



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОДЭТАЖНО-КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ
ПРИ ОСВОЕНИИ НИЖНИХ ГОРИЗОНТОВ ОРЛОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

**Ю. Н. Шапошник¹, С. А. Неверов¹, А. А. Неверов¹,
А. И. Конурин¹, С. Н. Шапошник²**

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: shaposhnikyury@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

²*Восточно-Казахстанский государственный технический университет,
ул. Серикбаева 19, г. Усть-Каменогорск 070004, Республика Казахстан*

Обосновано применение подэтажно-камерной системы разработки с закладкой с нисходящей и восходящей выемкой для отработки Северного рудного тела Орловского месторождения на с помощью численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива методом конечных элементов. Установлено, что более безопасным вариантом в условиях нижних горизонтов месторождения с точки зрения устойчивости вмещающих пород является нисходящая выемка с высотой несущего слоя из закладки 8 м.

Рудное тело, система разработки, закладка, численное моделирование

**GEOMECHANICAL SUBSTANTIATION OF SUBLEVEL CAVING WHEN MINING
THE LOWER HORIZONS OF THE ORLOVSKY DEPOSIT**

**Yu. N. Shaposhnik¹, S. A. Neverov¹, A. A. Neverov¹,
A. I. Konurin¹, and S. N. Shaposhnik²**

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

²*East Kazakhstan State Technical University,
ul. Serikbayeva 19, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan*

The use of sublevel caving with an upward and undercut-and-fill stoping for mining Northern ore body of the Orlovsky deposit based on the numerical simulation of the rock mass stress-strain state using the finite element method is substantiated. It is determined that undercut-and-fill stoping with a backfilling layer 8 m high is a safer option in the conditions of lower horizons of the deposit, from the viewpoint of enclosing rock stability.

Ore body, mining system, backfilling, numerical simulation

Северное рудное тело (СРТ) Орловского полиметаллического месторождения представляет собой перемежающиеся рудные тела с линзами сложной формы по падению; протяженность по простиранию до 800 м, по падению — до 400 м, высота — до 350 м [1]. Рудные тела в основном крутопадающие (до 80°) с мощностью руды в горизонтальной части до 4 м, на круто-наклонных залеганиях мощность рудного тела составляет в среднем 10.5 м. Его большая часть представлена вкрапленными медно-колчеданными рудами в метасоматитах.

Породы всياчего бока представлены слабо трещиноватыми кварцевыми альбитпорфирами, лежащего бока — преимущественно серицит-хлорит-карбонатными метасоматитами, которые интенсивно нарушены трещинами. Непосредственно на контактах с рудными телами прослеживается зона весьма неустойчивых гидротермально измененных пород мощностью от 5 до 25 м с зеркалами скольжения, сильнотрещиноватыми с коэффициентом крепости по шкале Протоdje-конова $f = 5 - 7$.

Руды пожароопасные (содержание серы более 35 %), в связи с чем их магазинирование применять запрещается. Руды и прилегающие породы слабоустойчивые, глубина залегания СРТ около 1000 м.

Месторождение обрабатывается одной из наиболее дорогих и трудоемких технологий — слоевой системой разработки с твердеющей закладкой в нисходящем порядке, что вызвано большой глубиной залегания, высокой ценностью руд и низкой устойчивостью обнажений. По этим причинам применявшаяся ранее этажно-камерная система с закладкой была практически вытеснена слоевой системой разработки. В данное время наряду со слоевой системой с закладкой используется подэтажно-камерная система обработки с закладкой, составляющая около 10 %. Более дешевый и производительный восходящий порядок слоевой выемки не применяется из-за низкой устойчивости вкрапленных руд и высокого уровня травматизма от падения руды из кровли и бортов горных выработок [2, 3].

В результате натурных измерений действующих напряжений в массиве на отметке 775 м в борту транспортного орта СРТ на уровне 14 горизонта методом частичной разгрузки центральной скважиной парами реперов по принципу прямоугольной тензометрической розетки [4, 5] установлено следующее:

— максимальными по величине являются горизонтальные тектонические напряжения σ_1 , действующие вкрест простирания рудного тела, которые превышают вертикальную гравитационную составляющую γH в $\lambda_1 = 1.12$ раза;

— вертикальные гравитационные (от веса вышележащих пород) напряжения $\gamma H = 20.9$ МПа (средний удельный вес пород налегающей толщи $\gamma = 2.7$ т/м³) являются промежуточными σ_2 ;

— горизонтальные напряжения σ_3 , действующие по простиранию рудного тела, минимальны по величине с коэффициентом бокового давления $\lambda_3 = 0.98$.

Таким образом, полученные параметры природного поля напряжений на СРТ Орловского месторождения на уровне 14 горизонта свидетельствуют о равнокомпонентном (гидростатическом) распределении действующих напряжений в породном массиве.

В условиях обработки маломощных рудных тел СРТ системой разработки горизонтальными слоями из-за узкого фронта очистных работ невозможно достичь запланированной на СРТ производительности добычи руды 500 тыс. т/год. В связи с этим возникла необходимость изучения вопроса о возможности обработки основных запасов СРТ подэтажно-камерной системой разработки с закладкой.

Для выемки запасов руды СРТ предлагается вариант подэтажно-камерной системы разработки с нисходящей выемкой и закладкой. Вначале осуществляется выемка запасов руды в пределах слоя в днище и кровле камеры с последующим образованием несущего слоя из армированной закладки мощностью 4.0 м, а также выемкой запасов руды и формированием в днище камеры вышерасположенного несущего слоя закладки без армировки (рис. 1). Оставшиеся запасы руды в камере обрабатывают подэтажно-камерной системой.

Рекомендуемые геометрические параметры обнажений в блоках (на основании проведенных аналитических расчетов [6, 7]): высота подэтажа — до 25 м (высота подэтажной камеры — 21 м); ширина камеры — 4–10.3 м (на всю мощность рудного тела); длина камеры — 50 м (длина секции — 25 м).

В первую очередь обрабатывают запасы руды в днище камеры проходкой слоевого штрека высотой 4.0 м (при мощности рудного тела до 4.0 м) и последующей его специальной армировкой, которая предусматривает бурение в его бортах шпуров по высоте с расстоянием между ними 1.0–1.5 м, по длине — 2.0 м с установкой в них железобетонных анкеров и соединение штанг (путем сварки) в единый стальной прут, который перекрывает выработку на всю ее ширину. Данная конструкция армировки позволит существенно повысить несущую способность слоя.

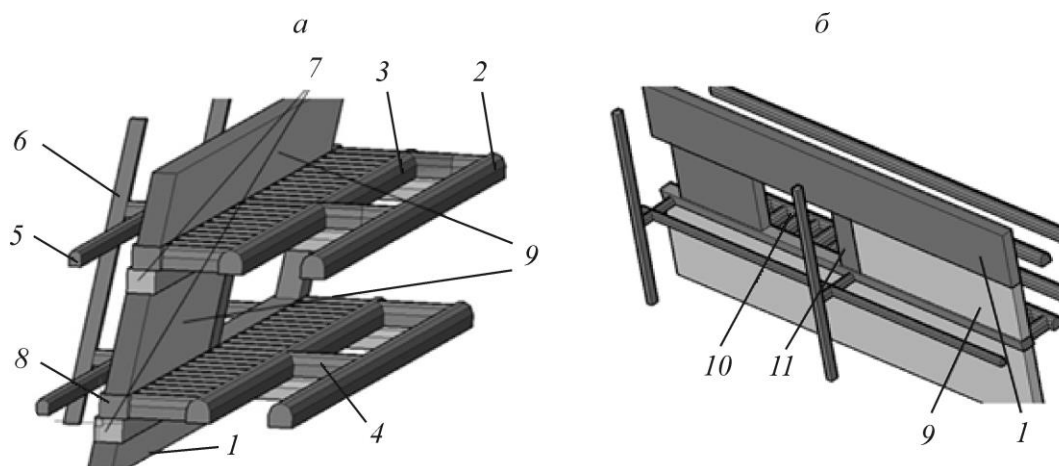


Рис. 1. Объемная модель подэтажно-камерной системы разработки с нисходящей (а) и восходящей (б) выемками и твердеющей закладкой: 1 — рудная залежь; 2 — участковый уклон; 3 — подэтажный доставочный штрек; 4 — погрузочные заезды; 5 — сборный вентиляционный штрек; 6 — вентиляционно-закладочный восстающий; 7 — несущий слой из армированной закладки; 8 — несущий слой без армировки; 9 — бутобетонная закладка; 10 — подэтажная камера; 11 — междукламерный целик

Сложная геомеханическая обстановка на нижних горизонтах месторождения [8 – 12] обусловила при закладке выработанного пространства камер (секций) применение твердеющей закладки [13 – 15]. Допускается в верхнем пригрузочном слое комбинированная закладка с использованием пустых пород от проходческих работ.

Прочность закладки при ее обнажении должна составлять в нижнем несущем слое высотой 4.0 м не ниже 4–6 МПа (армированная закладка); в несущем слое высотой 4.0 м (выше слоя армированной закладки) — не ниже 4 МПа; в верхнем пригрузочном слое высотой 17 м — в пределах 1.5–2.0 МПа.

Из доставочного штрека по бортам будущих камер проходят буро-доставочные орты с подъемом в 1–2°, обеспечивающим сток технической шахтной воды к доставочному штреку, из буро-доставочных ортов через 16 м по их длине под углом 60–75° — погрузочные заезды. В каждой камере из погрузочного заезда или из рассечки оформляют отрезной восстающий до сбойки с вышерасположенным вентиляционным штреком.

Для геомеханического обоснования указанной системы разработки использовалось численное моделирование методом конечных элементов в ANSYS 12. Рассматривалась трехмерная упругая модель, где в отдельные слои с усредненными деформационными и плотностными характеристиками были выделены вмещающие породы нескольких типов, рудное тело и закладочный массив. Моделирование выполнено для глубины ведения горных работ 950 м.

Результаты расчетов приводятся в виде изолиний компонент главных и максимального касательного τ_{\max} напряжений. За максимальное главное напряжение принималось σ_1 , за минимальное — σ_3 , растяжение со знаком “–”. На рис. 2 представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния массива пород в конструктивных элементах рассматриваемой подэтажно-камерной выемки при высоте несущего слоя из армированной твердеющей закладки 4 м, высоте подэтажа — 25 м, пролете камеры — 100 м, высоте отбиваемого слоя — 17 м (при восходящей выемке — 21 м), ширине междукламерного целика — 12 м; ширине и высоте выработок — 4 × 4 м; расстоянии между доставочными заездами — 6 м; заложении выработок в лежачем и висячем боках на расстоянии 10 м от рудного тела. На рис. 2 показана шкала напряжений для всех представленных расчетов.

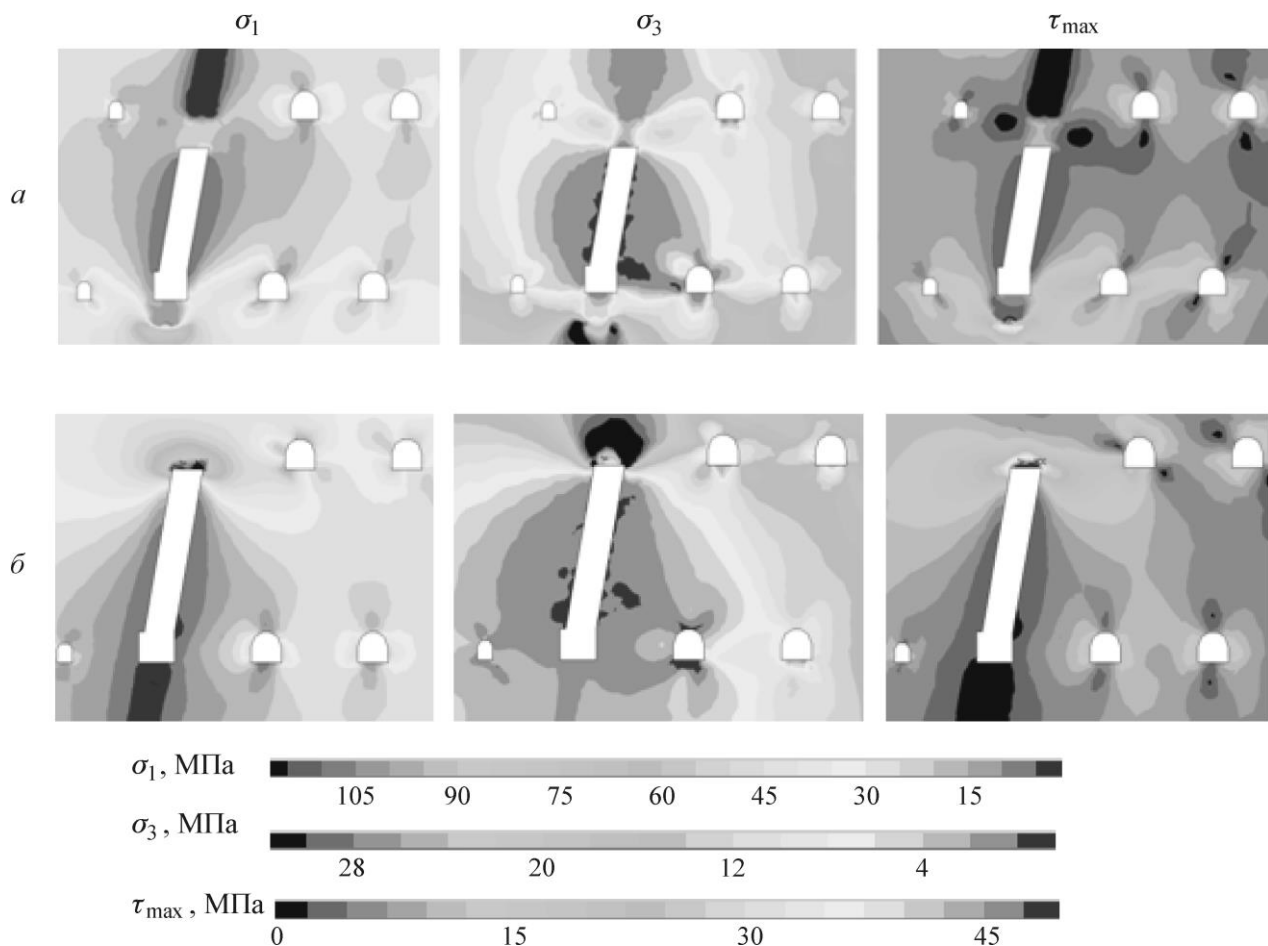


Рис. 2. Распределение напряжений вкрест простирания залежи по центру отработанной камеры между доставочными заездами при нисходящей (а) и восходящей (б) выемками

В качестве оценочного критерия прочности пород и закладки принимается теория Кулона–Мора. Для расчетов берется функция прочности, выраженная из уравнения прямой огибающей предельные круги напряжений Мора:

$$2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi \geq (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (1)$$

где C — сцепление горных пород, МПа; φ — угол внутреннего трения, град.; σ_1 и σ_3 — главные напряжения, действующие вкрест и по простиранию рудного тела, соответственно МПа.

Отсюда коэффициент запаса устойчивости массива K_y будет равен:

$$K_y = \frac{2C \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (2)$$

Значения $K_y < 1$ характеризуют области запредельного деформирования пород. Необходимо отметить, что в реальных условиях массив отличается нарушенностью трещинами. Анализ геологической информации на месторождении свидетельствует о том, что породы окolorудных зон весьма неустойчивые из-за многочисленных разнонаправленных микротрещин, заполненных кальцитом, пиритом, и многочисленных зеркал скольжения. Поэтому технологические риски в расчетах показателя устойчивости учитывались через коэффициент структурного ослабления массива пород. В соответствии с выполненным анализом напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов системы разработки приведена оценка устойчивости в виде отрисованных зон запредельного состояния массива пород (рис. 4).

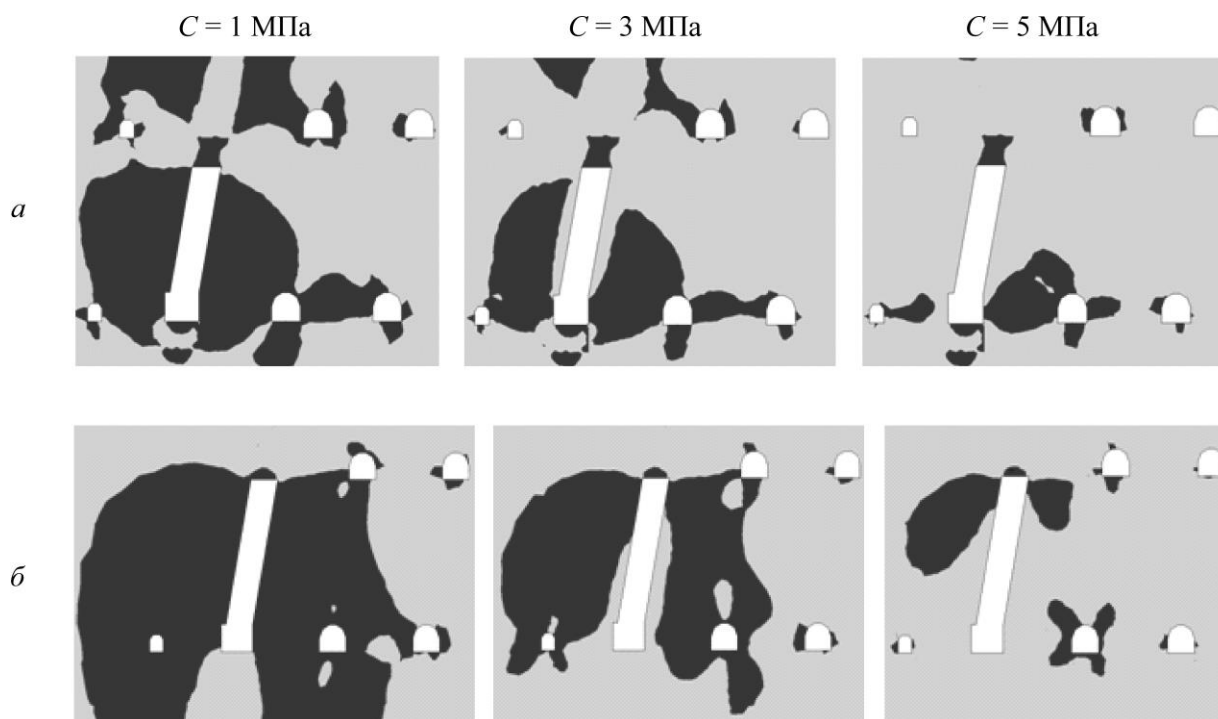


Рис. 4. Зоны запердельного состояния массива пород вкрест простирания залежи по центру отработанной камеры между доставочными заездами при нисходящей при высоте несущего армированного слоя закладки 4 м (а) и восходящей при пролете камеры 100 м (б) выемками

ВЫВОДЫ

Результаты расчетов показали, что подэтажно-камерная система разработки с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой с мощностью несущего слоя из армированного закладочного массива в 4 м при сцеплении горных пород и закладки $C \leq 1$ МПа не является безопасной. Установлено, что при сильно-, средне- и слабонарушенных горных породах нисходящая выемка обеспечивает безопасность горных работ. При этом необходимо соблюдать выполнение условия для закладочного массива $C \geq 1$ (прочность на одноосное сжатие ≥ 4 МПа). При увеличении мощности несущего слоя из армированного закладочного массива до 4 м и дополнительно неармированного закладочного массива до 4 м при сцеплении пород и закладки $C \leq 1$ МПа устойчивость несущего слоя повышается и позволяет безопасно извлекать нижележащие камерные запасы руды.

Подэтажно-камерная система разработки с нисходящей выемкой и твердеющей закладкой в рудо-породных массивах со сцеплением менее 4–5 МПа (в массивах с нарушением ниже средней) на глубине выемки 950 м не рекомендуется к применению. При камерной системе разработки с нисходящей выемкой при отработке рудного тела в верхней его части необходимо в первую очередь обрабатывать в кровле камеры слой руды с последующим формированием несущего слоя из армированной закладки мощностью 4 м и вышерасположенного несущего слоя без армировки. При подэтажно-камерной системе разработки с восходящей выемкой и закладкой рекомендуется первоначальная отработка в днище вышерасположенной камеры слоя руды и последующим формированием несущего слоя из армированной закладки мощностью 4 м.

Более безопасным вариантом в условиях Орловского месторождения с точки зрения устойчивости вмещающих пород и закладки является нисходящая выемка при формировании несущего слоя из закладки 8 м в случае использования специальной армировки нижнего слоя высотой 4 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Technological regulations** for determining the optimal parameters of development systems for the development of reserves of the Northern ore body of the Orlovsky deposit, Ust-Kamenogors, Georesource Engineering LLP, 2016, 66 pp. [**Технологический регламент** по определению оптимальных параметров систем разработки для отработки запасов Северного рудного тела Орловского месторождения. — Усть-Каменогорск: ТОО “Георесурс Инжиниринг”, 2016. — 66 с.]
2. **Barilyuk A. I., Ryshkel I. A., Tkachev V. M., Makarov A. B., Ort V. G., and Ananin A. I.** Development of the Orlovskoye field by a system of horizontal layers in descending order, Mining Journal, 2002, no. 5, pp. 55–58 (in Russian) [**Барилюк А. И., Рышкель И. А., Ткачев В. М., Макаров А. Б., Орт В. Г., Ананин А. И.** Разработка Орловского месторождения системой горизонтальных слоев в нисходящем порядке // Горн. журнал, 2002. — № 5. — С. 55–58.]
3. **Pustokhina N. G., Reish A. I., Pustokhin G. M., Gusmanov F. F., and Kokarev K. V.** Development of development systems at the Orlovsky mine, News of the higher institutions, Mining Journal, 2012, no. 3, pp. 26–29 (in Russian) [**Пустохина Н. Г., Райш А. И., Пустохин Г. М., Гусманов Ф. Ф., Кокарев К. В.** Развитие систем разработки на Орловском руднике // Изв. вузов. Горн. журнал. — 2012. — № 3. — С. 26–29.]
4. **Makarov A. A.** Practical geomechanics, Moscow, Mining book, 2006, 391 pp. [**Макаров А. Б.** Практическая геомеханика. — М.: Горная книга, 2006. — 391 с.]
5. **Makarov A. A., Ogorodnikov S. V., and Kalmurzaev K. A.** Determination of the natural stress state of the massif of the Maleevskoye field, Mining Journal, 2013, no. 5, pp. 57–61 [**Макаров А. Б., Огородников С. В., Калмурзаев К. А.** Определение природного напряженного состояния массива Малеевского месторождения // Горн. журнал. — 2013. — № 5. — С. 57–61.]
6. **Guidelines** for determining the size of chambers and pillars in underground mining of non-ferrous metal ores, Chita, VNIPIgortsvetmet, Chita branch, 1988, 126 pp. [**Методические указания** по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов. — Чита: ВНИПИгорцветмет, Читинский филиал, 1988. — 126 с.]
7. **Sectoral guidelines** for the calculation of the strength parameters for various purposes and allowable areas of rock outcrops in underground mining of non-ferrous metals, VNIMI, Uniprommed, 1986 [**Отраслевые методические указания** по расчету прочностных параметров различного назначения и допустимых площадей обнажений пород при подземной разработке руд цветных металлов, ВНИМИ, Унипроммедь, 1986.]
8. **Isaev K. O., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Geomechanical processes in the development of the Orlovsky field layered system with a bookmark in descending order, In the book: Geodynamics and stress state of the earth’s interior, Novosibirsk, Institute of Mining, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 1999, 152 pp. [**Исаев К. О., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Геомеханические процессы при разработке Орловского месторождения слоевой системой с закладкой в нисходящем порядке // В кн.: Геодинамика и напряженное состояние земных недр. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1999. — 152 с.]
9. **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.]
10. **Isaev K. O., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Management of rock pressure in the development of the Orlovskoye field by a layered system with a bookmark, Marksheider Vestnik, 1999, no. 2, pp. 23–33 [**Исаев К. О., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Управление горным давлением при разработке Орловского месторождения слоевой системой с закладкой // Маркшейдерский вестник. — 1999. — № 2. — С. 23–33.]

11. **Zhirnov A. A., Abdrakhmanov S. U., Shaposhnik Yu. N., and Konurin A. I.** Rock mass stability estimation and selection of mine support design at Orlov complex ore deposit, Mining Journal, 2018, no. 3, pp. 51–57 (in Russian) [**Жирнов А. А., Абдрахманов С. У., Шапошник Ю. Н., Конурин А. И.** Оценка устойчивости массива горных пород и выбор типа и параметров крепления выработок на Орловском полиметаллическом месторождении // Горн. журнал. — 2018. — № 3. — С. 51–57.]
12. **Kunanbayev N. S., Makarov A. B., Tereshin A. A., and Sosunov Yu. A.** Geomechanical processes in the development of the Orlovsky field, Mining Journal, 2000, no. 5, pp. 10–13 [**Кунаубаев Н. С., Макаров А. Б., Терешин А. А., Сосунов Ю. А.** Геомеханические процессы при разработке Орловского месторождения // Горн. журнал. — 2000. — № 5. — С. 10–13.]
13. **Shaposhnik Yu. N., Konurin A. I., and Shokarev D. A.** Development of technology for mine workings under conditions of intensive oxidation of sulphide ores at Orlovsky field, Vestnik RUDN. Ser. Engineering Studies, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 235–245 (in Russian) [**Шапошник Ю. Н., Конурин А. И., Шокарев Д. А.** Разработка технологии крепления горных выработок в условиях интенсивного окисления сульфидных руд на Орловском месторождении // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. — 2018. — Т. 19. — № 2. — С. 235–245.]
14. **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.]
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 // 25-й Всемирный горный конгресс. — Астана, 2018.]