

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ВЕДЕНИИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ НА КОММУНАРОВСКОМ РУДНИКЕ

Башев Е.Е., Шушаков Е.А., Анушенков А.Н.

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Ключевые слова: месторождение полезных ископаемых, горный удар, система разработки, геомеханика, методы оценки и прогноз удароопасности на месторождении, геотехнология, напряженно-деформированное состояние массива.

Аннотация. При комбинированной разработке месторождений полезных ископаемых возникает необходимость улучшения безопасности условий ведения подземных горных работ. С переходом на большую глубину подземной разработки на Коммунарском месторождении при его сложных горно-геологических и горнотехнических условиях существенно увеличиваются размеры зон опорного давления в окрестностях очистных выработок, что в свою очередь ведет за собой детальное наблюдение за состоянием массива с помощью современных технологий, программного обеспечения и принятие соответствующих мер по его разгрузке и управлению. Актуальность данной статьи заключается в том, что в современной технологии ведения подземных горных работ, которые зачастую ведутся в сложных условиях разработки, требуются современные подходы в вопросе управления состоянием массива горных пород при подземной разработке месторождений.

MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A ROCK MASS DURING UNDERGROUND MINING OPERATIONS AT THE KOMMUNAROVSKIY MINE

Bashev E.E., Shushakov E.A., Anushenkov A.N.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Keywords: mineral deposit, mining impact, development system, geomechanics, methods of assessment and prediction of impact resistance at the deposit, geotechnology, stress-strain state of the massif.

Abstract. During the combined development of a mineral deposit, there was a need to improve the safety of underground mining conditions. With the transition to a greater depth of underground mining at the Kommunarovskoye field, under its difficult mining, geological and mining engineering conditions, the size of the reference pressure zones in the vicinity of the treatment workings significantly increases, which in turn leads to detailed monitoring of the condition of the massif using modern technologies, software and appropriate measures for its unloading and management. The relevance of this article lies in the fact that modern technology of conducting underground mining operations, which are often carried out in difficult mining conditions, requires modern approaches to managing the state of the rock mass during underground mining.

Введение

Коммунарское золоторудное месторождение расположено в горной системе Кузнецкого Алатау на его юго-восточном склоне. Административно месторождение расположено на территории Ширинского района Республики Хакасия в 2 км юго-западнее поселка Коммунар (рис. 1). Географические координаты: 54°18' – 54°21' СШ, 89°14' – 89°07' ВД.

Коммунарское месторождение является частью Коммунарского рудного поля, продуктивная часть которого представляет собой полосу северо-западного направления шириной до 700 м и длиной до 2,5 км, приуроченную к эндо- и экзоконтакту Калиостровского выступа Солгонского диорит-гранодиоритового массива девонского возраста [1-3].

Главные реки – Енисей, его левый приток Абакан, а также Томь, Белый и Черный Июс (бассейн Оби). Воды почти всех рек используются для орошения. Многочисленные озера с пресной (Черное, Фыркал, Иткуль и др.) и соленой (Беле, Ши́ра и др.) водой располагаются в Чулымо-Енисейской котловине [1-4].

Район Коммунарского рудного поля расположен в 40 км восточнее Кузнецко-Алатаусского разлома, характеризуется обилием интрузивов различных морфологических

форм, наличием эффузивных и карбонатных толщ, сложным узором тектонических разрывов разной ориентированности и разного порядка. Господствующие направления – северо-западное, меридиональное и северо-восточное [1-4].

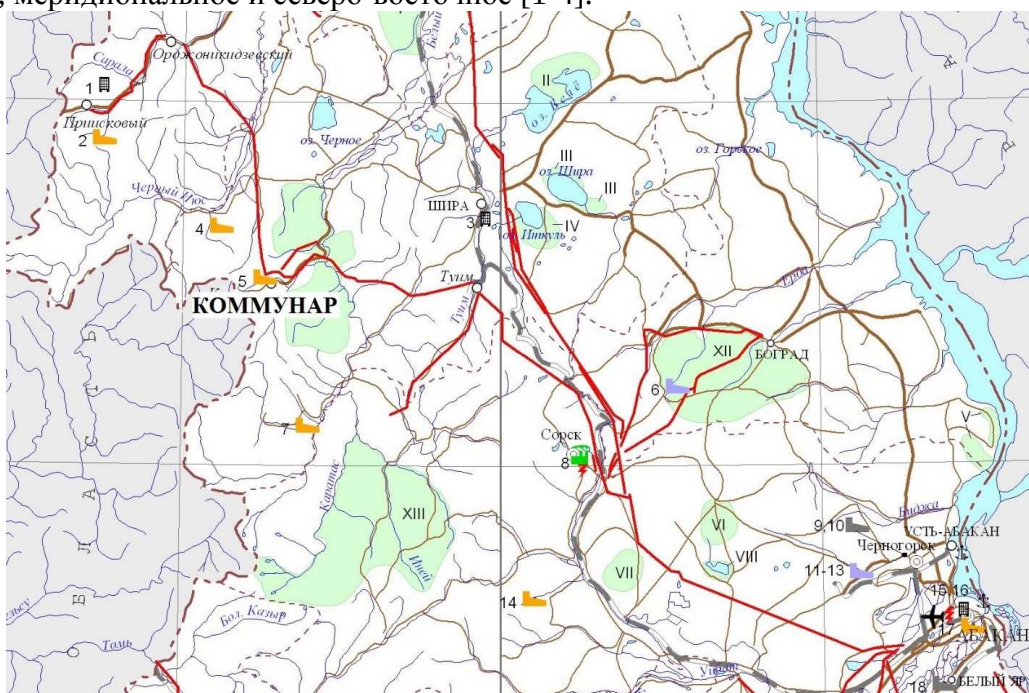


Рис. 1. Обзорная карта района Коммунарского месторождения

В районе месторождения выделяется несколько структурных блоков: в северной части района – Чебатковско-Тарчинский блок; южнее – Знаменитовский структурно-тектонический блок, который в свою очередь разбит на более мелкие блоки (Спасский, Попутно-Ивановский, Никольско-Знаменитовский); Коммунарский.

Технология ведения подземных горных работ

Вскрытие

Вскрытие запасов месторождения Коммунарское, принятых к отработке подземным способом, представлено штольным вскрытием с применением рельсового транспорта, а также самоходного оборудования после проходки транспортного уклона с поверхности [1-4].

В настоящее время в подземном руднике Коммунарский существует два действующих подъема.

1. Клетевая подъемная установка ствола с двухбарабанной подъемной машиной 2БМ-2500/1230-2А оборудована двухклетевым подъемом и служит для спуска-подъема людей, мелкого оборудования и материалов между штольями.

2. Клетевая подъемная установка с однобарабанной подъемной машиной Ц-1.6х1.2АР оборудована одноклетевым подъемом с противовесом и служит для спуска-подъема людей, мелкого оборудования и материалов между штольями [1-4].

Система разработки

На основании анализа горно-геологических (физико-механические свойства руд и вмещающих пород, угол падения и мощность рудных тел) и горнотехнических (высота этажа, схема вскрытия, схема транспортирования) условий с учетом опыта Коммунарского рудника для отработки рудных тел приняты следующие системы разработки:

- система с магазинированием руды (рис. 2);
- этажно-камерная система разработки (рис. 3);
- поэтажно-камерная система разработки (рис. 4).

Очистные работы в блоке начинаются после выполнения в нем всего объема горно-подготовительных и нарезных работ. Очистные работы на руднике ведутся в направлении сверху-вниз [5].

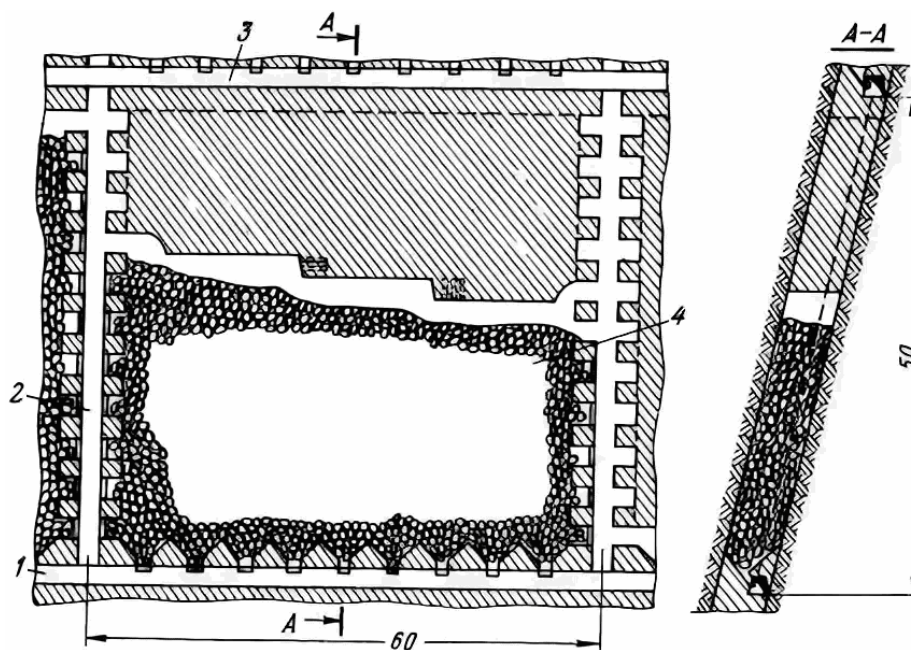


Рис. 2. Системы разработки с магазинированием руды: 1 – откаточный штрек, 2 – восстающий, 3 – вентиляционный штрек, 4 – отбитая руда

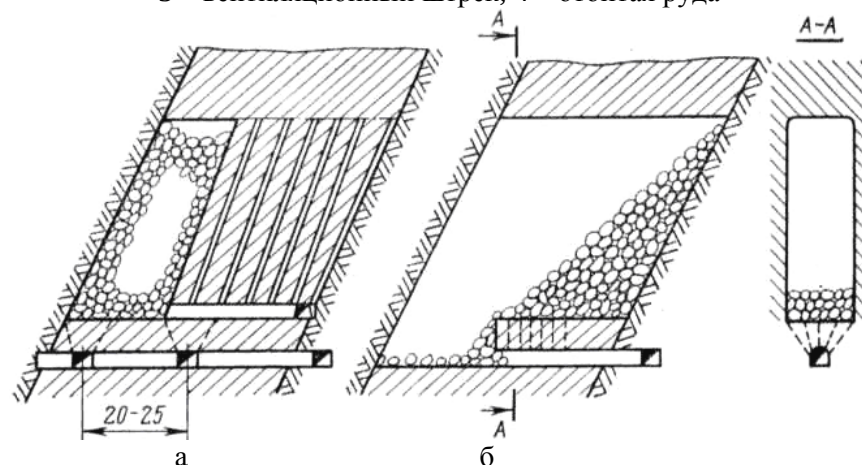


Рис. 3. Этажно-камерная система разработки: а – отбойка и частичный выпуск руды, б – общий выпуск

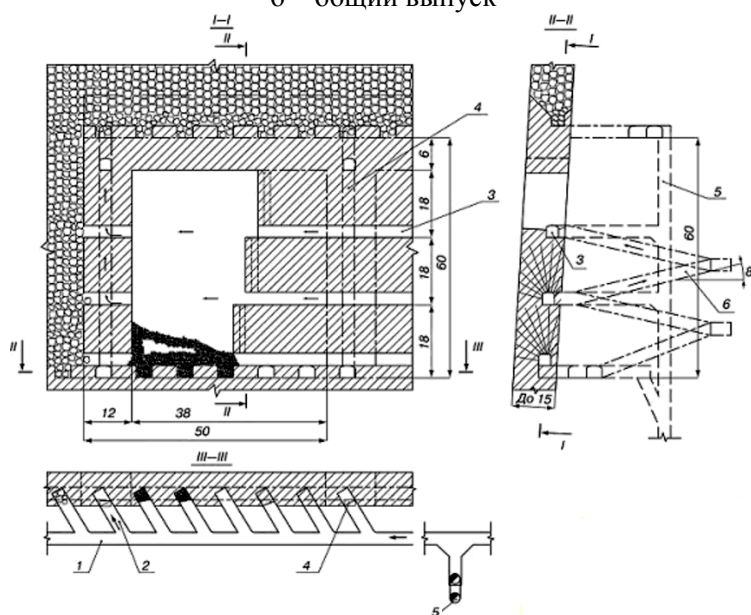


Рис. 4. Подэтажно-камерная система разработки: 1 – доставочный штрек; 2 – погрузочный заезд; 3 – подэтажный штрек; 4 – блоковый восстающий; 5 – рудопуск; 6 – автотранспортный заезд (уклон)

Моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива при проведении одиночных горных выработок и системы разработки

Для проведения численного моделирования и оценки состояния массива горных пород Коммунарковского месторождения используется метод конечных элементов [6-9] и программное обеспечение Phase 2(RS2).

На рисунке 5 представлен пример моделирования напряжения при проведении одиночной горной выработки в неизрезанном участке массива, находящейся за зоной влияния очистных работ. По рисунку 5 можно наблюдать, что зона концентрации напряжений локализуется в бортах горной выработки, это связано с естественным полем напряжений в массиве. При преобладающих вертикальных напряжениях кровля и почва горной выработки будут являться зонами разгрузки, а борта – зонами концентрации напряжений. Вследствие этого динамические проявления горного давления будут чаще регистрироваться в бортах выработки [10-12].

В условиях Коммунарковского месторождения горные выработки проходят в благоприятных горно-геологических и горно-технических условиях, массив горных пород сложен из слаботрециноватых монолитных пород, вследствие этого главную угрозу представляют напряжения, возникающие в массиве.

Так как горная выработка приходит в неустойчивое положение в результате возникновения в массиве напряжений, способных вызвать статическое (смещение массива) или динамическое (микроудар, горный удар, горно-тектонический удар) разрушение, следует оценивать безопасность ведения подземных горных работ по силе напряжений, смещений, возникающих в массиве [13, 14].

Для этого, согласно «Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правилам безопасности при ведении горных работ...» [10], напряжения в массиве (σ_k) не должны превышать 80% от предела прочности пород на сжатие. Если данный показатель превышен, месторождение считается удароопасным, и вследствие этого возникают дополнительные угрозы ведения горных работ.

Результаты расчета напряжений представлены в таблице 3.

По результатам моделирования напряженного состояния массива в приконтурной зоне горной выработки не выявлено напряжений, способных оказывать негативное влияние на безопасность горных работ.

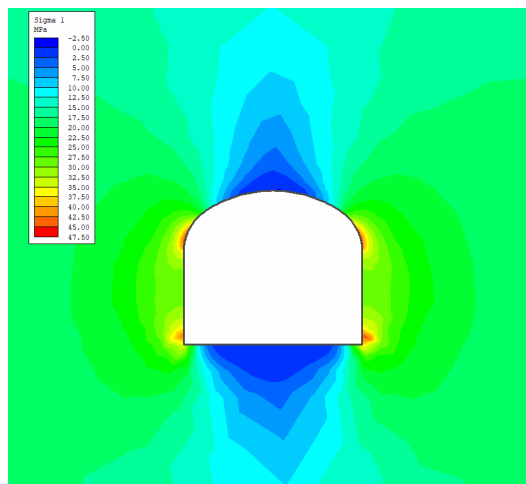


Рис. 5. Результаты моделирования напряженного состояния массива в приконтурной части горной выработки

Табл. 3. напряжения в массиве на контуре горных выработок

Сечение	Максимальные сжимающие напряжения σ_k , МПа	Оценка устойчивости
1-1	46,0	устойчиво
2-2	46,5	устойчиво
3-3	45,5	устойчиво
4-4	45,8	устойчиво
5-5	45,7	устойчиво
6-6	45,9	устойчиво
7-7	45,4	устойчиво
8-8	45,5	устойчиво

На рисунке 6 представлен пример моделирования смещений в горных выработках, на котором можно наблюдать, что зона концентрации смещений локализуется в почве и кровле

горной выработки. Результатом смещения пород в почве выработки является пучение, при незначительном пучении оно не оказывает влияния на безопасность ведения работ. В случае сильного смещения в почве горной выработки проводятся мероприятия по зачистке почвы, и негативный эффект устраняется. Смещения в кровле приводят к изменению параметров горной выработки и при незначительном смещении не оказывают большого влияния на безопасность работ (табл. 4).

По результатам моделирования смещений массива в зоне влияния горной выработки не выявлено смещений, способных оказывать негативное влияние на безопасность горных работ.

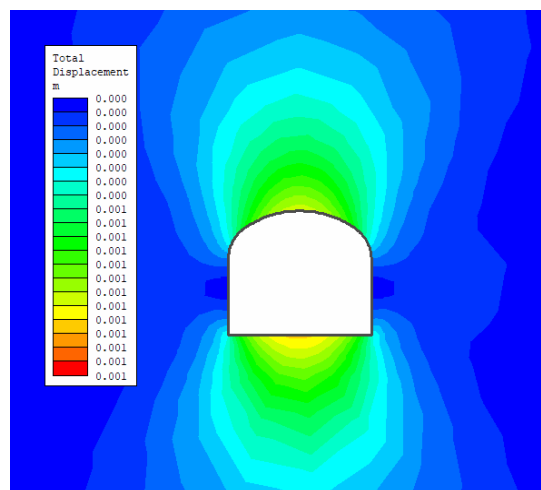


Рис. 6. Результаты моделирования смещения массива в приконтурной части горной выработки

Табл. 4. Смещения в массиве на контуре горных выработок

Сечение	Максимальные смещения, м	Оценка устойчивости
1-1	0,0011	устойчиво
2-2	0,0010	устойчиво
3-3	0,0009	устойчиво
4-4	0,0009	устойчиво
5-5	0,0008	устойчиво
6-6	0,0007	устойчиво
7-7	0,0006	устойчиво
8-8	0,0006	устойчиво

Закключение

По результатам проведения математического моделирования методом конечных элементов с использованием программного обеспечения RS2 авторами не были выявлены значительные риски, угрожающие ведению горных работ, связанные с напряженно-деформированным состоянием массива.

Математическое моделирование является полезным инструментом для определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, но не является базовым, и должно производиться сравнение с базовым методом и фактической геомеханической ситуации на руднике. Для уточнения безопасности ведения горных работ необходимо провести дополнительные исследования оценки удароопасности методом дискования керна, уточнение физико-механических свойств массива, доизучение параметров природного поля напряжения, проведение обратных расчётов.

В процессе ведения горных работ по мере изменения конъюнктуры, получение новых данных о состоянии массива и распределения параметров природного поля напряжений возможна корректировка безопасности ведения горных работ на подземном руднике «Коммунарковский».

Список литературы

1. Егоров П.В., Колмаков В.А. Оценка напряжённого состояния гранитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. – №3. – С. 107-110.
2. Асаченков Л.М. Маркшейдерские работы при строительстве и реконструкции шахт. Учебное пособие для техникумов. – М.: Недра, 1987. – 199 с.
3. Гелескул М.И., Усап-Подгорнов Б.М. Поддержка горных выработок. – М.: Недра, 1973. – 256 с.
4. Каспарян Э.В. Устойчивость горных выработок в скальных породах. – Л.: Наука, 1985.– 183 с.
5. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, объектах строительства подземных сооружений, склонных и опасных по горным ударам (РД 06-329-99). Серия 06.

Выпуск 1 / Колл. авт. – 2-е изд. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 88 с.

6. Протосеня А.Г., Беляков Н.А., Буслова М.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 619-627.
7. Конурин А.И., Неверов С.А., Неверов А.А., Щукин С.А. К проблеме численного моделирования напряженно-деформированного состояния и устойчивости трещиноватого массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, №2. – С. 144-150.
8. Еременко В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы рудника при соосной отработке трех этажей камерной системой разработки (в программном комплексе Map3D) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №11. – С. 5-17.
9. Журавков М.А., Николайчик М.А., Климкович Н.М. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива при ведении горных работ вблизи шахтного ствола // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 38. – С. 30-38.
10. Приказ от 8 декабря 2020 г. №505 об Утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=384179>.
11. СНиП-7-81. Строительство в сейсмических районах. – М.: ФГУП ЦПП, 2007. – 44 с.
12. Турчанинов И.А., Иосиф М.А., Каспарян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1977. – 503 с.
13. Агошков М.И. Разработка рудных и нерудных месторождений: учебник для горных. – М.: Недра, 1983. – 424 с.
14. Червяк И.Л., Ярунин С.А. Управление состояние массива горных пород. – М.: Недра, 1995. – 395 с.

References

1. Egorov P.V., Kolmakov V.A. Assessment of the stress state of granites // Physico-technical problems of mining. 1983, no. 3, pp. 107-110.
2. Asachenkov L.M. Surveying work during the construction and reconstruction of mines. Training manual for technical schools. – M.: Nedra, 1987. – 199 p.
3. Geleskul M.I., Usap-Podgornov B.M. Support of mining operations. – M.: Nedra, 1973. – 256 p.
4. Kasparyan E.V. Stability of mine workings in rocks. – L.: Science, 1985. – 183 p.;
5. Instructions on the safe conduct of mining operations at ore and non-metallic deposits, underground structures construction sites, prone and dangerous to mining impacts (RD 06-329-99). Series 06. Issue 1 / Coll. auth. – 2nd ed. – M.: State Unitary Enterprise "Scientific and Technical Center for Industrial Safety of Gosgortekhnadzor of Russia", 2003. – 88 p.
6. Protosenya A.G., Belyakov N.A., Bouslova M.A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 262, pp. 619-627.
7. Konurin A.I., Neverov S.A., Neverov A.A., Shchukin S.A. Problem of numerical modeling of stress-strain state and stability of fractured rock mass // Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 144-150.
8. Eremenko V.A. Stress state modeling of coaxial three-level open stoping in Map3D // Mining information and analytical bulletin. 2018, no. 11, pp. 5-17.
9. Zhuravkov M.A., Nikolaichik M.A., Klimkovich N.M. Assessment of the stress-strain state of a rock mass during mining operations near a mine shaft // Theoretical and Applied Mechanics: an international scientific and technical collection. – Minsk: BNTU, 2023. – Iss. 38. – P. 30-38.
10. Order No. 505 dated December 8, 2020 on approval of federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for mining and processing of solid minerals" [Electronic resource] – Access mode: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=384179>.
11. SNIP-7-81. Construction in seismic areas. – M.: FSUE TSPP, 2007. 44 p.
12. Turchaninov I.A., Iosif M.A., Kasparyan E.V. Fundamentals of rock mechanics. – L.: Nedra, 1977. – 503 p.
13. Agoshkov M.I. Development of ore and non-metallic deposits: textbook for mining. – M.: Nedra, 1983. – 424 p.
14. Chervyak I.L., Yarinin S.A. Management of the state of the rock mass. – M.: Nedra, 1995. – 395 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Башев Егор Евгеньевич – аспирант	Bashev Egor Evgenievich – postgraduate student
Шушаков Егор Анатольевич – аспирант	Shushakov Egor Anatolievich – postgraduate student
Анушенков Александр Николаевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Подземной разработки месторождений»	Anushenkov Aleksandr Nikolaevich – doctor of technical sciences, head of the Department of underground mining
bashev_egor@mail.ru	

Получена 26.11.2025