



**ОБОСНОВАНИЕ ПОРЯДКА ОТРАБОТКИ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ
В ПРЕДЕЛАХ ШАХТЫ “ГЛУБОКАЯ”**

С. А. Неверов¹, А. А. Неверов¹, А. И. Конурин¹, Н. П. Медведева²

¹*Институт горного дела СО РАН, E-mail: nsa_nsk@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный технический университет, E-mail: nado2004@bk.ru,
просп. К. Маркса 20, г. Новосибирск 630091, Россия*

На основе геолого-структурных особенностей рудного поля шахты “Глубокая” рудника “Скалистый” разработана параметрическая 3D-модель для численной оценки напряженно-деформированного состояния тектонически активного массива горных пород. Получены прогнозные карты напряженного состояния блочной геосреды при различной последовательности и стадиях отработки глубокозалегающих рудных тел С-5, С-6, С-6(л) Октябрьского месторождения. Установлены порядок и наиболее безопасное направление фронта развития горных работ при отработке рудных залежей.

Массив, геолого-тектоническая структура, модель, напряженно-деформированное состояние, моделирование, порядок отработки, безопасность

**JUSTIFICATION OF MINING SEQUENCE FOR ORE DEPOSITS
WITHIN THE GLUBOKAYA MINE**

S. A. Neverov¹, A. A. Neverov¹, A. I. Konurin¹, and N. P. Medvedeva²

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: nsa_nsk@mail, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University,
E-mail: nado2004@bk.ru, pr. K. Marksa, 20, Novosibirsk, Russia*

Based on the geological and structural features of the ore field of the Glubokaya mine of the Skalisty colliery, a parametric 3D model has been developed for numerically assessing the stress-strain state of a tectonically active rock mass. Forecast maps of the stress state of the block geoenvironment at different sequences and stages of mining deeply occurring ore bodies C-5, C-6, C-6 (l) of the Oktyabrsky deposit are obtained. The sequence and safest direction of the extraction front in mining ore deposits are determined.

Rock mass, geological and tectonic structure, model, stress-strain state, modeling, mining sequence, safety

Горно-капитальные работы в пределах шахты “Глубокая” рудника “Скалистый” Октябрьского месторождения (ЗФ ПАО “ГМК “Норильский никель”) в настоящее время ведутся на глубинах свыше 1800–2000 м. Для “северных” рудных тел С-5, С-6 и С-6(л) шахты “Глубокая” характерны весьма сложные горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия залегания. Блочный массив горных пород, слагающих эти залежи, расположенных в интервале глубин 1700–1980 м от дневной поверхности, представляет собой развитую тектоническую гео-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-6827.2018.5).

среду (рис. 1) из множества блоков и нарушений, отнесенных к Норильско-Хараелахскому разлому (НХР). НХР — тектоническая структура II ранга, субпараллельным ему крупным сбросам и зонам субмеридиональных сдвигов и взбросов. Большинство сбросов, секущих рудные залежи, имеют падение, параллельное НХР (рис. 1). Мощность зоны дробления по НХР изменяется от 20 до 50 м, нарушенности от его деятельности — до 150 м.

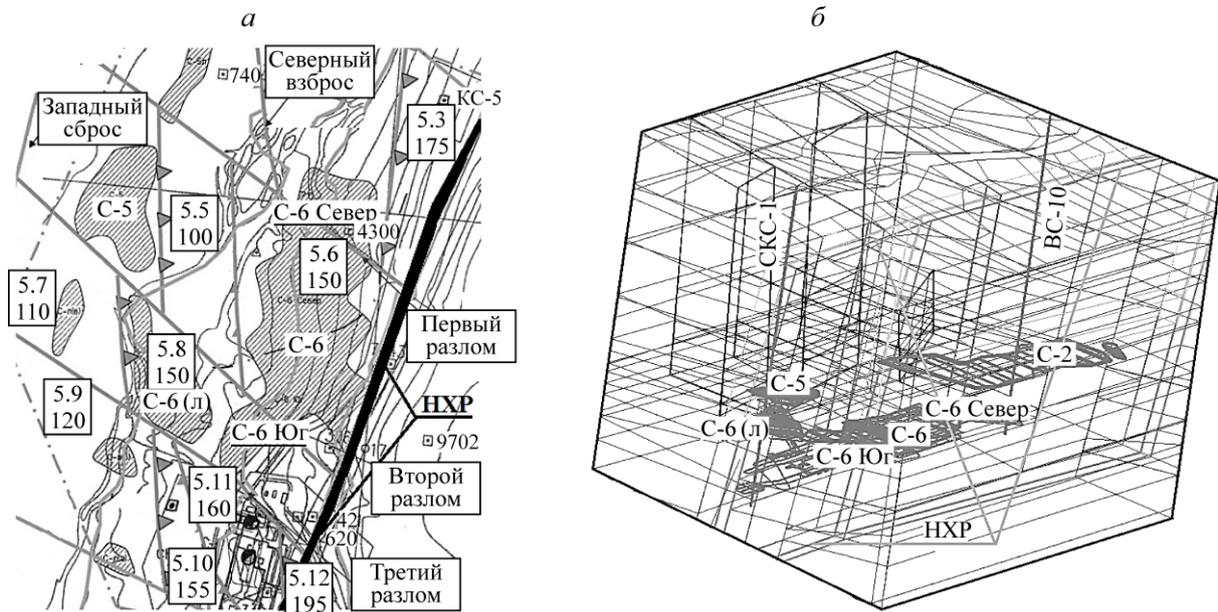


Рис. 1. Структурно-тектоническое строение (а) и трехмерная твердотельная модель (б) поля шахты “Глубокая”

Основными горно-геологическими и геомеханическими условиями отработки рудных залежей, оказывающими влияние на технологию выемки запасов месторождения, являются [1–7]:

- глубина залегания до 2000 м и тектонический тип напряженного состояния; высокая нарушенность и преобладание деятельности разрывной тектоники в формировании блоковой структуры геосреды, представленными взбросами, сбросами и сдвигами;

- сплошные сульфидные и медистые руды, а также большинство вмещающих пород в поле рудника “Скалистый”, отнесены к опасным по горным ударам.

Наличие развитой тектоники и взаимное расположение рудных тел на месторождении обусловили необходимость в обосновании безопасного порядка и последовательности их отработки, особенно с учетом влияния глубинного разлома II ранга — НХР. К рассмотрению приняты четыре сценария развития горных работ при погашении запасов рудных тел С-5, С-6 и С-6(л) (рис. 2).

Сценарий 1 предусматривает субмеридиональную разрезку по оси залежи с субширотным фронтом развития горных работ. Отработка залежи ведется от ее центра двухсторонними уступными фронтами в направлении, перпендикулярном к НХР (рис. 2а). Это соответствует движению фронта выемки по направлению действия максимальной составляющей природного тектонического поля напряжений σ_{\max} на месторождении (σ_{\max} направлено вкрест простирания рудных залежей). Особенностью развития очистных работ по сценарию 1 (начальный период) является субмеридиональная разрезка залежи С-6 Север по ее простиранию (рис. 2а).

Сценарий 2 — горные работы соответствуют сценарию 1 только на период близкому к максимальному развитию фронта очистной выемки (рис. 2б). Погашение запасов залежей по сценарию 2 характеризуется следующим:

- основная часть залежи С-6 Север — субмеридиональная разрезка по простиранию залежи;
- основная часть залежи С-6 Юг — расходящимися уступными фронтами, перпендикулярными к сбросу, разделяющему залежь С-6 на северную и южную части;
- залежь С-6(л) — субмеридиональная разрезка по центральной оси залежи, при этом в южной крутопадающей ее части фронт отработки разворачивается на 90°;
- залежь С-5 — субмеридиональная разрезка у западного фланга с односторонним уступным фронтом выемки в направлении, близком к восточному.

Сценарий 3 (начальный период) — субширотная разрезка залежи с субмеридиональным фронтом развития горных работ (отработка залежей ведется двухсторонними уступными фронтами в направлении север–юг), т. е. фронт ориентирован в направлении, близком параллельном к разлому НХР (рис. 2в). По отношению к природному полю напряжений направление движения фронта выемки перпендикулярно действию σ_{\max} .

Сценарий 4 — направление очистных работ соответствует сценарию 3 на период, близкий к максимальному развитию фронта выемки залежей (рис. 2з).

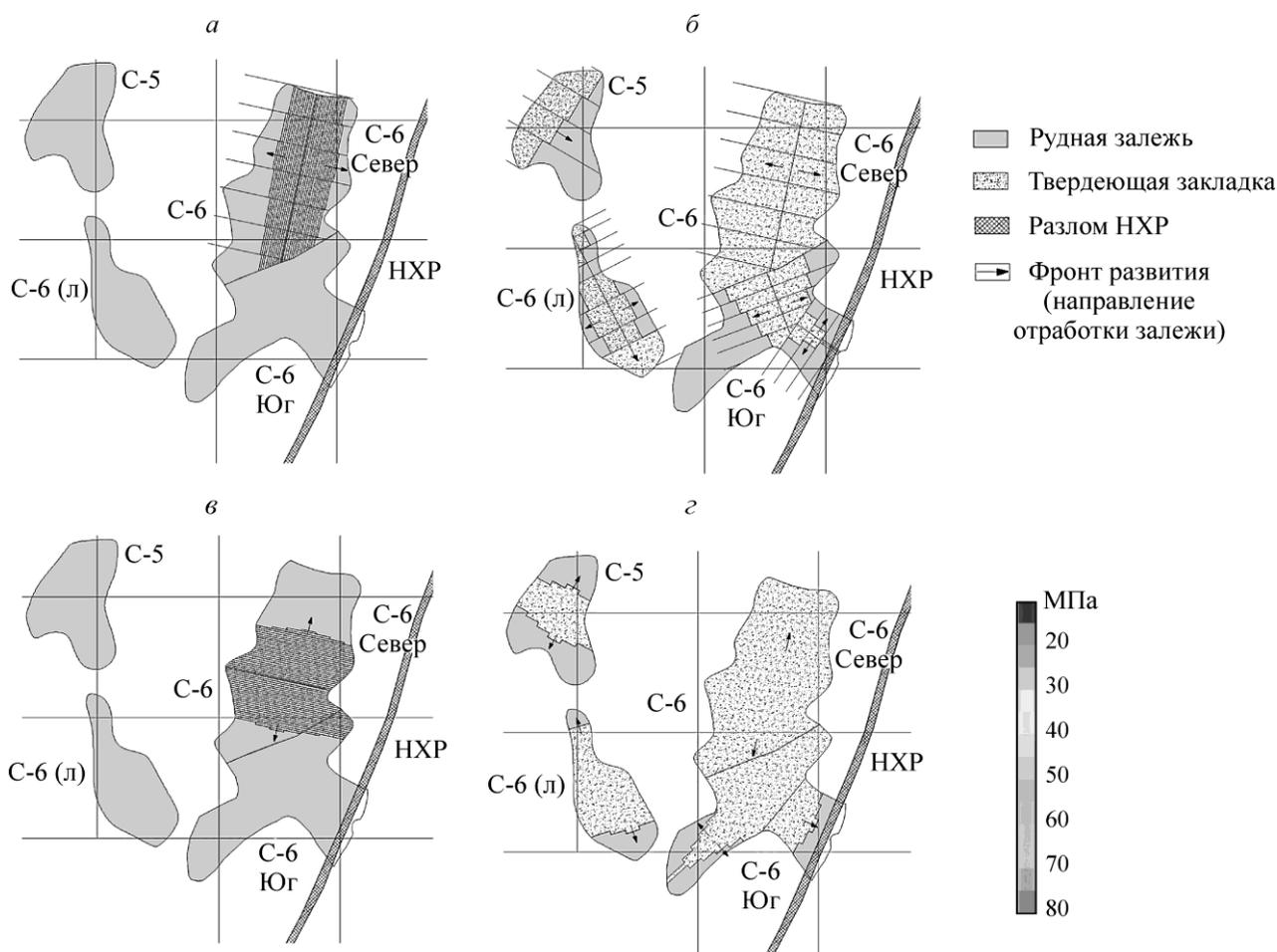


Рис. 2. Варианты развития горных работ на шахте “Глубокая” при отработке рудных залежей: а — С-5, б — С-6; в — С-6(л); з — сценарий развития горных работ 1, 2, 3 и 4

Выбор и обоснование порядка и последовательности отработки рудных залежей С-5, С-6 и С-6(л) в границах шахты “Глубокая” с учетом большой глубины залегания (< 1700 м), осуществлялись на базе результатов геомеханических расчетов, выполненных методом конечных элементов в упругой объемной постановке задачи с использованием двух критериев проч-

ности: по наибольшим растягивающим напряжениям и Кулона – Мора [8–13]. Для прогнозирования зон возможных разрушений массива пород в выделенных слоях и тектонических нарушениях использовались значения сцепления C и угла внутреннего трения φ пород с учетом их структурного ослабления ($K_c = 0.15–0.30$). На рис. 3 представлены результаты численного моделирования НДС породного массива — характер распределения максимальных главных напряжений σ_3 в субгоризонтальной плоскости по южной части залежи С-6.

Наиболее напряженные условия всестороннего сжатия, независимо от варианта развития фронта горных работ, создаются в областях влияния добычных работ, непосредственно примыкающих к очистным забоям, и угловых частях заложенных выработанных пространств, контактирующих соответственно с рудным массивом и окружающим породами, которые испытывают высокие сжимающие напряжения ($\sigma_3 > 90$ МПа).

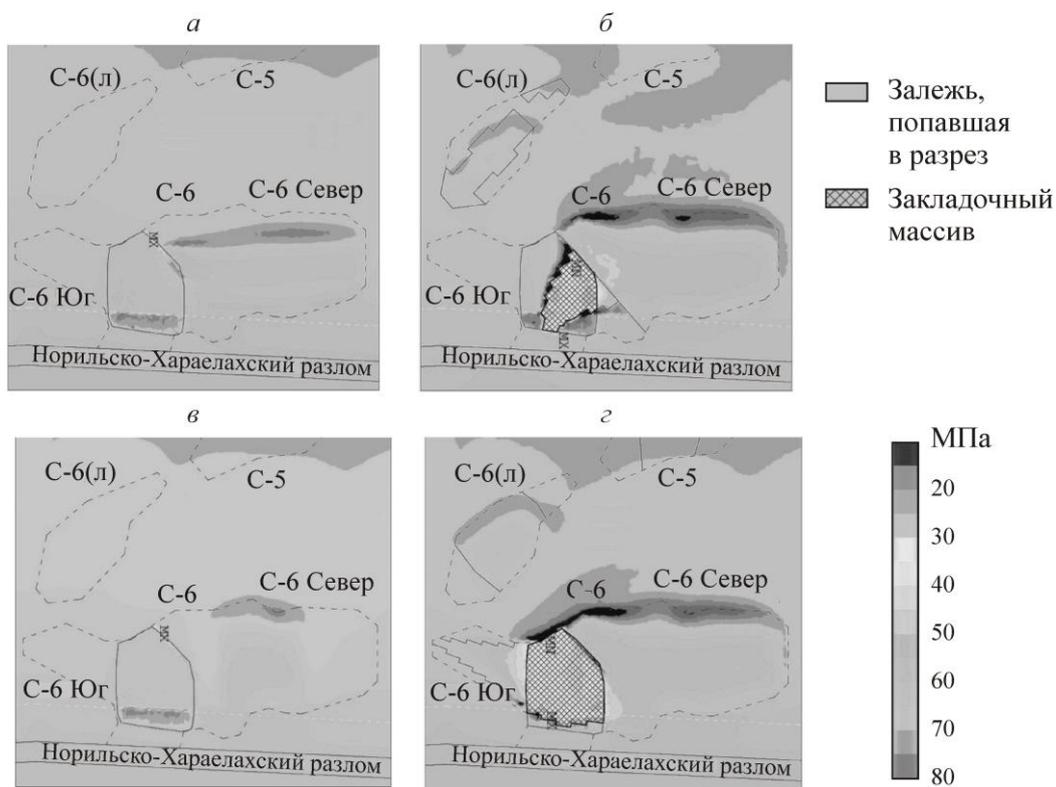


Рис. 3. Сравнительная оценка распределения максимальных главных напряжений σ_3 в массиве горных пород шахты “Глубокая” Октябрьского месторождения в горизонтальном разрезе по залежи С-6, соответственно (а), (б), (в) и (з) — сценарии развития горных работ 1, 2, 3 и 4

НДС массива горных пород при отработке месторождения по сценарию 1 характеризуется следующими особенностями:

— в подработанном массиве на расстоянии 2–3 мощностей залежи С-6 наблюдается концентрация максимальных напряжений σ_3 до 50–65 МПа, охватывая практически всю северную площадь залежи. Минимальная компонента тензора напряжений σ_1 в данной области составляет 5–15 МПа. Размеры прогнозируемой зоны разрушения сопоставимы с двумя мощностями рудного тела и по площади охватывают большую часть западного участка отработки залежи С-6, противоположного НХР;

— развитие горных работ в границах северной части залежи С-6 практически не оказывает никакого влияния на напряженное состояние соседних залежей С-6(л) и С-5, в том числе на южную часть залежи С-6.

Закладочный массив испытывает объемное сжатие. Трехмерное сжатие закладки является положительным моментом сохранения ее устойчивости [14–17]. Перепад между максимальными и минимальными напряжениями — не более 3–8 МПа. Потери устойчивости закладочного массива наблюдаются на контактах “закладка–рудный массив” в области очистных забоев. Одновременное развитие горных работ на залежах С-6, С6(л) и С-5 по сценарию 2 обуславливает следующие закономерности распределения напряжений в массиве горных работ:

— как и в сценарии 1, в наиболее неблагоприятных условиях находятся подработанные горные породы залежи С-6 и подработанные и надработанные области массива пород соответственно залежей С-6(л) и С-5. Величина максимальных главных напряжений σ_3 в них достигает 50–65 МПа, минимальные σ_1 — 10–20 МПа;

— зоны потерь устойчивости пород над очистным пространством отрабатываемых залежей С-6(л) и С-5 в вертикальном разрезе также составляют 2–3 мощности рудных тел, в плане — носят обширный характер с распространением “ядра” разрушения от центра фронта горных работ непосредственно к очистным забоям;

— влияние Норильско-Хараелахского разлома на НДС массива горных пород вокруг залежей и собственно залежей С-6(л) и С-5 не выявлено;

— одновременная отработка залежей С-6(л) и С-5 также не оказывает практически никакого влияния одной залежи на другую, однако не допускается направление фронтов очистных работ друг на друга на убывающий породный целик, т. е. фронт очистных работ на одной залежи должен быть направлен на “уходящий” забой другой залежи.

Особенности отработки рудных залежей по сценариям 3 и 4:

— в качественном и количественном выражении напряженное состояние массива горных пород идентично сценариям 1 и 2. Совпадают и области прогнозируемых разрушений горных пород. Это объясняется, вероятнее всего, наличием крупного тектонического разлома НХР и большой глубиной ведения горных работ;

— полученные результаты позволяют охарактеризовать напряженное состояние массива горных пород, как близкое к предельному. Вместе с тем, учитывая противоположную (субмеридиональную) ориентацию фронта очистных работ, абсолютные величины напряжений несколько выше, чем при сценариях 1 и 2, в среднем на 5–10 %.

ВЫВОДЫ

Анализ распределения напряжений в массиве горных пород при субширотном и субмеридиональном фронтах развития очистных работ показал, что более предпочтительна субмеридиональная разрезка залежи с субширотным направлением отработки рудных тел (сценарии 1 и 2). Последнее обусловлено меньшими прогнозируемыми участками разрушений горных пород и эксплуатацией выработок в более благоприятных условиях. Вместе с тем, субширотный и субмеридиональный фронты развития добычных работ являются равноценными с точки зрения наведенного в рудных залежах и окружающем массиве пород техногенного поля напряжения. Это связано с большой (2 км) глубиной залегания и присутствием в непосредственной близости к отрабатываемым залежам крупного тектонического разлома НХР, которые в совокупности приводят к выравниванию горизонтальных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Galaov R. B., Kisel A. A., Andreev A. A., and Zubkov V. V. Pre-stopping assessment of stress state of ore body S-2 in Skalistaya Mine, Mining Journal, 2016, no. 7, pp. 10–14 [Галаов Р. Б., Кисель А. А., Андреев А. А., Зубков В. В. Оценка напряженного состояния рудного массива залежи С-2 шахты “Скалистая” до начала очистных работ// Горн. журнал. — 2016. — № 7. — С. 10–14.]

2. **Olovyanny A. G., Smirnov V. A., Samorodov B. N., and Marysyuk V. P.** Modeling of the stress state of the massif in the vicinity of the mine workings of the Skalisty mine, *Geodynamics and Stress State of the Earth's interior (collection of scientific works)*, Novosibirsk, Ed. Institute of Mining SB RAS, 2004, pp. 161–164 (in Russian) [**Оловянный А. Г., Смирнов В. А., Самородов Б. Н., Марысюк В. П.** Моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности горных выработок рудника “Скалистый” // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сборник трудов.* — Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2004. — С. 161–164.]
3. **Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., and Konurina M. I.** Geomechanical parametrization of rock massif for selection and substantiation of technology of underground works, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM2018), *Exploration and mining mineral processing*, vol II, Sofia, Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., pp. 451–458.
4. **Yeremenko V. A., Barnov N. G., Kondratenko A. S., and Timonin V. V.** Method of development of steep low-density vein deposits, *Mining Journal*, 2016, no. 12, pp. 45–50 [**Еременко В. А., Барнов Н. Г., Кондратенко А. С., Тимонин В. В.** Способ разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений // *Горн. журнал.* — 2016. — № 12. — С. 45–50.]
5. **Freidin, A. M., Neverov, S. A., Neverov, A. A., and Konurin, A. I.** Validation of choice and determination of geotechnology parameters with regard to stress-strain state of rocks, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 134(1), 012019.
6. **Khazhylyi Ch. V., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., and Yanbekov A. M.** Calculation of the strength passport of rocks in the natural conditions using the Hook-Brown criterion and the Rocdata, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2018, no. 12, pp. 92–101 (in Russian) [**Хажылылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М.** Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы Rocdata // *ГИАБ.* — 2018. — № 12. — С. 92–101.]
7. **Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., and Konurina M. I.** Three-dimensional geomechanical parameterization of the field as the basis for the choice of mining technology, *Earth Sciences, Current state: Materials of the 5th All-Russian Youth Scientific and Practical School-Conference*, Novosibirsk, CPI NSU, 2018, pp. 41–43 (in Russian) [**Конурин А. И., Неверов С. А., Неверов А. А., Конурина М. И.** Трехмерная геомеханическая параметризация месторождения как основа выбора технологии горных работ // *Науки о Земле. Современное состояние: материалы V Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф.* — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. — С. 41–43.]
8. **Kurlenya M. V., Baryshnikov V. D., and Gakhova L. N.** An approach to the assessment and prediction of the stability of mine workings in the zone of influence of mine works, *Modern problems of continuum mechanics*, 2011, no. 13, pp. 66–73 (in Russian) [**Курленя М. В., Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Об одном походе к оценке и прогнозу устойчивости горных выработок в зоне влияния очистных работ // *Современные проблемы механики сплошных сред.* — 2011. — № 13. — С. 66–73.]
9. **Aliev M. M., Karimova N. G., and Gilyazova S. R.** Nonlinear version of the Mohr-Coulomb criterion, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. 7, pp. 226–231 (in Russian) [**Алиев М. М., Каримова Н. Г., Гилязова С. Р.** Нелинейный вариант критерия Кулона–Мора // *ГИАБ.* — 2015. — № 7. — С. 226–231.]
10. **Aliev M. M., Shipilova O. A., and Shafieva S. V.** Coulomb criterion - mora as applied to the calculations of the long-term sustainability of the borehole walls, *Proceedings of the scientific session of the scientists of the Almeteyevsk State Oil Institute*, 2015, no. 1, pp. 235–238 (in Russian) [**Алиев М. М., Шипилова О. А., Шафиева С. В.** Критерий Кулона–Мора применительно к расчетам длительной устойчивости стенок скважины // *Материалы науч. сессии ученых АГНИ* — 2015. — № 1. — С. 235–238.]
11. **Celleri H. M., Sánchez M., and Otegui J. L.** Fracture behavior of transversely isotropic rocks with discrete weak interfaces, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 42(18), pp. 2161–2176.

12. **Feng D.-K., Zhang J.-M., and Hou W.-J.** Three-dimensional direct-shear behaviors of a gravel-structure interface, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(12), 04018095.
13. **Berkane A. and Karech T.** Numerical modeling of the pathological case of a damaged tunnel application to Djebel El-Ouahch tunnel, *Asian Journal of Civil Engineering*, 2018, 19(8), pp. 913–925.
14. **Wei X., Li C., Zhou X., Hu B., and Li W.** The change laws of strength and selection of cement-sand ratio of cemented backfill, *Geotechnical Engineering*, 2017, 48(4), pp. 144–150.
15. **Krupnik L A, Shaposhnik Yu. N., Shaposhnik S. N., Konurin A. I., and Shokarev D. A.** Laying work in Kazakhstan: state and prospects, 25th World Mining Congress, Astana, 2018 [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Конурин А. И., Шокарев Д. А.** Закладочные работы в Казахстане: состояние и перспективы // XXV Всемирный горный конгресс. — Астана, 2018.]
16. **Golik V. I. and Lukyanov V. G.** Optimization of the strength of the filling mixture, taking into account the tension of rocks, *News of Tomsk Polytechnic University, Engineering geours*, 2016, vol. 327, no. 6. pp. 6–14 (in Russian) [**Голик В. И., Лукьянов В. Г.** Оптимизация прочности закладочной смеси с учетом напряженности пород // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2016. — Т. 327. — № 6. — С. 6–14.]
17. **Krupnik L. A., Shaposhnik Yu. N., Shaposhnik S. N., and Tursunbaeva A. K.** Technology of stowing operations at mining enterprises of the Republic of Kazakhstan, *Journal of Mining Science*, 2013, no. 1, pp. 95–105 [**Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К.** Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 95–105.]