lower sublevel mining front and to extract the reserves from the pillar by a single mine face. In mining operations in unstable rocks, it is recommended to localize voids by partitions made of caved gangue.

Key words: stability of stopes and pillars, rock caving systems, hybrid geotechnologies, geomechanical monitoring, induced stresses, confining pressure, displacement.

Acknowledgements: The paper was prepared within the framework of state assignment № 075–00581–19–00 on topic № 0405–2019–0007.

For citation: Avdeev A. N., Zoteev O. V., Sosnovskaya E. L. Geomechanical situation prediction in transition from open to underground mining of steeply dipping ore body by systems with caving. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):6–15. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_6.

Введение

Золото-медное месторождение Бозымчак расположено на южных склонах Чаткальского хребта, в верховьях левого притока р. Гава, Джагызурюк-сая. Рельеф местности резко расчленённый, скалистый, с абсолютными отметками от 1700 до 2500 м. Сейсмичность района оценивается до 9

баллов по шкале Рихтера. Рудное тело представлено гранато-пироксеновым и гранато-волластонитовым скарнами. В лежачем боку залегают известняки и мрамор, в висячем — гранодиориты. Породы, в основном, устойчивые, слабо трещиноватые. Наиболее неустойчивыми и трещиноватыми являются серпентиниты, расположенные в вос-

точной части месторождения. Коэффициент структурного ослабления вмещающих пород и скарнов составляет 0,4–0,5, серпентинитов — 0,1.

Породы и руды месторождения, за исключением серпентинитов, обладают высокими упругими и прочностными свойствами. Пределы прочности горных пород в образце составляют: при сжатии 110–244 МПа, на растяжение 7–16 МПа. Модуль упругости находится в диапазоне 47–77 МПа, угол внутреннего трения 33–35°, коэффициент Пуассона 0,23. Модуль деформации известняков и гранодиори-

тов в массиве равен 30 ГПа, скарнов — 60 ГПа, серпентинитов — 5 ГПа.

Залежь отработана карьером до глубин 200–250 м. В настоящее время происходит переход от открытой разработки запасов к подземной. Подкарьерные запасы Центрального участка месторождения Бозымчак планируется отработать системами подэтажного обрушения (рис. 1). Обрушение и выпуск руды подэтажами, очевидно, будет способствовать уменьшению засорения ее боковыми породами, особенно в неустойчивых породах [1]. Дно карьера проектом предусматривается

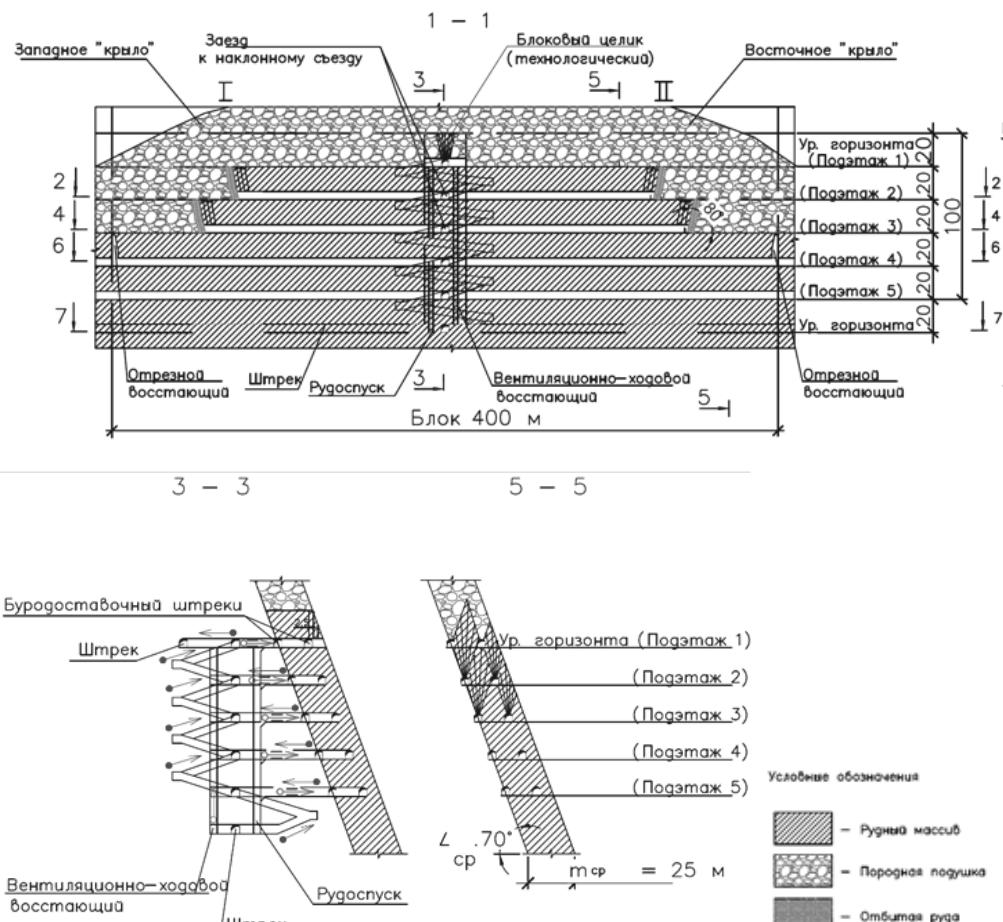


Рис. 1. Система подэтажного обрушения с торцевым выпуском руды
Fig. 1. Underfloor caving system with end discharge of ore

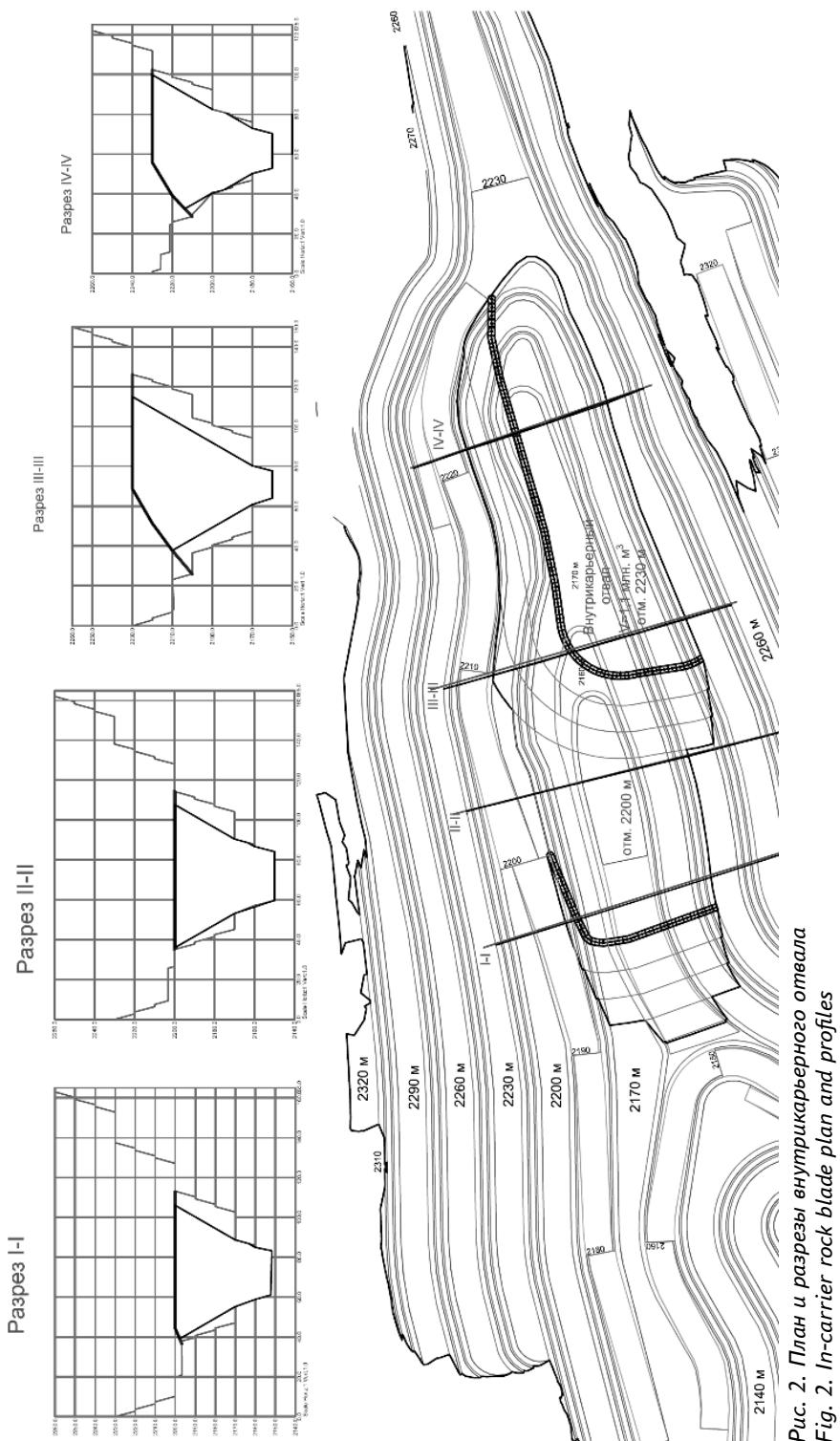


Рис. 2. План и разрезы внутреннего отвала
Fig. 2. In-carrier rock blade plan and profiles

пригружать пустой породой от вскрышных работ (рис. 2) для исключения значительных утечек воздуха при принятой схеме проветривания рудника. Дополнительно решается задача управления кровлей. Планируемый срок эксплуатации подземного рудника 10 лет.

Перед началом строительства подземного рудника руководством ООО «RAZ Minerals Bozymchar» было принято решение еще раз проанализировать проектные решения по отработке запасов и в случае необходимости разработать мероприятия по обеспечению безопасности ведения горных работ.

Методы исследований. В процессе выполнения исследований проведен анализ горно-геологических условий отработки месторождения и проектных решений по отработке запасов и выявлены наиболее опасные сценарии:

- зависание пород внутреннего отвала и задержки с обрушением вмещающих пород, что создает опасность образование воздушной волны;
- отработка запасов на уменьшающийся целик приведет к росту концентрации в нем горизонтальных напряжений, ориентированных вкрест простириания рудного тела;
- вероятность попадания вскрывающих и подготовительных выработок в зону опасных сдвигений.

Прогнозный анализ перераспределения напряжений в висячем и лежачем боках выработанного пространства и временном междублоковом целике проводился с применением метода конечных элементов [2, 3] на базе сертифицированного программного комплекса FEM, разработанного в ИГД УрО РАН. Решение задачи выполнялось в плоской линейно-упругой постановке, после чего осуществлялся переход от плоской к объемной задаче [4] с последующим анализом степени устойчивости конструктивных элементов.

Так как достоверных сведений о естественном напряженно-деформированном состоянии массива горных пород месторождений не имелось, значения первоначальных напряжений при моделировании принимались по нескольким, наиболее характерным для рудных месторождений, гипотезам горного давления: гидростатических напряжений А. Гейма, гравитационных А. Н. Динника и гравитационно-тектонических напряжений (Е. И. Шемякин, М. В. Курлена, Н. П. Влох и др.) [5 – 8 и др.].

Результаты. По результатам моделирования установлено, что в окрестности выработанного пространства и подрабатываемого карьера возникают значительные зоны высоких растягивающих напряжений. Максимальные зоны растяжения, по величине достигающие значений $+100 - 120$ МПа, отмечаются по центру висячего и лежачего боков, (рис. 3). Очевидно, что значения техногенных напряжений значительно превышают допустимые (2,8 – 8,0 МПа). Глубина разрушающегося слоя велика, она достигает значений 30 – 40 м и более. Коэффициент запаса прочности в этой области не превышает 50 % при самых благоприятных условиях. Разрушение горных пород в стенках выработанного пространства будет происходить в форме обрушений и вывалов отдельных блоков пород, что приведет к повышенному разубоживанию, нежелательным аэродинамическим процессам и в целом осложнит выемку запасов. Наличие таких протяженных зон разрушения в стенках очистных выработок при подземной отработке крутопадающих и субвертикальных залежей рудных месторождений неоднократно подтверждалось рядом исследований [7 – 10].

Напряжения во временном междублоковом целике, наоборот, сжимают-

щие по характеру, и резко увеличиваются в процессе погашения целика (рис. 4). Не исключено саморазрушение

целика, сначала в статической, а затем и в динамической, удароопасной форме, особенно на нижних гори-

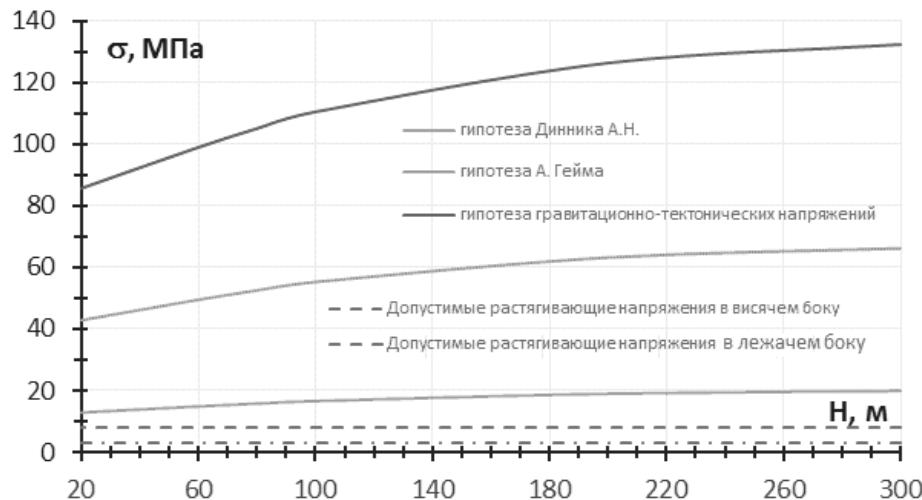


Рис. 3. Техногенные напряжения σ в бортах выработанного пространства: H – глубина горных работ, отсчитываемая от дна карьера

Fig. 3. Technogenic stresses σ in the used cavities boards: H – depth of mining operations, counted from the bottom of the pit

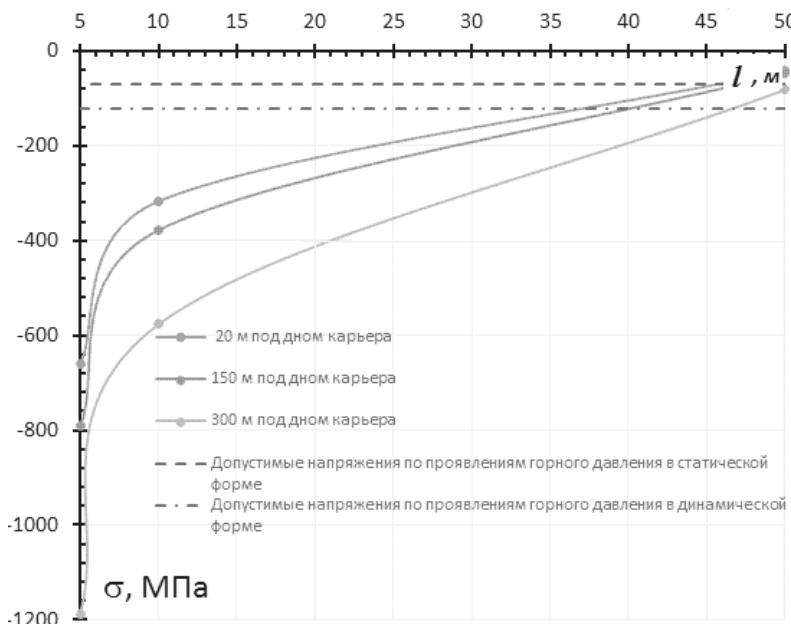


Рис. 4. Техногенные напряжения σ в уменьшающемся междублоковом целике: l – толщина целика

Fig. 4. Technogenic stresses σ in the reducing inter- cavities pillar: l – pillar thickness

зонтах рудника. Стенки выработанного пространства при погашении целика тоже находятся в неустойчивом состоянии, возможны вывалы.

Минимальные размеры устойчивого, неудароопасного, временного целика составляют 45–50 м. Очевидно, при дальнейшей доработке целика потребуются мероприятия, снижающие концентрацию техногенных напряжений. В качестве такого мероприятия предлагается разгрузка целика камуфлетным взрыванием скважин или шпурков в бортах выработанного пространства по границам целика. Следует учесть, что формирование и погашение временного целика происходит одновременно двумя подэтажами по 20 м. Поэтому для обеспечения безопасности горных работ дополнительно рекомендуется контроль отставания фронта очистных работ нижнего подэтажа.

Подработка карьера системами с обрушением, особенно в течение ограниченного срока, предусмотренного проектом, вызовет активное проявление процессов сдвижения в окрестности выработанного пространства, карьера и на дневной поверхности. Проведенный анализ проектных решений показал их обоснованность, т. е. выработки с большим сроком службы находятся за пределами расчетной зоны опасных сдвигений. Тем не менее, рекомендуется в процессе ведения горных работ организовать маркшейдерский мониторинг процессов сдвижения в горно-подготовительных и нарезных выработках, попадающих в зону опасных сдвигений. Очевидно, что в ходе мониторинга представится возможным уточнить фактические углы опасных сдвигений, проектом принятые ориентировочно, как для месторождения с неизученными процессами сдвижения [11], равными 65–70°.

Так как отработка запасов будет вестись без оставления каких-либо постоянных целиков для поддержания боковых пород и охраны капитальных выработок, проектом предусмотрено создание породной подушки из пород внутрикарьерного отвала. Породная подушка, сформированная на дне карьера, должна перекрывать все подготовительные и нарезные выработки, выходящие в выработанное пространство после выпуска отбитой руды. Учитывая переменную мощность и угол падения отрабатываемого рудного тела, а также расчетную высоту столба перепуска породной подушки 67–150 м, возможны зависания перепускаемых пород [12]. Для предотвращения вредных последствий рекомендуется производить контроль состояния перепускаемого отвала дистанционными маркшейдерскими методами с борта карьера [12–14].

Также для предотвращения зависаний обрушенной массы рекомендуется на начальных этапах отработки месторождения обурить и взорвать на зажатую среду массив висячего бока из вентиляционных и разведочных выработок (штольни 4, 6, 13, 17 и проч.), обеспечив тем самым дополнительный объем обрушенных пород, который при отработке верхних подэтажей надежно перекроет обрушающую руду.

При выемке запасов в неустойчивых серпентинитах в восточной части месторождения возможны проявления горного давления в виде воздушной волны вследствие задержки процесса обрушения. Для предотвращения вредных последствий воздушного удара необходимо осуществлять локализацию выработанного пространства формированием перемычки в подходных выработках завалом — обрушенными породами толщиной не менее 2 м.

Выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований руководству рудника предложен ряд мероприятий по обеспечению безопасности горных работ от вредных процессов сдвижения и горного давления при переходе на подземную разработку системами с обрушением.

Необходима организация мониторинга за развитием процесса сдвижения и процессом перепуска внутреннего отвала вскрышных пород в выработанное пространство.

Для предотвращения негативных явлений в случае зависания перепускаемых пород отвала в выработанное пространство рекомендуется на начальных этапах отработки месторождения обурить и взорвать на зажатую среду массив висячего бока из вентиляционных и разведочных выработок, обеспечив тем самым дополнительный объем обрушенных пород, который при отработке верхних подэтажей надежно перекроет обрушающуюся руду.

В случае обнажения подэтажных выработок верхних подэтажей в них необходимо строительство породных перемычек для предотвращения распространения воздушной волны.

Необходим оперативный контроль изменения напряженного состояния междублокового целика по мере погашения запасов подэтажей, например с помощью метода акустической эмиссии [15]. В случае возникновения признаков динамического проявления горного давления необходимо провести разгрузку целика камуфлетными скважинами, проходимыми по его границе с вмещающими породами.

По результатам проведенных исследований разработан и внедрен комплекс нормативных документов на руднике, в том числе технологический регламент по выбору типов и параметров крепей, технологии их возведения; инструкция по выявлению первичных признаков возможных динамических проявлений горного давления; инструкция по управлению горным давлением при ведении горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods : The Underlying Concepts.* — Queensland : The University of Queensland, 2017. — 282 p.
2. *Wilhelm Rust. Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics/ Switzerland: Springer International Publishing.* 2015. 363 p.
3. *M Moatamed, Hassan A. Khawaja. Finite Element Analysis.* Boca Raton: CRC Press. 2018. 154 p.
4. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.
5. Влох Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н. П. Влох. — М.: Недра, 1994. — 208 с.
6. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В. П. Неганова. М.: Недра, 1995. 336 с.
7. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений / Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2016. № 2. — С.74—85.
8. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia (in eng.) / Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 5. С. 21—29.
9. Павлов А. М. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 128 с.

10. Повышение эффективности подземной разработки золоторудных месторождений Восточной Сибири / Павлов А. М., Федоляк А. А. // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 4 (65). С. 97 – 106
11. Временные правила охраны сооружений, природных объектов и горных выработок от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород. — Л.: ВНИМИ, 1986. — 74 с.
12. Анализ процесса оседаний породной подушки при отработке запасов западного рудного тела трубы «Удачная» по системе с обрушением / Бокий И. Б., Зотеев О. В., Пуль В. В. // Горный журнал. 2019. № 2. С. 43 – 47.
13. Проведение комплексного геомеханического мониторинга в условиях комбинированной разработки месторождения. Князев Д. Ю., Ефремов Е. Ю., Желтышева О. Д., Харисов Т. Ф., Турсуков А. Л. В сборнике: Проблемы комплексного освоения георесурсов Материалы VI Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых. 2017. С. 41 – 49.
14. Ghabraie B., Ren G., Smith J., Holden L. Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. P. 219 – 230.
15. Zang L., Ma S., Ren M., Jiang S., Wang Z., Wang J. Acoustic emission frequency and b value characteristics in rock failure process under various confining pressures/ Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao. 2015. №10. pp.2057 – 2063. ГИАБ

REFERENCES

1. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on Caving Mining Methods : The Underlying Concepts. Queensland : The University of Queensland, 2017. 282 p.
2. Wilhelm Rust. Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics/ Switzerland: Springer International Publishing. 2015. 363 p.
3. Moatamedi M., Hassan A. Khawaja. Finite Element Analysis. Boca Raton: CRC Press. 2018. 154 p.
4. Zubkov A. V. *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and Geotechnology]. Ekaterinburg: Uro RAS, 2001. 335 p. [In Russ]
5. Vlokh N. P. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnyh rudnikah* [Rock pressure control at underground mines]. Moscow: Nedra Publishing; 1994. 208 p.[In Russ]
6. Neganov, V. P., Kovalenko V. I., Zaitsev, B. M., Sosnowski, L. I. *Tekhnologiya razrabotki zolotorudnyh mestorozhdenij* [Technology of the gold fields mining]. Under the editorship of V. P. Neganov. Moscow: Nedra Publishing, 1995. 336 p. [In Russ]
7. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. The forecast of potential rock bump hazard of steeply pitching lode gold ore deposits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2016; 2: 74 – 85. [In Russ]
8. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2019. no. 2. pp. 74 – 85. (In Eng.)
9. Pavlov A. M. *Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnoj razrabotki zhil'nyh mestorozhdenij zolota* [Improvement the technology of gold deposits underground mining]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 2013, 128 p. [In Russ]
10. Pavlov A. M., Fedolyak A. A. Increase of efficiency of gold deposits underground mining at Eastern Siberia. *Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits.* Vol.41. 4 (65). P. 97 – 106. (2018) [In Russ]

11. *Vremennye pravila ohrany sooruzhenij, prirodnyh ob»ektov i gornyh vyrabotok ot vrednogo vliyanija podzemnyh gornyh razrabotok mestorozhdenij rud cvetnyh metallov s neizuchennym processom sdvizheniya gornyh porod* [Temporary Rules of Protection of Structures, Natural Objects and Minings from the Harmful Influence of Underground Mining of Non-Ferrous Metal Ores Deposits with unexplored Process of Rock Shifting]. Leningrad: VNIMI, 1986. 74 p. [In Russ]
12. Bokiy I. B., Zoteev O. V., Pul V. V. Analysis of the rock cushion settling process during mining of the western ore body of the “Udachnaya” tube by the system with a rock caving. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019. no. 2. P. 43 – 47. (In Eng.) [In Russ]
13. Knyazev D.Yu., Efremov E.Yu., Zheltysheva O. D., Kharisov T. F., Tursukov A. L. *Provedenie kompleksnogo geomekhanicheskogo monitoringa v usloviyah kombinirovannoj razrabotki mestorozhdeniya* [Conducting complex geomechanical monitoring under combined mining conditions]. Problems of complex development of georesources. Materials of VI All-Russian scientific conference with participation of foreign scientists. 2017. pp. 41 – 49 [In Russ]
14. Ghabraie B., Ren G., Smith J., Holden L. Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 80. pp. 219 – 230.
15. Zang L., Ma S., Ren M., Jiang S., Wang Z., Wang J. Acoustic emission frequency and b value characteristics in rock failure process under various confining pressures. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao*. 2015. no.10. pp. 2057 – 2063.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Авдеев Аркадий Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: avdeev0706@mail.ru;
Зотеев Олег Вадимович – докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: zoteev.o@mail.ru;
Сосновская Елена Леонидовна – канд. геол.-минер. наук, старший научный сотрудник;
¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской Академии Наук (ИГД УрО РАН), Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Avdeev A. N., Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Worker, e-mail: avdeev0706@mail.ru;
Zoteev O. V., Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Principal scientist, e-mail: zoteev.o@mail.ru;
Sosnovskaya E. L., Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Senior Research Worker;
Institute of Mining of the Ural Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 15.02.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 15.12.2020; received after the review 15.02.2021; accepted for printing 10.04.2021.

