

DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.1.42-49

УДК 622.831

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕР И ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЖДАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

М. С. Кулькова

ФГБУН Горный институт КНЦ РАН

Аннотация

Эксплуатация Ждановского месторождения ведется с применением нескольких систем разработки в зависимости от горно-геологических условий. Так, в 2016 г. запасы Центрального рудного тела обрабатывались с помощью двух систем разработки: с подэтажным обрушением и с открытым очистным пространством. Применение системы разработки с открытым очистным пространством обуславливает проблему определения оптимальных размеров камер и целиков с точки зрения безопасности и эффективности горных работ. Для определения оптимальных параметров камер и целиков применялся аналитический метод с использованием методики ВНИМИ. Для исследований напряженно-деформированного состояния массива в районе проектного положения камер применялся метод численного моделирования в двумерной упругой постановке, реализованный с помощью метода конечных элементов. Определено, что рассчитанные параметры являются оптимальными с точки зрения безопасности и эффективности горных работ.

Ключевые слова:

Ждановское месторождение, численное моделирование, оптимальные размеры камер и целиков.

THE ANALYTICAL AND NUMERICAL RESEARCH METHODS FOR DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF STOPES AND PILLARS DURING THE ZHDANOVSKOE DEPOSIT MINING

Maria S. Kulkova

Mining Institute of KSC RAS

Abstract

The Zhdanovskoe deposit is developed by several mining methods depending on mining and geological conditions. In 2016 the reserves of the Central ore body were developed by the sublevel caving and stoping mining methods. The applying of the stoping method causes a task of determining the optimal sizes of stopes and pillars in terms of safety and the effectiveness of mining. The analytical method with the VNIMI guidance was implemented to determine the optimal parameters of stopes and pillars. The rock mass stress-strain state in vicinity of the stopes was studied with 2D numerical modelling in elastic conditions. The numerical modelling was implemented with a finite element method. It has been determined that the calculated parameters are optimal in terms of the safety and the effectiveness of mining.

Keywords:

Zhdanovskoe deposit, numerical modelling, optimal sizes of stopes and pillars.



Введение

Месторождение Ждановское расположено в Печенгском районе Мурманской обл. и содержит один из крупнейших запасов медно-никелевых руд в России. Месторождение обрабатывается подземным рудником «Северный» АО «Кольская ГМК». В отработку вовлечено шесть рудных тел: Юго-Западное, Западное, Центральное, Восточное, Юго-Восточное и Южное рудные тела [1]. Наиболее крупным по запасам и мощности является Центральное рудное тело (ЦРТ). Оно имеет юго-западное падение под углом

от 32° до 75°, средний угол падения — 51°, истинная мощность колеблется от 1 до 90 м и составляет в среднем 33 м. Вдоль всего лежачего бока массива простирается тектоническая зона, выполненная брекчиевидными рудами, вкрапленное оруденение занимает доминирующее положение в массиве.

В 2016 г. на горизонте –310 м ЦРТ проектом была запланирована отработка части запасов рудного тела с использованием системы с камерно-целиковым порядком отработки запасов [2]. В этом случае отработка запасов ведется в пределах этажей высотой 60 м камерами с оставлением временных междукамерных (МКЦ) и межэтажных целиков (МЭЦ). В пределах камеры выемка запасов осуществляется подэтажами высотой от 15 до 30 м [3]. Устойчивость целиков и вмещающих пород обеспечивается параметрами системы — пролетом камер и размерами целиков [4].

В связи с интенсивной отработкой запасов рудных тел и значительным увеличением глубины горных работ, происходит ухудшение геологических и горнотехнических условий разработки Ждановского месторождения. Таким образом, возникает необходимость изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождения и более тщательной оценки параметров камер и целиков, при которых они остаются устойчивыми.

Методы исследования

На горизонте –310 м ЦРТ проектом было определено местоположение пяти камер, находящихся на противоположных флангах рудного тела — западном и восточном. На западном фланге расположены камеры К27 и К29, на восточном — камеры К(-7), К(-9) и К(-11). Их местоположение показано на рис. 1, а, б.

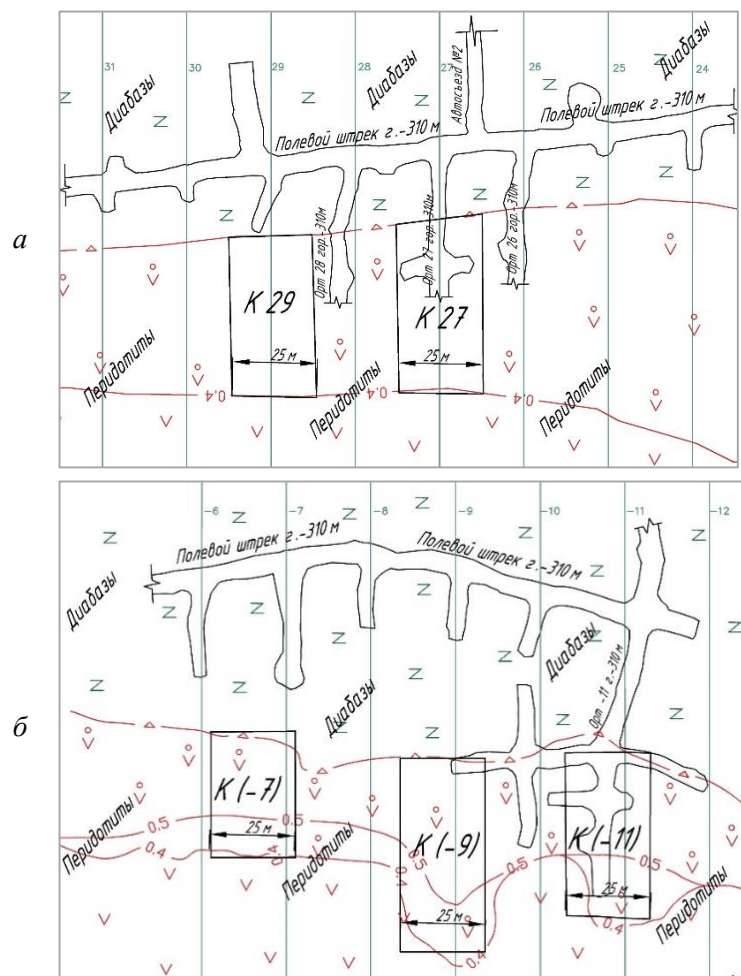


Рис. 1. Местоположение камер К27 и К29 (а) и К(-7), К(-9) и К(-11) (б) (в плане, гор. –310)

Fig. 1. The location of rooms K27 and K29 (a), K(-7), K(-9) and K(-11) (b) (in the plan, level –310)

Для определения безопасных размеров камер и междукамерных целиков применялся аналитический метод исследования. Сущность метода заключается в расчете требуемых параметров на основе методик, зарекомендовавших себя многолетним опытом применения при отработке запасов рудных тел на различных рудниках [5]. На данном этапе выполнялся расчет максимального допустимого пролета камер (b_{\max}) и максимального значения ширины целиков (a) на основании методики ВНИМИ. Значения b_{\max} и a определялись на основе параметров камер, заданных при проектировании.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в районе камер применялся метод численного моделирования [6, 7]. Исследования проводились для условий упругого изотропного массива горных пород в двухмерной постановке с помощью метода конечных элементов [8].

Были созданы две плоские модели. Для оценки устойчивости междукамерного целика рассматривалось вертикальное сечение по простиранию рудного тела. Схемы моделей представлены на рис. 2 (а и б), на котором показаны: область моделирования, камеры, целики, очистное пространство, геологическое строение и граничные условия.

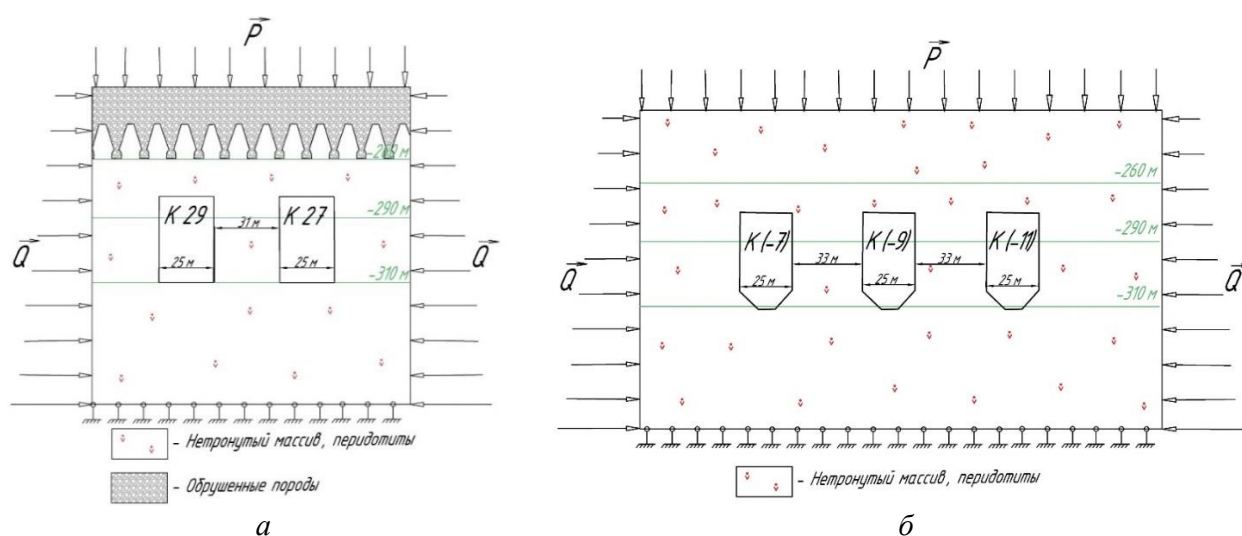


Рис. 2. Схема модели в области камер K27 и K29 (а) и K(-7), K(-9) и K(-11) (б)

Fig. 2. The model diagram near the rooms K27, K29 (a) and K(-7), K(-9) and K(-11) (b)

Физико-механические свойства пород

Physical and mechanical properties of the rocks

Породы и руды Host rocks and ores	Плотность, т/м ³ Density, t/m ³	Коэффициент Пуассона Poisson ratio	Модуль упругости, ГПа Young's modulus, GPa
Вкрапленные руды (рудное тело) Porphyry ore	2,94	0,32	71
Диабазы Diabase	2,85	0,31	71
Перидотиты Peridotite	2,95	0,31	79

При задании граничных условий рассматривалось действие только веса вышележащих пород, при этом были заданы составляющие: вертикальная ($P = \gamma \cdot H$) и горизонтальная $Q = (\gamma \cdot H \cdot \xi)$, где γ — вес пород, H — глубина, ξ — коэффициент бокового отпора.

Физико-механические свойства пород представлены в таблице. Породы в районе камер прочные — с минимальным пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} \approx 100$ МПа и минимальным пределом прочности на растяжение $\sigma_p \approx 10$ МПа. В результате моделирования было получено поле напряжений в окрестности запланированных камер.

Результаты

Параметры камеры определяются ее размерами по длине l — вкрест простирания рудного тела, по ширине b — по простиранию рудного тела и по высоте h . Размеры камеры по длине ограничены контактами рудного тела. В районе камер К27 и К29 мощность рудного тела в горизонтальной плоскости достигает 50 м, в районе камер К(-7), К(-9) и К(-11) мощность рудного тела равна 45 м. Таким образом, для расчетов принимается размер камер по длине 50 и 45 м соответственно.

Исходя из технологических условий отработки запасов ЦРТ была предложена ширина камер b , равная 25 м. Для оценки данного параметра с точки зрения безопасности и устойчивости обнажения пород определен максимальный допустимый пролет b_{max} , который будет ограничивать возможную ширину камеры. При этом необходимым является условие отсутствия людей в очистном пространстве.

Устойчивость обнажений зависит от степени нарушенности пород и характеризуется параметром устойчивости z . Породы Центрального рудного тела характеризуются средней устойчивостью — параметр $z = 10-13$, однако для более консервативной оценки b_{max} и из соображений безопасности принимается заниженный параметр $z = 9$, характерный для слабоустойчивых пород.

По известным величинам z и l , найден максимальный допустимый пролет камеры по следующей формуле

$$b_{max} = \frac{2zl}{l - 2z}. \quad (1)$$

Подставив значения $z = 9$ и $l = 50$ и 45 м соответственно в формулу (1), получим значение b_{max} для камер К27, К29 — 28,1 м, для камер К(-7), К(-9) и К(-11) — 30 м. Таким образом, предложенный размер $b = 25$ м находится в пределах допустимого значения пролета камеры, поэтому ширина всех камер принимается равной 25 м.

Для дальнейших расчетов необходимо определить высоту камер h . Так как по технологическим условиям максимально возможная высота камер составляет 40 м, то параметр h принимается равным 40 м.

Значение минимальной ширины целика (a) определено на основе методики ВНИМИ [4]. Согласно «Методическим указаниям...», условие прочности при расчете рудных целиков можно записать следующим образом:

$$\frac{K_H \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H(a+b)}{a} = \frac{K_{осл} \cdot K_{\phi 1} \cdot K_{\phi 2} \cdot K_D \cdot \sigma_{сж}^0}{K_3}, \quad (2)$$

где K_H — коэффициент, учитывающий влияние размеров обрабатываемого участка; K_a — коэффициент, учитывающий влияние угла падения рудного тела; γ — удельный вес пород; H — глубина разработки; $K_{осл}$ — коэффициент структурного ослабления; $K_{\phi 1}$, $K_{\phi 2}$ — коэффициенты, учитывающие влияние отношения длины к ширине целика и ширины к высоте целика соответственно; K_D — коэффициент, учитывающий влияние времени; $\sigma_{сж}^0$ — прочность породы в образце; K_3 — коэффициент запаса прочности; a — ширина целика; b — ширина камеры.

Пусть

$$q = \frac{K_H \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot K_3}{K_{осл} \cdot K_D \cdot \sigma_{сж}^0}. \quad (3)$$

Учитывая, что при данных условиях $K_{\phi 1} = 1$ и $K_{\phi 2} = 0,6 + 0,4 a/h$, выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$q \frac{(a+b)}{a} = 0,6 + 0,4 \frac{a}{h}, \quad (4)$$

где h — высота целика, равная высоте камеры, b — ширина камеры.

При решении уравнения (4) относительно параметра a получено:

$$a = 1,25h(q - 0,6) + \sqrt{(1,25h(q - 0,6))^2 + 2,5hqb}. \quad (5)$$

Далее определялись значения коэффициентов и других параметров в выражении (2).

Коэффициент K_H принимается равным 0,7, так как ширина обрабатываемого участка рудного тела L меньше глубины отработки H , то есть $L/H < 0,8$.

Коэффициент K_a при горизонтальном расположении камеры принимается равным 1.

Коэффициент структурного ослабления $K_{осл}$ принимается равным 0,35.

Коэффициент запаса K_3 рассчитывается следующим образом:

$$K_3 = K_{31} \cdot K_{32}, \quad (6)$$

где K_{31} — коэффициент, учитывающий изменчивость среднемаксимальной прочности, равный 1,25; K_{32} — коэффициент, учитывающий возможное уменьшение площади поперечного сечения целика в натуре по сравнению с проектной, принимается равным 1,1.

Коэффициент запаса K_3 равен:

$$K_3 = K_{31} \cdot K_{32} = 1,25 \cdot 1,1 = 1,375. \quad (7)$$

Коэффициент, учитывающий влияние времени K_d принимаем равным 0,7, так как длительность стояния целика менее 3 лет.

Анализ физико-механических и прочностных свойств пород показал, что плотность основных пород продуктивной толщи не превышает 3 т/м³, а средняя прочность пород в образце не ниже 100 МПа. Таким образом, для расчетов принимаем $\gamma = 3$ т/м³ и $\sigma_{сж}^0 = 100$ МПа.

Подставив рассчитанные коэффициенты и другие параметры в выражения (3) и (5), получаем значения ширины целиков a :

- для камер К27, К29 — 31,2 м;
- для камер К(-7), К(-9) и К(-11) — 33 м.

Таким образом, по расчетным данным, безопасная ширина целиков между камерами К27 и К29 равна 31 м и безопасная ширина целиков между камерами К(-7), К(-9) и К(-11) равна 33 м при ширине всех камер, равной 25 м.

Анализ горнотехнических условий отработки запасов в районе разрезов 27 и 29 показал, что вблизи будущих камер располагается очистное пространство вышележащего горизонта –254 м. Методика ВНИМИ, по которой определялись безопасные параметры камер и целиков, не учитывает возможного влияния данного очистного пространства.

Кроме расчетов безопасных параметров камер и целиков по методике ВНИМИ, было проведено исследование напряжений, действующих на контурах камер и в целиках, с помощью методов численного моделирования. Исследования проводились для упругого изотропного массива горных пород в двухмерной постановке.

Задача решалась для условий действия только собственного веса горных пород, так как в 2016 г. натурные исследования состояния массива на Ждановском месторождении не проводились и существовали данные о наличии только гравитационного типа поля напряжений.

В качестве физико-механических свойств пород были взяты усредненные значения для пород продуктивной толщи:

- удельный вес γ — 3 т/м³;
- модуль упругости E — 70 ГПа;
- коэффициент Пуассона ν — 0,31.

Дневная поверхность задана на высотной отметке +120 м. Дно камер находилось на отметке -310 м. Ширина камер и целиков составляла соответственно 25 м и 31 м — для камер К27 и К29 и 25 м и 33 м — для камер К(-7), К(-9) и К(-11). В результате моделирования были получены данные о максимальной σ_1 и минимальной σ_2 компонентах главных напряжений.

На рис. 3, а, представлено распределение σ_1 в окрестностях камер и целиков в сечении, проходящем по простиранию рудного тела и пересекающем камеры К27 и К29.

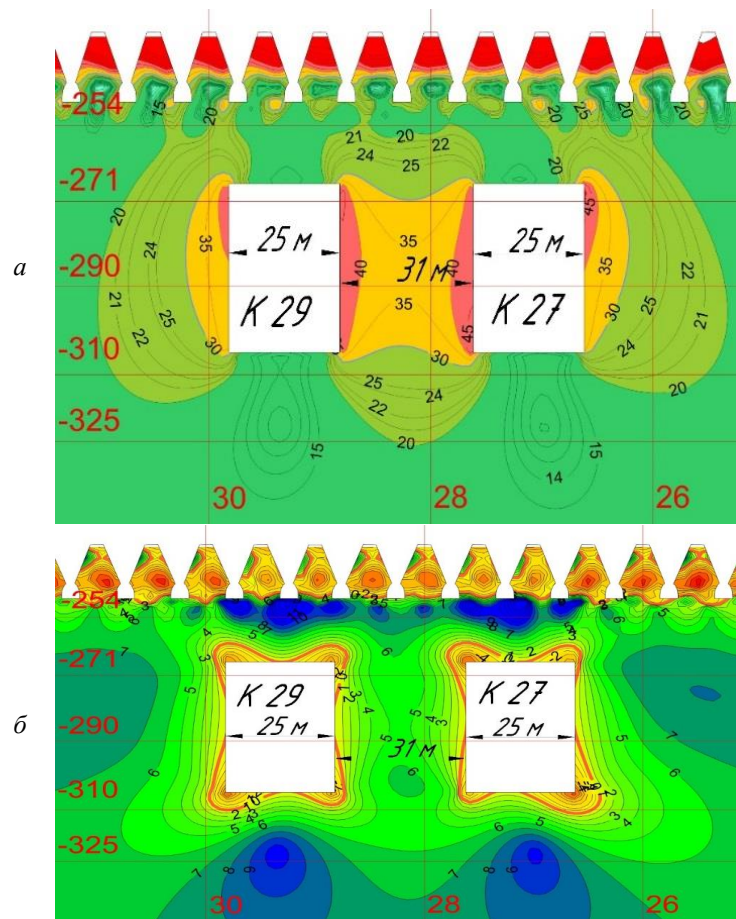


Рис. 3. Распределение σ_1 (а) и σ_2 (б) в вертикальном сечении камер К27 и К29

Fig. 3. The distribution of σ_1 (a) and σ_2 (b) in vertical cross-section of the rooms K27 and K29

Как видно из рис. 3, а, основные зоны концентрации максимальных напряжений σ_1 располагаются в стенках камер и в целике. Значения σ_1 в этих зонах достигают 35–40 МПа. Несмотря на значительные величины σ_1 , они не превышают половины предела прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$. Данный факт свидетельствует об устойчивом состоянии целика.

Анализ минимальных напряжений σ_2 (рис. 3, б) показал, что в целике между камерами К27 и К29 напряжения σ_2 в основном являются сжимающими с незначительными зонами растяжений в стенках камер. Однако в углах и кровле камер есть зоны существенных растягивающих напряжений, значения σ_2 в которых достигают -5 МПа. Данные значения σ_2 приближаются к пределу прочности пород на растяжение, что свидетельствует о возможном прорастании трещин отрыва. С учетом уже существующей трещиноватости массива можно говорить о том, что в углах камер К27 и К29 и их кровли формируются условия для частичного разрушения приконтурного массива.

Таким образом, состояние массива горных пород в целике при данных условиях можно характеризовать как устойчивое. Возможные разрушения в кровле камер требуют исключить присутствие людей в очистном пространстве.

На рис. 4, а, представлено распределение σ_1 в окрестностях камер К(-7), К(-9), К(-11) и их междуканнерных целиков.

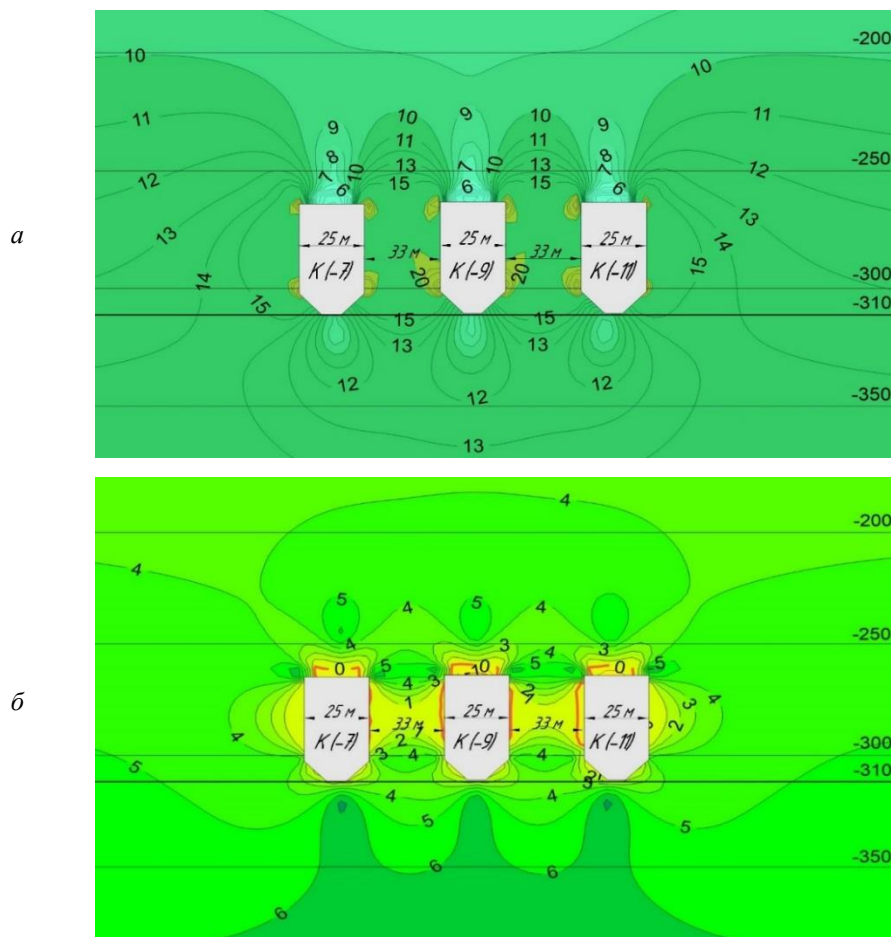


Рис. 4. Распределение σ_1 (а) и σ_2 (б) в вертикальном сечении камер К(-7), К(-9) и К(-11)

Fig. 4. The distribution of σ_1 (a) and σ_2 (b) in vertical cross-section of the rooms К(-7), К(-9) and К(-11)

Зоны концентрации напряжений располагаются в верхней и нижней части целика, при этом значения σ_1 в этих зонах не превышают 20 МПа (рис. 4, а). Данные значения σ_1 в несколько раз меньше предела прочности пород на сжатие $\sigma_{сж}$, что говорит об устойчивом состоянии целика.

При анализе минимальных напряжений σ_2 (рис. 4, б) было установлено, что напряжения σ_2 в целиках в основном являются сжимающими с незначительными зонами растяжений в стенках камер. Также зоны растяжения наблюдаются и в кровле камер, однако во всех зонах растягивающие напряжения не превышают 1 МПа, что значительно ниже предела прочности пород на растяжение. При развитой трещиноватости возможно снижение прочности пород на растяжение и прорастание трещин отрыва в зонах действия растягивающих напряжений.

Таким образом, состояние массива горных пород в окрестностях камер и целиков при данных условиях можно характеризовать как устойчивое.

По результатам расчета параметров камер и целиков с помощью аналитического метода (методики ВНИМИ) и метода численного моделирования (анализа НДС массива горных пород в окрестностях камер) установлено, что при отсутствии людей в очистном пространстве безопасная ширина камер К27 и К29 составляет 25 м, целика между ними — 31 м, безопасная ширина камер К(-7), К(-9) и К(-11) составляет 25 м, целика между ними — 33 м.

Результаты

В работе проведено исследование аналитического и численного методов для определения оптимальных параметров камер и целиков при обработке Ждановского месторождения. На первом этапе для определения безопасных размеров камер и междукамерных целиков применялся аналитический метод исследования с использованием методики ВНИМИ. На основе полученных значений параметров камер и целиков для оценки напряженно-деформированного состояния массива в районе камер применялся метод численного моделирования. В результате моделирования установлено, что полученные величины параметров камер и целиков являются оптимальными с точки зрения безопасности горных работ. Успешный опыт обработки запасов ЦРТ в 2016 г. на горизонте –310 м камерно-целиковой системой подтверждает сделанный ранее вывод о безопасных параметрах камер и целиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков В. Н., Макеев В. И. История и перспективы развития минерально-сырьевого комплекса ОАО «Кольская ГМК» // Цветная металлургия. 2013. № 10 (850). С. 27–32. 2. Смирнов А. А., Воробьев В. Л., Анухин М. А. // Цветные металлы. 2004. № 12. С. 22–24. 3. Оптимизация конструктивных и технологических решений при подземной разработке медно-никелевых руд Ждановского месторождения / И. Н. Савич [и др.] // Горн. журн. 2011. № 11. С. 33–35. 4. Martin C. D., Maybe W. G. Strength hard-rock pillars // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2000. Vol. 37. P. 1239–1246. 5. Методические указания по установлению размеров камер и целиков при камерных системах разработки руд цветных металлов. Л.: ВНИМИ, 1972. 6. Čuriš L., Šeupárek R. Numerical analysis of the stability of lignite pillars // Procedia Engineering. 2017. Vol. 191. P. 310–316. 7. Sharma K. G. Numerical analysis of underground structures // Indian Geotechnical J. 2009. Vol. 39 (1). P. 1–63. 8. Numerical analysis of underground space and pillar design in metalliferous mine / T. Malli [et al.] // J. African Earth Sciences. 2017. October. Vol. 134. P. 365–372.

Сведения об авторе

Кулькова Мария Сергеевна — аспирант, младший научный сотрудник Горного института КНЦ РАН
E-mail: maria.vasilevskaya89@yandex.ru

Author Affiliation

Maria S. Kulkova — PhD Student, Junior Researcher of the Mining Institute of KSC RAS
E-mail: maria.vasilevskaya89@yandex.ru

Библиографическое описание статьи

Кулькова, М. С. Применение аналитического и численного методов исследования для определения оптимальных параметров камер и целиков при обработке Ждановского месторождения / М. С. Кулькова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2019. — № 1 (11). — С. 42–49.

Reference

Kulkova Maria S. The Analytical and Numerical Research Methods for Determining the Optimal Parameters of Stopes and Pillars during the Zhdanovskoe Deposit Mining. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2019, vol. 1. (11), pp. 42–49. (In Russ.).