



ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ ИРОКИНДИНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. В. Айкин¹, Р. В. Шихаметов², Д. Ф. Зяятдинов³, Е. Д. Пряничников²

¹ООО НПО “Алзамир”, E-mail: Andrey.Aykin@yandex.ru,
ул. Шестакова 6, г. Кемерово 65000, Россия

²ООО “Ирокинда”, E-mail: ed.prianichnikov@nordgold.com,
ул. Таежная 5, Муйский район, п. Ирокинда 671575, Республика Бурятия, Россия

³ИГД СО РАН им. Н. А. Чинакала, E-mail: damir.zayatdinov@yandex.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия

Представлено практическое решение задачи выбора оптимальной системы разработки жилы Серебряковская Ирокиндинского месторождения. Выполнен анализ горно-геологических и горнотехнических условий отработки месторождения и выявлены участки со сложными условиями, где проведено уточнение физико-механических свойств горных пород. Осуществлены аналитические расчеты основных параметров систем разработки с помощью метода численного 3D моделирования в программном комплексе Map3D.

Добыча золота, система разработки, 3D моделирование, горные работы, рудная жила

JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR MINING SYSTEM OF THE IROKINDINSKY GOLD DEPOSIT

A. V. Aykin¹, R. V. Shikhametov², D. F. Zayatdinov³, and E. D. Pryanichnikov²

¹LLC Scientific and Production Association “Alzimir”, E-mail: alien-323@mail.ru,
ul. Shestakov 6, Kemerovo 650000, Russia

²LLC “Irokinda”, E-mail: ed.prianichnikov@nordgold.com
ul. Tayozhnaya 5, Muisky District, Irokinda 671575, Republic of Buryatia, Russia

³Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: damir.zayatdinov@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia

A practical solution for selecting the optimal mining system for Serebryakovskaya vein of the Irokindinsky deposit is presented. The geological and engineering conditions for mining the deposit were analyzed and the areas with complex conditions where specification of physical and mechanical rock properties is required were identified. Analytical calculations of main mining parameters were performed using numerical 3D modeling in the software package Map3D.

Gold mining, mining system, 3D modeling, mining operations, ore vein

При разработке технического проекта отработки Ирокиндинского золоторудного месторождения возникла необходимость выбора и обоснования оптимальных параметров системы разработки жилы Серебряковская. Для этого выполнен комплекс исследований, включающий в себя:

- анализ технической документации отработки запасов Ирокиндинского месторождения;
- определение физико-механических свойств вмещающих пород и рудной жилы, а также количественная оценка трещиноватости вмещающих пород различными методами;
- аналитическую оценку параметров систем разработки;
- численное 3D моделирование выемочного участка для уточнения параметров целиков и размеров выемочного участка.

Ирокиндинское золоторудное месторождение находится в северной части Республики Бурятия. Рельеф района высокогорный, преобладающие типы рельефа альпинотипные с крутизной склонов до 30–40°, абсолютные отметки водоразделов более 2000 м, относительные превышения над днищами долин до 1000 м. Климат района резко континентальный с холодной продолжительной зимой и коротким дождливым летом. Среднегодовая температура воздуха –8.2°С, средняя температура января –32.6°С, июля +15.4°С. Устойчивый снежный покров образуется к началу октября и разрушается к началу мая, продолжительность зимнего периода около семи месяцев.

Месторождение находится в сейсмически активном районе с вероятной максимальной силой землетрясений 9 баллов. Золотокварцевые жилы, являющиеся рудными телами Ирокиндинского месторождения, характеризуются следующими основными закономерностями и особенностями:

1. Приуроченность к трем основным системам трещин: северо-восточным (45 – 60°), северо-западным (300 – 350°), и субмеридиональным (5 – 20°). Все три системы пологопадающие (25 – 47°) в западных румбах.

2. Длина по простиранию изменяется в пределах 60–400 м, по падению — более 300 м.

3. Сложная морфология жил. Раздувы и пережимы могут чередоваться через 20–30 м, мощность в раздувах достигает в среднем 3–4 м и более.

4. Продуктивное оруденение локализовано в пределах рудных столбов, протяженность которых по простиранию колеблется от 30 до 350 м, по вертикали некоторые обнаружены на 350 м.

5. Распределение золота в рудных телах носит весьма неравномерный характер.

6. Контакты жил с вмещающими породами четкие, прямолинейные или извилистые, сопровождающиеся зоной рассланцевания мощностью до 3 м.

В ходе осмотра выработок отобраны пробы для проведения лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород рудной зоны, кровли и почвы жилы Серебряковская, в том числе в зоне рассланцевания, вмещающие породы которой представлены выветрелыми тонкозернистыми песчаниками темно-серого цвета неяснослоистой текстуры, по своей структуре не крепкие, хрупкие и сильно трещиноватые. Из анализа отобранных пород выявлено, что вмещающие породы участка жилы Серебряковская представлены гнейсами с зёрнами кварца и углистыми сланцами с прожилками кварца, физико-механические свойства которых приведены в таблице.

Результаты определения физико-механических свойств горных пород жилы Серебряковская

Номер пробы	Петрографический состав	Влажность, %	$W_{п}$, %	V , г/см ³	Плотность г/см ³	Общая пористость	Временное сопротивление, кг/см ²								K_p	Данные паспорта				
							в сухом состоянии				в водонасыщенном состоянии					в сухом состоянии		в водонас. состоянии		
							$\sigma_{сж}$		σ_p		$\sigma_{сж}$		σ_p			C , кг/см ²	α , град.	C , кг/см ²	α , град.	
							1	2	1	2	1	2	1	2						
1	Кварц с внедрением пирита	0.092	0.50	2.61	2.65	1.64	598	515	137	145	325	309	116	105	0.60	136.6	34.1	90.1	29.5	
		0.089		2.60	2.68		433		152		292		94							
		0.095		2.61	2.62															
				2.61																
2	Гнейсы с зёрнами кварца	0.091	0.18	2.77	2.86	3.09	524	667	200	215	385	397	125	132	0.60	189.3	30.8	114.5	30.1	
		0.094		2.78	2.85		810		231		408		138							
		0.088		2.75	2.86															
				2.77																
3	Углистый сланец с прожил. кварца	0.107	0.16	2.75	2.84	2.88	725	745	200	231	577	562	191	201	0.73	207.4	31.8	168.8	28.5	
		0.114		2.76	2.82		765		261		557		210							
		0.099		2.76	2.85															
				2.74																

Примечание. $W_{п}$ — водонасыщенность; V — объемная масса; 1 — отдельный образец; 2 — среднее; $K_p = \sigma_{сж(вн)} / \sigma_{сж}$ — коэффициент размягчаемости; C — сцепление в куске; α — угол внутреннего трения.

Оценка нарушенности массива осуществлялась по показателю кусковатости керна RQD (Rock Quality Designation) [1, 2] на основе исследования 22-х кернов скважин. Показатель RQD составил 45.15 – 76.19 % при среднем значении 59.31 %, что относится к категории II и характеризует массив как устойчивый.

Качество породного массива определялось по двум международным методикам: классификации Бенявского (RMR) [2, 3] и критерию Бартон (Q) [4–7]. Рейтинг массива горных пород по RMR (Rock Mass Rating) составил 51, что соответствует III-й категории устойчивости массива — среднеустойчивые породы. Качество породного массива по показателю индекса Q составило 0.7 и характеризует его как очень слабый. С учетом естественного разброса данных и мирового опыта оценки качества массивов двумя альтернативными методами категория устойчивости жильных зон находится близко к границе между неустойчивыми (Poor) и средней устойчивости (Fair).

Для аналитического расчета параметров систем отработки разработаны расчетные схемы, представленные на рис. 1, 2 [8–10].

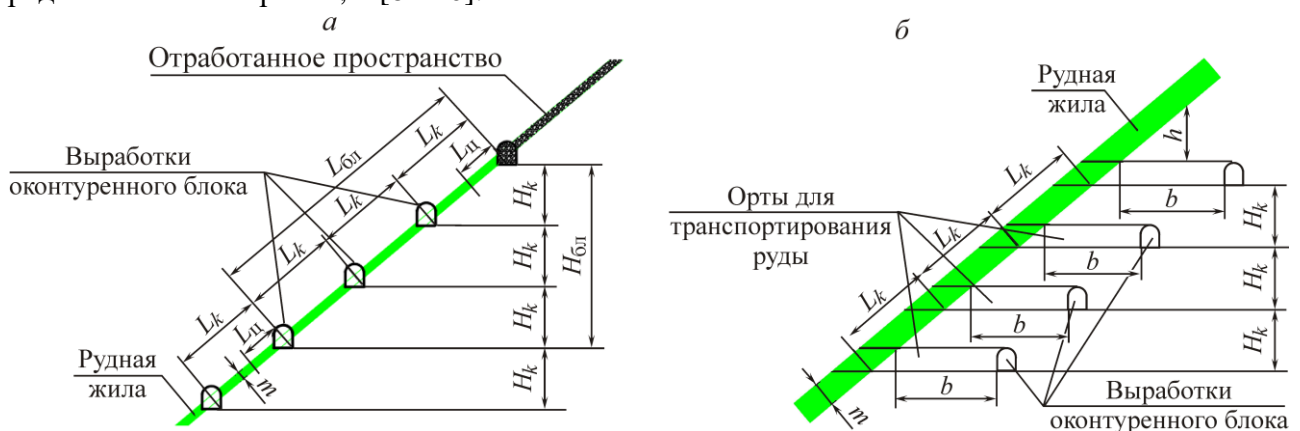


Рис. 1. Расчетная схема параметров выемочного участка при рудной подготовке (а) и полевой (б)

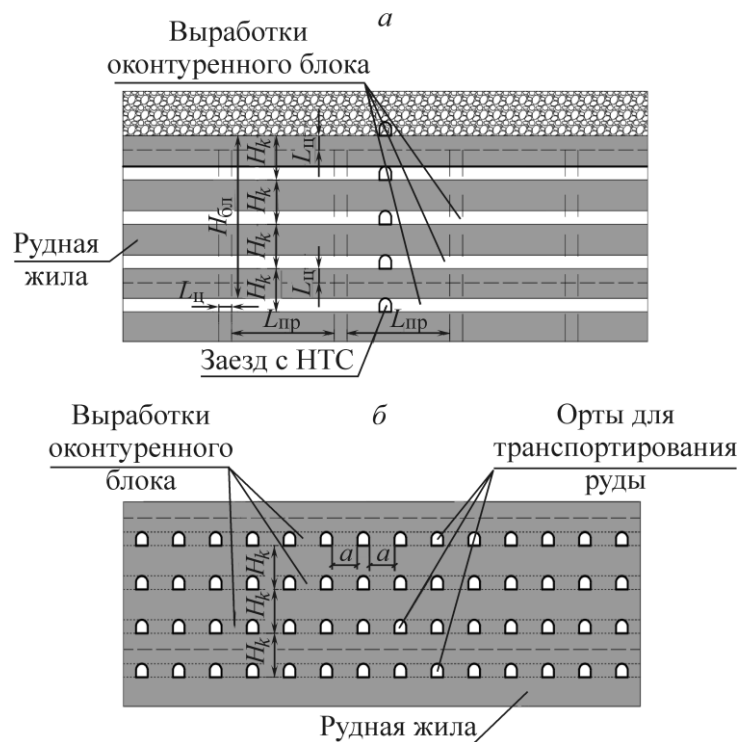


Рис. 2. Расчетная схема параметров выемочного участка при рудной подготовке (а) и полевой (б) (вертикальная проекция)

Оценка устойчивых обнажений очистных камер выполнялась по методике Мэтьюза–Потвина [4, 5, 11, 12]. Для определения параметров выемочной камеры рассчитывался показатель устойчивости обнажения N для двух блоков — НТС-2 с сильнонарушенными породами и НТС-3 со среденарушенными породами по формуле:

$$N = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot A \cdot B \cdot C,$$

где RQD — модель качества породы; J_n — количество систем трещин; J_r — показатель шероховатости трещин; J_a — показатель сцепления поверхностей трещин; A — действующие напряжения на контуре камер; B — ориентировка трещин относительно обнажения висячего бока или кровли камер; C — коэффициент угла наклона обнажения.

В результате расчетов показатель устойчивости составил для сильнонарушенных пород 1.2, для среденарушенных — 3.43. Эквивалентный пролет при этом равен 2.6 и 6.67 соответственно. На основании полученных данных выявлена зависимость размеров очистной камеры по восстанию и простиранию и построен график устойчивого обнажения пород кровли рудной жилы (рис. 3), по которому специалисты проектной организации и инженеры рудника определили максимальный пролет очистной камеры при заданной высоте этажа выемочного участка.

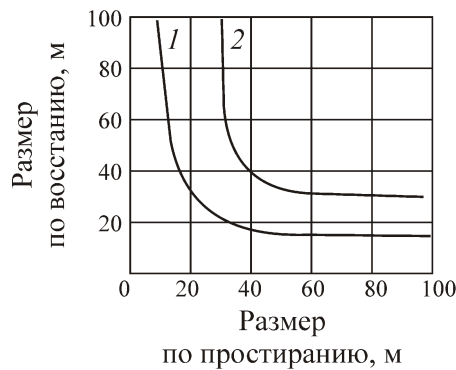


Рис. 3. График устойчивых обнажений пород кровли: 1 — при сильнонарушенных породах (блок НТС-2); 2 — при среденарушенных (блок НТС-3)

Параметры целиков выбирались исходя из их устойчивости по методикам [12–19] для условий разработки наклонных жил малой мощности. При определении устойчивых параметров целиков для заданной ширины требуется, чтобы напряжения в них не превышали с необходимым запасом прочность пород, слагаемых данным целиком. Для выбора оптимальных параметров проведена оценка устойчивости ряда их размеров. На основании аналитических расчетов получены следующие оптимальные параметры целиков при рудной подготовке — подэтажный целик 6 м, междукамерный целик 5 м, при полевой подготовке — подэтажный целик 8 м, охранный целик 15 м.

Проверка параметров системы разработки осуществлялась с помощью метода численного 3D моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород [3, 20, 21] с использованием программного комплекса Mar3D со встроенным САПР для построения сложных трехмерных моделей, анализом и визуализацией горного давления и упругих деформаций на контуре выработок (камер) и в целиках при различных критериях нарушения массива горных пород и руд [22].

Оценка напряженно-деформированного состояния массива выполнялась как в зоне ведения очистных работ, так и в подготовительных штреках исходя из количественной характеристики горных пород и руд при действии девиаторных напряжений на основе 14 моделей для различных условий залегания рудной жилы. Примеры моделей жилы представлены на рис. 4.

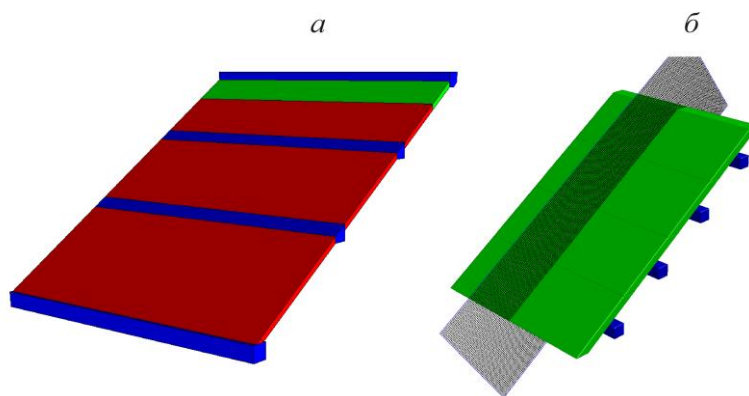


Рис. 4. Численная модель жилы, построенная в программе Mar3D: *а* — рудная подготовка выемочного участка; *б* — полевая подготовка выемочного участка

При численном упругом анализе напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы участка рудника в процессе развития и ведения очистных работ при пошаговом анализе учитывались следующие параметры: коэффициент запаса прочности целиков, микродеформации вмещающего выработки и камеры массива, и избыточные напряжения $\Delta\sigma$ превышающие предел прочности горных пород (рис. 5).

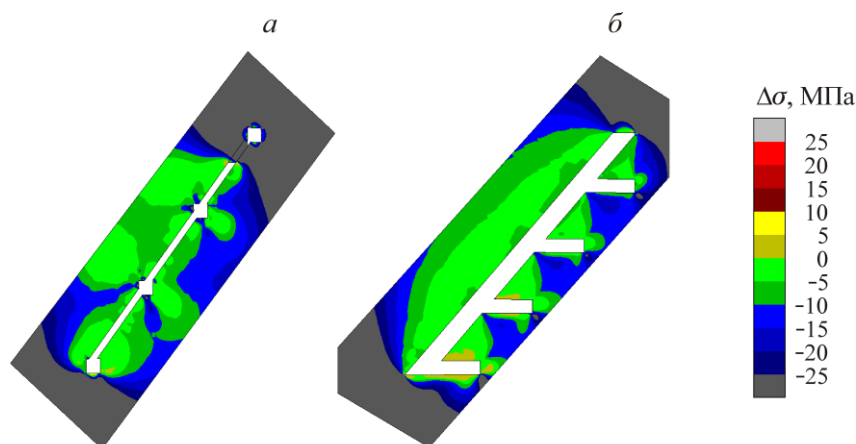


Рис. 5. Избыточное напряжение после отработки выемочного участка: *а* — при рудной подготовке выемочного участка; *б* — при полевой подготовке выемочного участка; $\Delta\sigma = -25 \div 25$ — избыточное напряжение, МПа

По результатам численного 3D моделирования напряженно-деформированного состояния горнотехнической системы отработки жилы Серебряковская на основании уточненных физико-механических свойств вмещающих пород и геомеханических исследований было определено следующее. Параметры камерной системы разработки со скважинной отбойкой руды при рудной подготовке шахтного поля удовлетворяют безопасной отработке выемочного участка. Избыточные напряжения во вмещающем массиве не регистрируются, все значения ниже нуля. Анализ микротрещиноватости показал, что в некоторых случаях наблюдается развитие зон растягивающих деформаций, но все полученные значения меньше критического значения объемного трещинообразования $\varepsilon_u^k = 350$. Из анализа параметров камерной системы разработки с полевой подготовкой выемочного участка установлено, что коэффициент запаса прочности целиков не удовлетворяет безопасной отработке выемочного участка, поэтому параметры подэтажного целика необходимо увеличить до 10 м, а расстояние от штрека до жилы рекомендуется увечить минимум до 15 м.

ВЫВОДЫ

В рамках выполнения научно-исследовательской работы “Обоснование оптимальной системы разработки Ирокиндинского золоторудного месторождения” уточнены физико-механические свойства рудной жилы и вмещающих пород, проведена оценка трещиноватости массива и влияния зоны рассланцевания на устойчивость приконтурного массива.

На основе горно-геологических условий отработки Ирокиндинского месторождения в зависимости от мощности жилы и зоны рассланцевания выделены зоны, где целесообразно применение системы разработки с рудной и полевой подготовкой: полевая подготовка — блок НТС-2 жила Серебряковская-1 и Серебряковская-2; рудная подготовка — блок НТС-2 жила Нижняя Серебряковская, блок НТС-3 жила Нижняя Серебряковская и Нижняя Серебряковская-2.

По результатам данных физико-механических свойств рудной жилы и вмещающих пород построен график устойчивого обнажения пород кровли, с помощью которой можно выбирать геометрические параметры выемочного участка при заданной высоте этажа, и разработана методика расчета параметров внутриблоковых целиков.

Проверка параметров выемочных участков методом численного 3D моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород с использованием программного комплекса Мар3D показала, что при рудной подготовке выемочного участка параметры, полученные аналитическим способом, обеспечивают безопасное ведение горных работ по добыче золотосодержащей руды. При полевой подготовке выемочного участка в целиках могут возникать критические напряжения, способствующие их разрушению, вследствие чего размеры целиков необходимо увеличить на 20 % от расчетных значений. Применение обоснованных параметров системы разработки даст возможность сократить сроки добычи руды, повысить безопасность горных работ и уменьшить разубоживание руды.

В работе принимали участие директор научно-исследовательского центра “Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии” Горного института НИТУ “МИСиС”, д.т.н., проф. В. А. Еременко, инженеры проекта центра, аспиранты Ч. В. Хажыылай, А. Р. Умаров, А. М. Янбеков и М. А. Косырева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Zubkov A. V.** Geomechanics and Geotechnology, Ekaterinburg, Ural Department, Russian Academy of Sciences, 2001, 335 pp. [**Зубков А. В.** Геомеханика и геотехнология. — Екатеринбург: УрО РАН, 2001. — 335 с.]
2. **Persson Per-Anders, Holmberg R., and Lee J.** Rock blasting and explosives engineering, Boca Raton, Published October 25, 1993 by CRC Pres, 540 pp.
3. **Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A., and Singh A. K.** Estimation of rock load in development workings of underground coal mines — A modified RMR approach, Current Science, 2018, vol. 114, no. 10, pp. 2167–2174.
4. **Barton N.** Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system, Rock classification systems for Engineering Purposes, ASTM, STP 984, American Society for Testing and Materials, 1988, pp. 59–88.
5. **Using the Q-System**, Handbook for Rock Mass Classification and Support Design, Oslo, 2015, 57 pp.
6. **Khazhylyay Ch. V., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., and Yanbekov A. M.** Calculation of the passport strength of rocks in natural conditions of the massif using the Hook-Brown criterion and the RocData program, Mining Informational Analytical Bulletin, Moscow, 2018, no. 12, pp. 92–101. [**Хажыылай 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. **Nguyen Van Minh, Eremenko V. A., Sukhorukova M. A., and Shermatova S. S.** Assessment of the influence of the shape of the excavation and the existing stresses in the massif on the formation of the tensile deformation zone at a depth of more than 1 km, Mining Informational Analytical bulletin, 2020, no. 6, pp. 67–75. [**Нгуен Ван Минь, Еременко В. А., Сухорукова М. А., Шерматова С. С.** Оценка влияния формы выработки и действующих напряжений в массиве на формирование зоны растягивающих деформаций на глубине свыше 1 км // ГИАБ. — 2020. — № 6. — С. 67–75.]
8. **Guseva N. S.** Secrets of gold mining, Moscow, Mining book, 2020, 208 pp. [**Гусева Н. С.** Секреты золотодобычи. — М.: Горная книга, 2020, 208 с.]
9. **Chernykh N. G., Melnik V. V., and Miroshnik A. I.** Scientific and methodological substantiation and implementation of a systematic approach to improving the technical level of preparation of reserves of mine fields, Moscow, Mining book, 2021, 200 pp. [**Черных Н. Г. Мельник В. В., Мирошник А. И.** Научно-методическое обоснование и реализация системного подхода к повышению технического уровня подготовки запасов шахтных полей. — М.: Горная книга, 2021, 200 с.]
10. **Dmitriev V. G. and Verzhansky A. P.** Statistical methods in mining transport, Moscow, 2021, 512 pp. [**Дмитриев В. Г., Вержанский А. П.** Статистические методы в горном транспорте — М., 2021. — 512 с.]
11. **Guidelines** for determining the size of chambers and pillars in the underground mining of nonferrous metal ores, Chita, 1988, 126 pp. [**Методические указания** по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов. — Чита, 1988. — 126 с.]
12. **Khazhylyay Ch. V., Eremenko V. A., Umarov A. R., and Yanbekov A. M.** Evaluation of stability of outcrops of frame rock structures by the Matthews-Potvin method in the design of a salt mine, Collection of 4 Conference of the International Scientific School of Academician RAS K.N. Trubetsky, Problems and prospects of integrated development and conservation of mineral resources, Moscow, IPCON RAS, 2020, pp. 172–176. [**Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Умаров А. Р., Янбеков А. М.** Оценка устойчивости обнажений каркасных горных конструкций по методу Метьюза-Потвина в условиях проектирования соляного рудника // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: сб. трудов IV конф. Междунар. научной школы академика РАН К. Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН, 2020. — С. 172–176.]
13. **Vloh N. P.** Management of rock pressure in underground mines, Moscow, Nedra, 1994, 208 pp. [**Влох Н. П.** Управление горным давлением на подземных рудниках. — М.: Недра, 1994. — 208 с.]
14. **Temporary** rules of protection of structures, natural objects and mine workings from the harmful effects of underground mining of non-ferrous metal ore deposits with unexplored process of rock shear, Leningrad, VNIMI, 1986, 74 pp. [**Временные правила** охраны сооружений, природных объектов и горных выработок от вредного влияния подземных горных разработок месторождений руд цветных металлов с неизученным процессом сдвижения горных пород — Л.: ВНИМИ, 1986. — 74 с.]
15. **Neganov V. P., Kovalenko V. I., Zaitsev B. M., Sosnovsky L. I., et al.** Technology of gold deposits development, Moscow, Nedra, 1995, 336 pp. [**Неганов В. П., Коваленко В. И., Зайцев Б. М., Сосновский Л. И. и др.** Технология разработки золоторудных месторождений. — М.: Недра. — 1995. — 336 с.]
16. **Eremenko V. A.** Development and justification of parameters of the anchoring system of inter-compartmental pillar of large cross-section and length, Mining Journal, 2020, no. 1, pp. 67–73. [**Еременко В. А.** Разработка и обоснование параметров системы анкерного крепления междукамерного целика большого сечения и протяженности // Горный журнал. — 2020. — № 1 — С. 67–73.]
17. **Eremenko V. A., Aksenov Z. V., Puhl E. K., and Zakharov N. E.** Study of the structure of the secondary stress field of the bottom-hole part of preparatory workings during sinking of the ejection hazardous formations using the Map3D program, Mining Informational Analytical Bulletin, 2020, no. 5, pp. 91–104. [**Еременко В. А., Аксенов З. В., Пуль Э. К., Захаров Н. Е.** Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D // ГИАБ. — 2020. — № 5. — С. 91–104.]

18. **Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., and Vysotin N. G.** Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining, *Eurasian Mining*, 2020, no. 1, pp. 9–13.
19. **Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., and Kosyreva M. A.** Effect of mining geometry on natural stress field in underground ore mining with conventional and nature-like technologies, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 416–425. [Еременко В. А., Галченко Ю. П., Косырева М. А. Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 98–109.]
20. **Hoek E.** *Practical Rock Engineering*. – www.rockscience.com.
21. **Hoek E., Carter T. G., and Diederichs M. S.** Quantification of the geological strength index chart., *ARMA*, 2013-672.
22. **Li C. C.** Principles of rockbolting design, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, vol. 9, issue 3, pp. 396–414.