



**К ВОПРОСУ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ  
СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

**С. А. Неверов<sup>1</sup>, А. И. Конурин<sup>1</sup>, А. А. Неверов<sup>1</sup>, Н. П. Медведева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: nsa\_nsk@mail.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет, E-mail: nado2004@bk.ru,  
просп. К. Маркса 20, г. Новосибирск 630073, Россия*

По отношению к классу систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород рассмотрена методология выбора и обоснования вариантов технологий на основе рейтингового подхода к анализу определяющих факторов по условиям безопасности и эффективности горных работ. Разработан формализованный прием бальной системы, позволяющий оперативно решать вопросы в части освоения геотехнологий на основе прогнозируемой устойчивости горных выработок, величины потерь и разубоживания руды с учетом ценности добываемого минерального сырья. Установлена область рационального влияния вариантов подэтажного и этажного обрушения в различных горно-геологических и геомеханических условиях выемки.

*Система разработки, подэтажное и этажное обрушение, рейтинговая оценка, развитие, устойчивость, показатели извлечения, область применения*

**ABOUT RATING ASSESSMENT OF MINING SYSTEMS USED AT ORE DEPOSITS**

**S. A. Neverov<sup>1</sup>, A. I. Konurin<sup>1</sup>, A. A. Neverov<sup>1</sup>, and N. P. Medvedeva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: nsa\_nsk@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Technical University,  
E-mail: nado2004@bk.ru, pr. K. Marxa 20, Novosibirsk 630073, Russia*

The idea of selecting and justifying the technology options based on a rating approach to the analysis of determining factors for the safety and efficiency of mining operations is considered with regard to the class of mining systems with caving of ore and enclosing rocks. A formalized method of the scoring system has been developed, which makes it possible to quickly make decisions regarding the use of geotechnologies based on the predicted stability of mine workings, the amount of losses and dilution of ore, taking into account the value of recovered minerals. The domain of rational influence of sublevel and block caving in different mining, geological and geomechanical conditions has been determined.

*Mining system, sublevel and block caving, rating assessment, development, stability, recovery values, scope of application*

**Развитие методологии выбора систем разработки.** На сегодняшний день выбор и обоснование подземных технологий выемки рудных месторождений в большинстве своем случаев подменяется практикой эксплуатации действующих рудников или экспертной оценкой, которые не способны учесть все многообразие горно-геологических и горнотехнических условий разработки залежей. Использование подобных аналогий зачастую приводит к техническим решениям, не соответствующих безопасности ведения очистных работ, а также к экономическим и социальным проблемам.

Современный уровень развития добычи полезных ископаемых, в том числе систем разработки, определяется, главным образом, степенью технического прогресса в горнодобывающей отрасли и непрерывным сокращением разведанных богатых участков руд с массовым вводом в эксплуатацию более бедных глубокозалегающих запасов месторождений. При этом значение и роль основных факторов, влияющих на выбор геотехнологии, трансформируются из категории важных и определяющих в менее значимые за относительно короткие промежутки времени. Так, одни горно-геологические факторы остаются без требуемого внимания, другим придается особая ценность. Это обусловлено изменением условий залегания рудных тел с ростом глубины горных работ, на которые существенное воздействие оказывает техногенная деятельность от разработки месторождений. Например, в настоящее время заметно расширяется область освоения систем разработки поэтажного и этажного обрушения (самообрушения).

Исходя из изложенного следует, что выбор систем разработки зависит от факторов (условно постоянных и переменных), меняющихся в широком диапазоне и являющихся предельными для конкретного месторождения, т. е. одни и те же факторы для одних рудных залежей будут критериальными, для других — менее важными. Последнее указывает на необходимость развития рейтинговой классификации систем разработки, основанной на дифференцированном подходе обоснования геотехнологий применительно к сложным условиям больших глубин.

Большое количество систем разработки свидетельствует о сложности их классификаций, основанных на множестве критериальных признаков [1–7]. В качестве признаков разделения подземных технологий широко используются:

- тип и параметры месторождения (W. R. Crane, G. J. Young, И. Покровский, Г. Е. Баканов, Л. И. Барон);
- способ управления выработанным пространством (F. W. Sperr, Y. H. Rayt, E. C. Mitke, В. Н. Семевский и др.);
- условия поддержания очистного пространства (J. F. Clelland, C. F. Sackson и E. D. Gardner, классификация Горного бюро США, Н. И. Трушков, Н. А. Стариков, Г. Н. Попов, В. Р. Именитов);
- состояние очистного пространства (М. И. Агошков, Р. П. Каплунов и др.);
- условия поддержания в период отработки и последующее погашение выработанного пространства (В. Т. Маркелов);
- тип забоя, способ управления кровлей, способ и вид подсечки блока (Американский институт горных инженеров и металлургов);
- направление развития фронта очистной выемки и особенности заполнения выработанного пространства (О. А. Байконуров).

В условиях промышленного производства многие из этих признаков по сути имеют “типичную” степень структуризации систем разработки при полном отсутствии дифференцированного поиска геотехнологий. В связи с этим, в реальных условиях горнодобывающих предприятий большинство оценочных критериев мало применимы.

Непрерывное понижение горизонта очистных работ, получение новых данных о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород, а также практика эксплуатации подземных рудников обуславливают необходимость дальнейшего развития и совершенствования существующих фундаментальных классификаций за счет освоения и широкого внедрения рейтинговых оценок, созданных на большой базе данных по разрабатываемым месторождениям.

Согласно ранее выполненным исследованиям по обоснованию различных вариантов систем разработки, в том числе с обрушением [8–10], установлено, что каждому виду модельного представления геосреды по глубине выемки соответствует своя область безопасного освоения технологии с дифференцированными параметрами.

Все это является основанием для разработки рейтинговой методологии выбора систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Форсирует решение рассматриваемой проблемы в одинаковой степени как занижение, так и преувеличение предельных возможностей и граничных условий применения выделенного класса геотехнологий.

Подобный ранжированный подход к оценке и выбору горных технологий при постоянном понижении горизонта выемки полезных ископаемых в значительной степени повышает эффективность принятых технико-экономических решений по системам разработки на стадии проектных и внедренческих работ (сокращает периоды проектирования и продвижения документации более чем в 2–3 раза), исключая вероятности возникновения негативных последствий от ошибочных решений.

**Концепция рейтинговой оценки систем разработки с обрушением.** Сложившиеся представления об ограниченной области применения целых классов и вариантов систем разработки как по глубине выемки, так и по условиям устойчивости массива горных пород во многом обусловлены опытом эксплуатации рудных месторождений и установившимися догмами, которые перестают быть обязательными в свете развития новых знаний о явлениях и процессах, происходящих в недрах, связанных с добычей полезных ископаемых. В данном случае рейтинговая оценка геотехнологий позволит в значительной степени расширить технологические зоны продуктивного освоения технологий, комбинирующих в себе безопасность добычи с высокими технико-экономическими показателями эксплуатации месторождений.

Концепция данного исследования — совершенствование способов выбора и обоснования систем разработки, основанных на многофакторном анализе морфоструктурных особенностей рудных месторождений, реализующихся на базе параметризации геомеханических моделей геосреды с учетом глубины развития горных работ и показателей полноты и качества извлечения запасов из недр [11–16].

В качестве критериальных признаков рейтинговой оценки систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород целесообразно использовать: глубину ведения горных работ; геомеханические модели геосреды; параметры системы разработки; степень нарушенности и структурное ослабление рудо-породных массивов; показатели полноты и качества извлечения запасов. На рис. 1 показаны номограммы к рейтинговому подходу выбора систем разработки поэтажного и этажного обрушения руды при выемке мощных крутопадающих залежей применительно к различным горно-геологическим и геомеханическим условиям отработки с учетом глубины их залегания.

По аналогии с широко используемыми в мировой горной практике рейтинговыми классификациями устойчивости массивов горных пород (*Q*-система Бартона, *RMR* Бенявского, *MRMR* Лобшира и др.), предназначенных для определения типов крепления выработок и устойчивых параметров обнажений, рейтинговая оценка систем подземной разработки месторождений полезных ископаемых можно рассматривать как перспективное развитие методологии выбора и обоснования геотехнологий, в которой одним из ключевых факторов выступает геомеханическая параметризация геосреды.

В статье предлагается концептуальная рейтинговая оценка выбора технологий добычи руды с обрушением, которая по мере развития научных представлений может пополняться или трансформироваться в более формальные виды, сохраняя при этом идеологию исследований и прикладной оперативный характер. Расчет рейтинга технологий обуславливает определение показателей геомеханического состояния  $K_{gs}$  и технологической эффективности  $K_{te}$ , вбирающих в себя принципы безопасной и эффективной добычи руд.

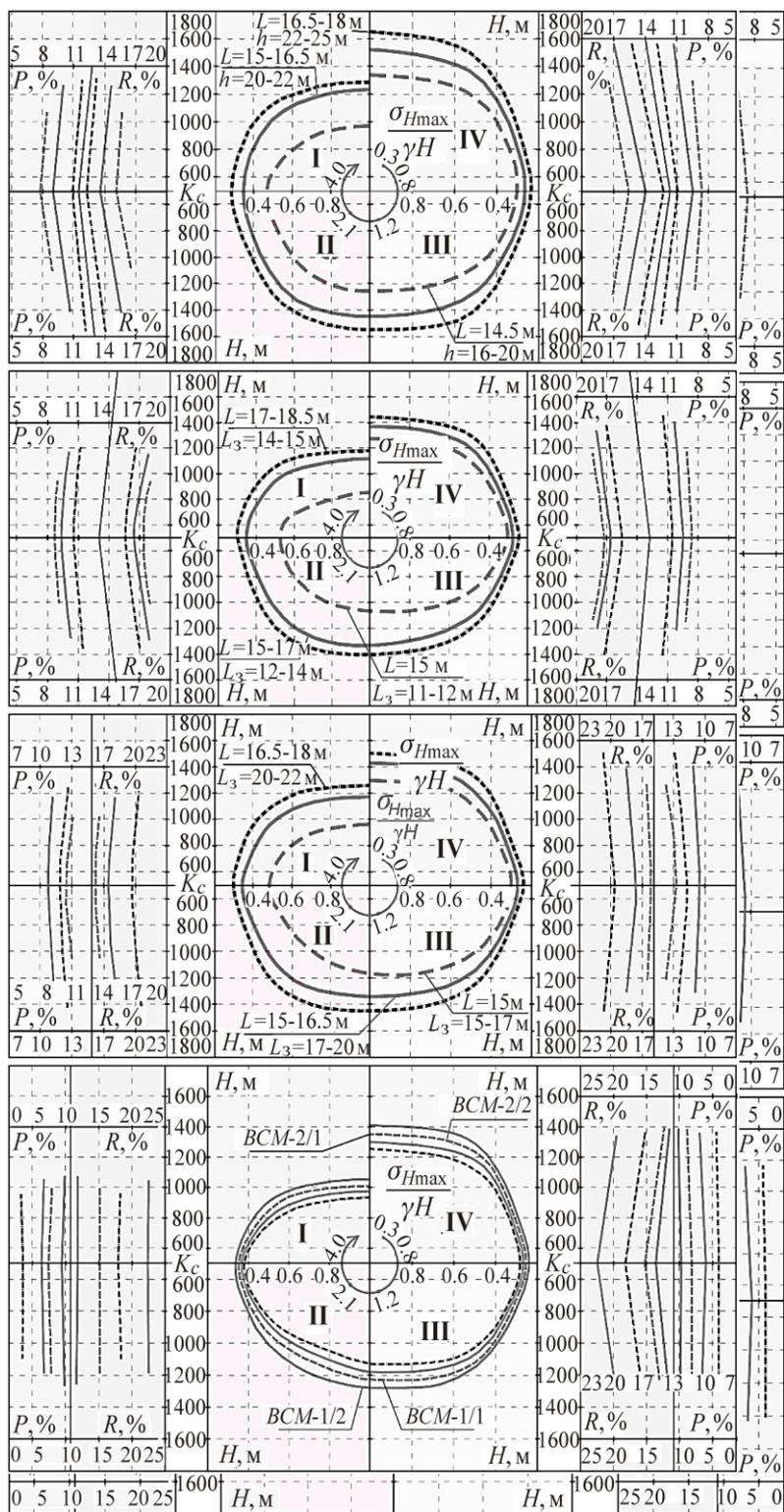


Рис. 1. Номограммы к рейтинговой оценке определения области применения системы разработки подэтажного обрушения: *a* — с торцовым выпуском *T*; *б* — с площадно-торцовым из ромбовидных слоев *PTR*, *в* — с площадно-торцовым из прямоугольных слоев *PT*, *г* — системы разработки этажного обрушения *BSM*; I, II, III, IV — тип напряженного состояния; *H* — глубина добычи, м; *K<sub>c</sub>* — коэффициент структурного ослабления; *P* и *R* — потери и разубоживание руды соответственно, %;  $\sigma_{Hmax}$  — максимальные горизонтальные напряжения, МПа;  $\gamma$  — удельный вес горных пород, МН/м<sup>3</sup>; *L* — расстояние между буро-доставочными выработками, м; *h* — высота подэтажа, м; *L<sub>3</sub>* — расстояние между погрузочными заездами, м; *BSM-1/1*, *BSM-1/2* и *BSM-2/1*, *BSM-2/2* — этажное обрушение с днищем блоков, оборудованным погрузочными пунктами с двумя и четырьмя точками выпуска 1/1, 2/1 —  $L \times L_3 = (32 - 36) \div (15 - 18)$  м; 1/2, 2/2 —  $L \times L_3 = (36 - 40) \div (18 - 22)$  м

Значения индексов  $K_{gs}$  и  $K_{te}$  устанавливаются по следующим зависимостям:

$$K_{gs} = \lambda \frac{H}{H_{\max}} \cdot \frac{1}{K_c}, \quad (1)$$

где  $H$  — глубина ведения горных работ, м;  $H_{\max}$  — предельная глубина освоения системы разработки с учетом геомеханической параметризации массива горных пород, м;  $\lambda$  — коэффициент бокового давления (коэффициент концентрации максимальных горизонтальных напряжений), определяется типом напряженного состояния (I — геодинамическим, II — тектоническим, III — геостатическим, IV — гравитационным);  $K_c$  — коэффициент структурного ослабления, д. ед.

$$K_{te} = \sqrt{\frac{k_{val}}{K_{пнв}}} \cdot \frac{1}{P \cdot R}, \quad (2)$$

где  $k_{val}$  — коэффициент относительного качества руды (условный, устанавливается на основе анализа и обобщения базы данных по действующим месторождениям, осуществляющих добычу полезных ископаемых системами разработки с обрушением);  $K_{пнв}$  — коэффициент объема подготовительно-нарезных выработок. Для технологий с обрушением руды и вмещающих пород по прогнозным оценкам  $k_{val}$  находится в диапазоне 1–25 и определяется по табл. 1, для систем разработки с обрушением — по табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Коэффициент относительного качества руды

$k_{val}$	Условное описание	Примечание, примеры
1–10	Бедные	Железные руды с содержанием Fe менее 35 %, полиметаллические руды с содержанием Pb 1.0–2.1 % или Pb + Zn 2.0–4.0 %, золота до 2.0 г/т, это руды, требующие обогащения
8–18	Рядовые	Полиметаллические руды Pb + Zn 4.0–7.0 %, золота 2.0–3.0 г/т
16–25	Богатые	Железные руды с содержанием Fe более 50 %, золота до 5.0 г/т, это руды, не требующие первичного обогащения

Следует отметить “несовершенство” расчета показателя  $K_{te}$  из-за весьма посредственных значений  $k_{val}$  и  $K_{пнв}$ , которые требует более детальных исследований. Вместе с этим на этапе предварительных проектных проработок и обоснований систем разработки его применение в таком виде вполне приемлемо и допустимо с достижением удовлетворительных результатов.

Собственно, рейтинг системы разработки  $R_{ums}$  рассчитывается по формуле:

$$R_{ums} = \left( \frac{H_{\max} - H}{H} \right) \sqrt{\frac{K_{te}}{K_{gs}}} \geq 0. \quad (3)$$

ТАБЛИЦА 2. Коэффициент объема подготовительно-нарезных выработок

Технология	$K_{пнв}$					
	$H / H_{\max}$					
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Система разработки подэтажного обрушения с торцовым выпуском руды $T$	16	15	14	13	12	11
Система подэтажного обрушения с площадно-торцовым выпуском руды из слоев ромбовидной формы $PTR$	18	17	16	15	13	12
Система подэтажного обрушения с площадно-торцовым выпуском руды из слоев прямоугольной формы $PT$	15	14	13	12	11	10
Систем этажного обрушения с площадным выпуском руды из пунктов, оборудованных двумя точками погрузки $ВСМ-1$	12	11	10	9	8	7
Систем этажного обрушения с площадным выпуском руды из пунктов, оборудованных четырьмя точками погрузки $ВСМ-2$	14	13	12	11	10	9

Выбор системы разработки проводится путем расчета рейтинга  $R_{ums}$  всех рассматриваемых геотехнологий в заданных условиях выемки. Окончательное решение по выбору принимается в пользу наивысшей балльной оценки. Минимальные значения абсолютных единиц соответствуют менее пригодной системе, максимальные — наиболее рациональной геотехнологии. Далее по разработанным номограммам (рис. 1) устанавливаются безопасные параметры принятого варианта добычи. Область эффективного применения, рассмотренных технологий с обрушением руды и вмещающих пород показана на рис. 2.

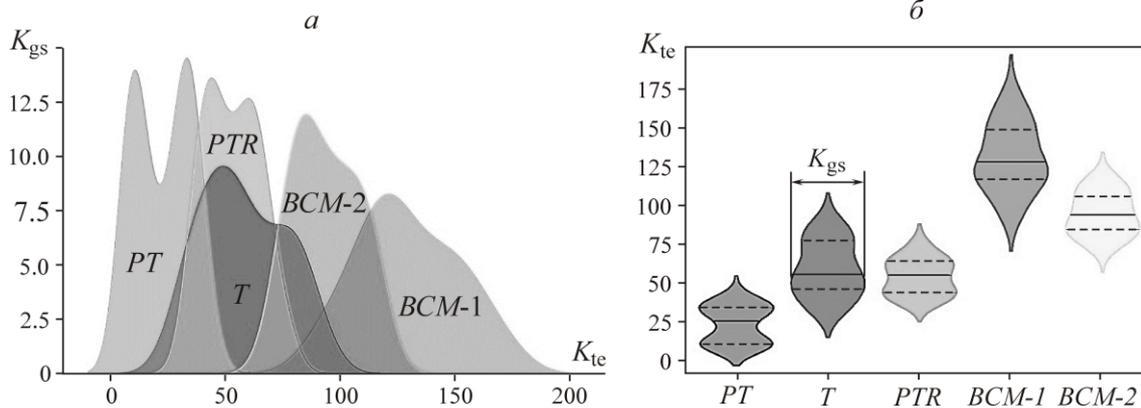


Рис. 2. Рейтинговая оценка систем разработки и область их эффективного применения: *а* — линейный график; *б* — скрипичный график

Ширина “лепестка” на рис. 2б соответствует  $K_{gs}$ . Штрихами выделена рациональная область применения систем разработки в зависимости от показателя технологической эффективности  $K_{te}$ . Диаграмма иллюстрирует основные статистические показатели: медиану (50% квантиль) — это линия по середине, верхний и нижний квантили (25 и 75%) — верхняя и нижняя штриховые линии. Из рис. 2 также видно образование областей совместного влияния различных вариантов систем разработки, в этих случаях в дополнение к описанным положениям следует руководствоваться опытом отработки месторождений в подобных условиях.

Развитие рейтингового подхода для обоснования границ освоения различных способов добычи имеет важное прикладное значение, связанное с оптимальным выбором систем разработки и их параметров, а также с условиями гибкого перехода от одной технологии к другой в зависимости от постоянно меняющегося напряженного поля земной коры, обеспечивающих не только безопасность горных работ, но и экономическую эффективность, связанную с полной извлечением запасов из недр. Все это позволяет определять области применения и предельную глубину освоения систем разработки в рамках каждой геомеханической модели геосреды и уйти от стереотипов ограниченности применения некоторых классов и вариантов геотехнологий, например, по глубине отработки и устойчивости руд и вмещающих пород.

Приведенная рейтинговая оценка позволила установить параметры, область рационального использования и пороговую глубину освоения систем разработки подэтажного обрушения с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды, а также этажного принудительного (блокового) обрушения и самообрушения на рудниках: Артемьевский и Иртышский (Восточный Казахстан), Юбилейный и Удачный (Россия, Якутия), а также Ведугинского месторождения. Безопасная глубина применения этих геотехнологий в выделенных геомеханических условиях обозначенных горных предприятий ограничивается значениями соответственно для подэтажных систем с торцовым и площадно-торцовым выпуском руды в 1400 и 1200 м, для этажного обрушения — не более 1200 м.

## ВЫВОДЫ

Системно-структурное ранжирование критериальных признаков, входящих в рейтинговую оценку систем разработки, позволяет на стадии проектирования и проведения исследовательских работ осуществлять корректный выбор способов и эффективного порядка отработки месторождений, исключая неоправданно высокие трудовые и финансовые затраты, связанные с принятием не только ошибочных результатов (корректировка по времени проектной документации при прохождении экспертизы может составлять от полугода до двух лет и более), но и субъективных предпочтений, не отвечающих требованиям безопасности горных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Schweitzer J. K. and Johnson R. A.** Geotechnical classification of deep and ultra-deep Witwatersrand mining areas, South Africa, *Mineralium Deposita*; 1997, 32 (4), pp. 335–348.
2. **Kelly B.** Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western United States: A study in stress heterogeneity *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, 2013, pp. 139–150.
3. **Hergert T. and Heidbach O.** Geomechanical model of the Marmara Sea region-II. 3-D contemporary background stress field; *Geophysical Journal International*, 2011; 185 (3), pp. 1090–1102.
4. **Sibson R. H., Ghisetti F. C., and Crookbain R. A.** Andersonian wrench faulting in a regional stress field during the 2010-2011 canterbury, new zealand, earthquake sequence, *Geological Society Special Publication*, 2012; 367 (1), pp. 7–18.
5. **Vikulin A. V. and Ivanchin A. G.** Modern concept of block hierarchy in the structure of geomedium and its implications in geosciences, *Journal of Mining Science*; 2013, vol. 49, no. 3, pp. 395–408. [**Викулин А. В., Иванчин А. Г.** О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 395–408.]
6. **Oparin V. N., Tapsiev A. P., and Freidin A. M.** On the classification of systems for the development of ore deposits at great depths, *Journal of Mining Science*; 2008, no. 6, pp. 47–57. [**Опарин В. Н., Тапси́ев А. П., Фре́йдин А. М.** О классификации систем разработки рудных месторождений на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2008. — № 6. — С. 47–57.]
7. **Einbinder I. I., Galchenko Yu. P., Ovcharenko O. V., and Patskevich P. G.** The main directions of development of geotechnologies of underground mining of ore deposits at great depths, *Mining Journal*, 2017, no. 11, pp. 65–71. [**Айнбиндер И. И., Галченко Ю. П., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г.** Основные направления развития геотехнологий подземной разработки рудных месторождений на больших глубинах // Горный журнал. — 2017. — № 11. — С. 65–71.]
8. **Savich I. N., Mustafin V. I., Lifar-Laptev A. A., Yakovlev A. M., and Syrenov M. O.** Influence of loss and dilution indicators when using a chamber mining system with diamond-shaped chambers (in conditions of medium stability ores), *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020, no. S25, pp. 43–57. [**Савич И. Н., Мустафин В. И., Лифарь-Лаптев А. А., Яковлев А. М., Сыренов М. О.** Влияние показателей потерь и разубоживания при применении камерной системы разработки с выемкой ромбовидными камерами (в условиях руд средней устойчивости) // ГИАБ. — 2020. — № S 25. — С. 43–57.]
9. **Neverov A. A., Neverov S. A., Tapsiev A. P., Shchukin S. A., and Vasichev S. Yu.** Substantiation of geotechnologies for mining ore deposits on the basis of the development of model ideas about the change in the parameters of the natural stress field, *Journal of Mining Science*; 2019, no. 4, pp. 74–89. [**Неверов А. А., Неверов С. А., Тапси́ев А. П., Щукин С. А., Васичев С. Ю.** Обоснование геотехнологий выемки рудных месторождений на основе развития модельных представлений об изменении параметров природного поля напряжений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 74–89.]

10. **Konurin A. I., Shchukin S. A., Neverov S. A., and Neverov A. A.** Sublevel caving under protection of ore-and-barren rock cushion during transition from open pit to underground mining, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 262(1), 012033.
11. **Golik V. I., Garifullina I. Yu., Abdulkhalimov A. G., Zaseev I. A., and Maistrov Yu. A.** On the problem of safety of combined development of the Tyrnyauz deposit, Occupational Safety in Industry, 2021, no. 1, pp. 14–20. [Голик В. И., Гарифуллина И. Ю., Абдулхалимов А. Г., Зассеев И. А., Майстров Ю. А. К проблеме безопасности комбинированной разработки месторождения Тырныауз // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 1. — С. 14–20.]
12. **Petlovanyi M., Lozynskiy V., Zubko S., Saik P., and Sai K.** The influence of geology and ore deposit occurrence conditions on dilution indicators of extracted reserves, Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik, 2019, 34(1), pp. 83–91.
13. **Kaiser P. K., Diederichs M. S., Martin C. D., Sharp J., and Steiner W.** Underground works in hard rock tunnelling and mining, ISRM International Symposium 2000; 2018.
14. **Sobhi M. A. and Li L.** Numerical investigation of the stresses in backfilled stopes overlying a sill mat, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering; 2017, 9(3), pp. 490–501.
15. **Neverov S. A., Konurin A. I., Neverov A. A., Nikolsky A. M., and Konurina M. I.** Investigation of ore extraction indicators in the area draw depending on the design of drawpoints, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2019, 19 (1.3), pp. 355–368.
16. **Einbinder I. I., and Kaplunov D. R.** Risk-oriented approach to the choice of geotechnologies for underground mining at great depths, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019, no. 4, pp. 5–19. [Айнбиндер И. И., Каплунов Д. Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // ГИАБ. — 2019. — № 4. — С. 5–19.]