

ПОДЗЕМНАЯ ГЕОТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННО НАРУШЕННЫХ РУД ТЫРНЫАУЗСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Зассеев И.А., Кондратьев Ю.И., Клыкова К.Ю.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ

Ключевые слова: отходы производства, нормативная прочность, вертикальная компонента напряжений, лежалые хвосты обогащения, закладка очистного пространства.

Аннотация. Первоначальная подработка запасов Тырныаузского вольфрамо-молибденового месторождения подземными и открытыми работами, слоистость руд и налегающих пород, наличие тектонических нарушений, предопределяют высокую подвижность подработанного рудовмещающего массива. Отсутствие рациональных технологических параметров для добычи в таких условиях ограничивает повсеместное внедрение систем с использованием твердеющих закладочных материалов на базе отходов горно-обогажительных процессов. Для расчета напряженного состояния рудной залежи использовали программу «Phase 2». Итоги проведенных экспериментов подтверждают эффективность выявленных в работе паттернов создания массивов из твердеющих закладок с наклонными гранями камер, выраженных через зависимости: вариации коэффициента концентрации напряжений в зависимости от расстояния до зоны выемки; трансформации прочностных свойств закладочного массива при использовании отходов вольфрамо-молибденового производства. Полученные выводы применимы на горнодобывающих предприятиях при планировании методов добычи в зонах руд, нарушенных совместным влиянием открытых и подземных операций.

UNDERGROUND GEOTECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICALLY DISTURBED ORES OF TYRNYAUZSKOYE FIELD WITH MINED SPACE

Zasseev I.A., Kondratiev Yu.I., Klykova K.Yu.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz

Keywords: production waste, regulatory strength, vertical stress component, stale enrichment tailings, laying of the treatment space.

Abstract. Initial mining of reserves of the Tyrnyauz tungsten-molybdenum deposit by underground and open work, stratification of ores and overlying rocks, the presence of tectonic disturbances, predetermine the high mobility of the worked ore-bearing massif. The lack of rational technological parameters for production in such conditions limits the widespread introduction of systems using hardening stowing materials based on waste from mining and processing processes. The «Phase 2» program was used to calculate the stress state of the ore deposit. The results of the experiments confirm the effectiveness of the patterns identified in the work of creating arrays of hardening inserts with inclined faces of the chambers, expressed in terms of dependencies: variations in the coefficient of stress concentration depending on the distance to the excavation zone; transformation of strength properties of stowing mass when using tungsten-molybdenum production wastes. The findings are applicable at mining enterprises when planning mining methods in areas of ores disturbed by the combined influence of open and underground operations.

Введение. Твердеющий закладной массив способен эффективно поддерживать массив горных пород лишь при условии согласованности распределения его прочностных характеристик с вероятностными показателями прочности вмещающих пород. Критическое напряжение, при котором закладка утрачивает устойчивость, определяется через вероятность распределения показателей прочности боковых пород. Эта вероятность, вычисленная на основе функций распределения значений предела прочности горных пород, задает величину критического напряжения, при превышении которого несущая способность обнажений закладного массива постепенно снижается. Важно учитывать, что устойчивость закладки обусловлена как прочностью и деформациями боковых пород, так и размерами закладочного массива в зоне контакта с вмещающими породами.

Проектом предусматривается отработка нарушенных совместным влиянием открытых и подземных работ запасов Тырныаузского месторождения камерно-целиковой системой разработки с закладкой выработанного пространства (рис. 1) [1].

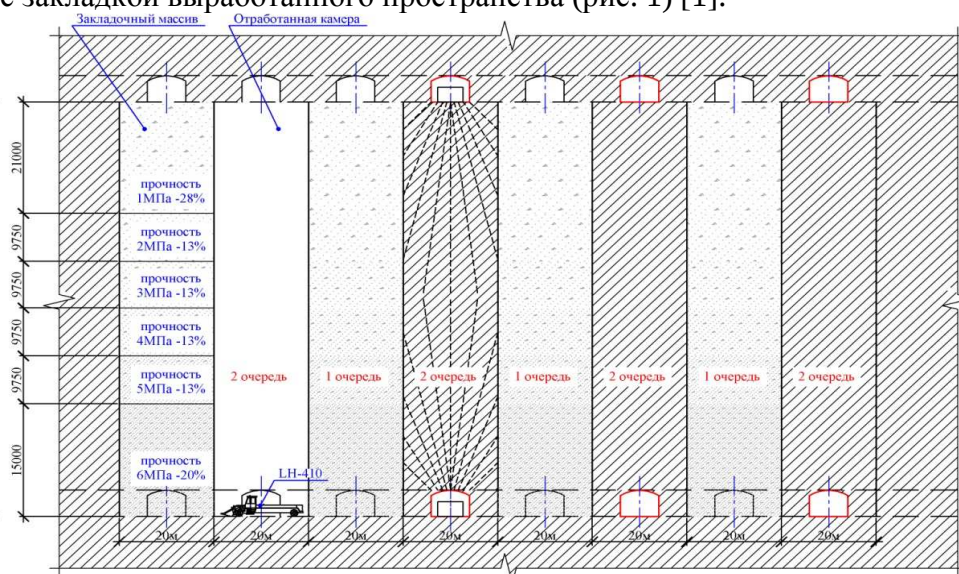


Рис. 1. Проектная технология отработки

При двухстадийной выемке запасов блока, ввиду меньшей жесткости закладочного материала, в сравнении с горными породами, деформации, вызванные сдвиговыми смещениями на контакте блоков с вмещающими породами, провоцируют разрушение цементной матрицы закладочного материала. Разрушение закладочных блоков происходит постепенно, по мере развития трещин, что на определенном этапе приводит к потере устойчивости всего закладного массива. В зоне опорного давления формируются вертикальные деформации растяжения. Вероятно, это связано с перераспределением опорных реакций толщи горных пород, расположенных над областью опорного давления, в массив и опусканием пород в области высокой концентрации напряжений. После формирования искусственных целиков начинается вторая стадия отработки очистных блоков, в процессе которой извлекаются рудные целики. При этом искусственные целики из твердеющего закладочного материала оказываются обнаженными с одной или двух сторон. При достаточно большой площади обнажения, вследствие наличия в закладочной массе не связанных цементом частиц, возможно скалывание твердеющего закладочного массива. Разубоживание руды закладкой доходит до 5%. В связи с этим рекомендуется переход на сплошной одностадийный порядок отработки, который соответствует вероятности устойчивости боковых пород.

Методы исследований. Расчет напряженного состояния залежи проводился в диалоговом режиме по программе «Phase 2» в рамках работы [4]. Вся исходная информация вводится в компьютер согласно заложенной в программу инструкции. Программа позволяет оценить напряженное состояние массива горных пород на любом участке месторождения [5-7]. Схема для расчета распределения напряжений и деформации представлена на рисунке 2.

Напряжения в целиках определяют по формуле [12, 13]:

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1, X_2, \dots, X_n) = v_{ii}(X_i), \quad (1)$$

где v_i – смещения массива горных пород; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – число целиков; $v_i(-\gamma H)$ – смещение на контуре кровли под действием собственной масс; γ – удельный вес пород; H – глубина разработки; $v_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ – смещение на контуре кровли от реактивного действия целиков; $v_{ii}(X_i)$ – собственные укорочения целиков.

Для вычисления смещений $v_i(-\gamma H)$ используют решение Н.И. Мусхелишвили для щелевого выреза [12]:

$$v_i(-\gamma H) = \frac{2\gamma H(1-\mu^2)}{E_n} \sqrt{1 - \left(\frac{x_i}{L'}\right)^2}, \quad (2)$$

где L' – половина пролета панели; μ – коэффициент Пуассона; x_i – координата i -й точки смещения кровли; E_n – модуль деформаций вмещающих пород.

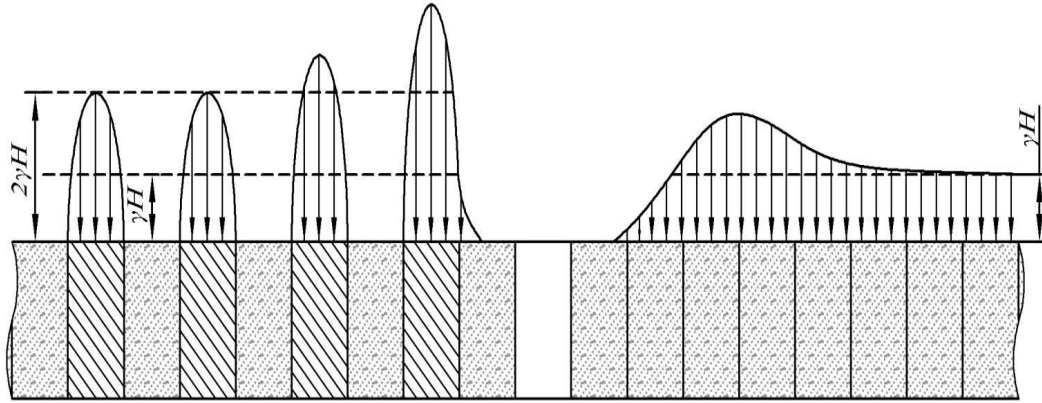


Рис. 2. Схема распределения напряжений

Смещение $v_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ над i -м целиком от воздействия целиков

$$\begin{aligned} v_i(X_1, X_2, \dots, X_n) = & \frac{(I-\mu^2)L'}{\pi E_n} \sum_{i=1}^n X_i 4(I-x^2) \arccos \left[\epsilon_i \eta_i + \sqrt{(I-\epsilon_i^2)(I-\eta_i^2)} \right] - \\ & - (x-\epsilon_i) \ln \frac{I-x\epsilon_i-\sqrt{A_i}}{I-x\epsilon_i+\sqrt{F_i}} + (x+\epsilon_i) \ln \frac{I+x\epsilon_i-\sqrt{A_i}}{I+x\epsilon_i+\sqrt{A_i}} - (-x+\eta_i) \ln \frac{I-x\eta_i-\sqrt{B_i}}{I-x\eta_i+\sqrt{B_i}} - \\ & - (x+\eta_i) \ln \frac{I+x\eta_i-\sqrt{B_i}}{I+x\eta_i+\sqrt{B_i}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где I – коэффициент концентрации напряжений; A_i – смещения породного массива; B_i – смещения закладочного массива; F_i – смещения рудовмещающего массива; ϵ_i, η_i, x – безразмерные координаты начала, конца и центра целика в долях $2L'$;

$$A_i = (I-\epsilon_i^2)(I-x^2), \quad B_i = (I-\eta_i^2)(I-x^2). \quad (4)$$

Собственные упругие деформации рудных целиков в условиях плоской деформации [12]:

$$v_{li} X_i^p = \frac{h_i(I-\mu_p^2)}{E_i'} X_i^p, \quad (5)$$

где X_i^p – модуль деформации рудного целика.

После извлечения запасов первичных камер перемещения описываются системой уравнений вида

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p) = v_{li}(X_i^p). \quad (6)$$

При выемке целиков второй очереди учитывают деформации рудных целиков к моменту заполнения камер закладкой. Для искусственных целиков первой очереди [13]:

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p, X_1^3, X_2^3, \dots, X_n^3) = v_{li}(X_i^3) + v_{li}(X_{loc}^p); \quad (7)$$

для рудных целиков

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^p, X_2^p, \dots, X_n^p, X_1^3, X_2^3, \dots, X_n^3) = v_{li}(X_{loc}^p), \quad (8)$$

где $v_{li}(X_{loc}^p)$ – деформации рудных целиков, берутся как среднее двух соседних с искусственным; $v_{li}(X_i^3)$ – собственные деформации искусственного целика, определяемого при условии плоской деформации:

$$v_{li}(X_i^3) = \frac{h_i(I-\mu_3^2)}{E_3} X_i^3, \quad (9)$$

μ_3 – коэффициент Пуассона закладки; X_i^3 – модуль деформации закладочного массива.

Нагрузка на искусственные целики при выемке вторичных камер рассчитывают с учетом деформаций на первой и последующих стадиях отработки.

Для целиков первой очереди из закладки [12]:

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^3, X_2^3, \dots, X_n^3) = v_{li}(X_i^3) + v_{li}(X_{loc}^p); \quad (10)$$

для второй очереди:

$$v_i(-\gamma H) - v_i(X_1^3, X_2^3, \dots, X_n^3) = v_{li}(X_i^3) + v_{li}(X_{loc}^p) + v_{li}(X_{2oc}^3). \quad (11)$$

Нормативная прочность закладки:

$$\text{для целиков: } [\sigma_n^{зак}] = \frac{\sigma K_z K_{кон.}}{K_\phi K_D}; \quad (12)$$

$$\text{для потолочин: } [\sigma_n^{зак}] = \sigma K_z / K_D, \quad (13)$$

где $\sigma_n^{зак}$ – прочность закладки в возрасте 28 суток; K_z – коэффициент запаса прочности; K_ϕ – коэффициент формы; K_D – коэффициент длительной прочности; $K_{кон}$ – коэффициент контактируемости.

Результаты. Специфика разработки вольфрамо-молибденовых руд Тырныаузского месторождения заключается в том, что значительная доля запасов ослаблена выборочной выемкой богатых руд, а покрывающая толща состоит из слоистых тектонических нарушенных пород. Поэтому в подработанных зонах ожидается концентрация вертикальной компоненты напряжений при камерно-целиковом порядке отработки (рис. 3).

Увеличение стабильности массива достигается путем наклона стенок камер к открытому пространству и переходом к сплошной выемке камер (рис. 4).



Рис. 3. Изменение параметров напряжений

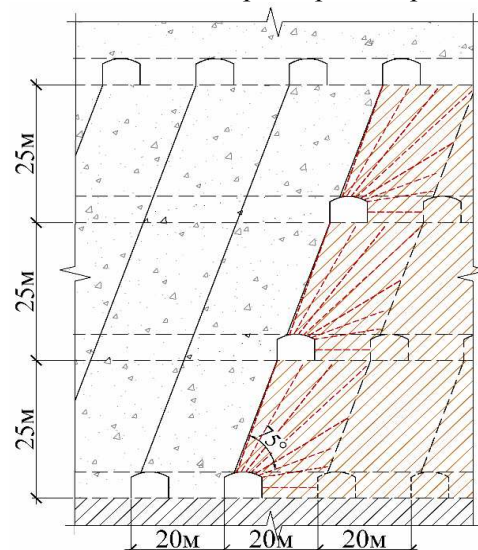


Рис. 4. Сплошная камерная система разработки

Итоги исследований по определению устойчивых размеров стенок камер даны в таблице 1.

В качестве компонентов закладочной смеси рекомендованы различные композиции цемента, отвальных хвостов и хвостов обогащения: хвосты обогащения 785-865 кг/м³, хвосты отвальные 600 кг/м³, цемент 150-230 кг/м³, вода 400 л. Зависимости влияния цементно-хвостового соотношения на прочность закладочной смеси представлены на рисунке 5 и в таблице 2.

Верхнюю часть камер рекомендуется закладывать высокопрочными твердеющими составами ХЦА-230, нижнюю часть – ХЦА-170.

Табл. 1. Влияние на длину и высоту камер угла наклона стенок

Высота камеры, м	Длина камеры при угле наклона стенок, м				
	900	850	800	750	700
15	13	14	16	18	20
45	10	12	14	16, 5	18, 1
75	8	11	12, 5	14, 1	15, 9

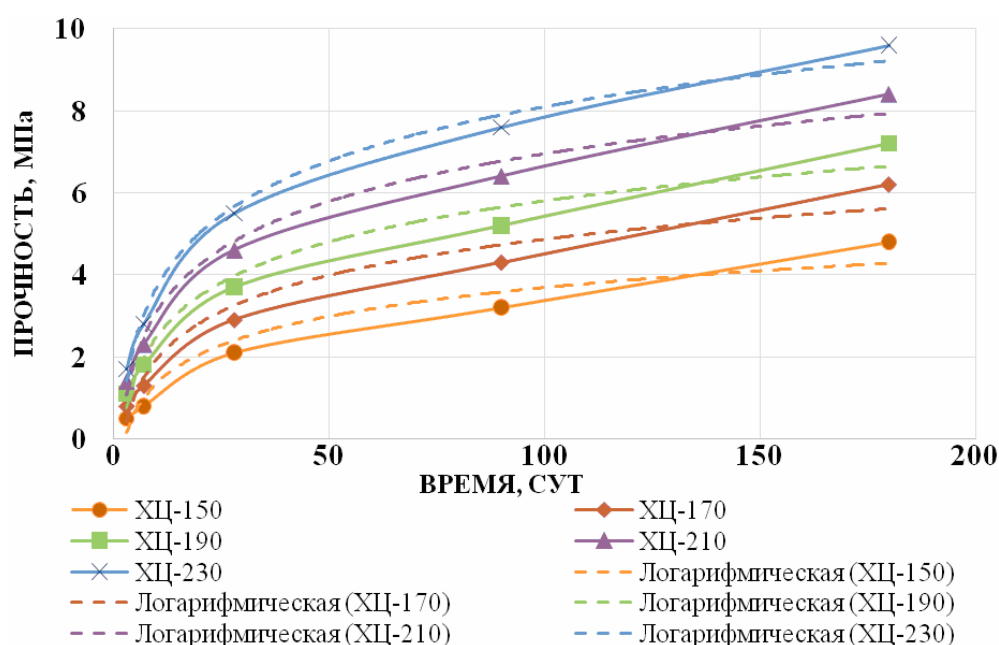


Рис. 5. Кинетика набора прочности цементно-хвостовых закладочных смесей

Табл. 2. Зависимости влияния цементно-хвостового соотношения на прочность закладочной смеси

Марка состава	Уравнение регрессии
ХЦ-150	$\sigma_{сжс} = 1,0107\ln(t) - 0,9682$
ХЦ-170	$\sigma_{сжс} = 1,2688\ln(t) - 0,9777$
ХЦ-190	$\sigma_{сжс} = 1,437\ln(t) - 0,8183$
ХЦ-210	$\sigma_{сжс} = 1,6732\ln(t) - 0,7575$
ХЦ-230	$\sigma_{сжс} = 1,9094\ln(x) - 0,6967$

Закключение. Итоги исследований подтверждают перспективность применения выявленных паттернов создания массивов из твердеющих закладок с наклонными стенками камер, выраженных зависимостями: вариации коэффициента концентрации напряжений от удаления от выемочной зоны; трансформации прочностных характеристик закладочного массива с отходами вольфрамо-молибденового производства.

Финансовая поддержка. Работа выполнена в рамках проекта за счет средств федерального бюджета по государственному заданию «Лаборатория разработки

экологически чистых и безотходных технологий утилизации техногенного сырья в подземном выработанном пространстве (ГеоЗакладка)». Код научной темы – FEFG-2025-0003.

Список литературы

1. Агарков Н.Б., Хаустов В.В., Лукьяненко Н.А., Карпенко Н.Г. Определение границ опасных деформаций и зон сдвижения горных пород на месторождении Тырнауз // Маркшейдерия и недропользование. – 2022. – №2(118). – С. 46-50.
2. Бодров А.С. Разработка технологии закладки выработанного пространства с использованием хвостов гидromеталлургической переработки урановых руд: дисс. ... канд. техн. наук. – Чита, 2022. – 182 с.
3. Голик В.И., Гарифулина И.Ю., Абдулхалимов А.Г., Зассеев И.А., Майстров Ю.А. К проблеме безопасности комбинированной разработки месторождения Тырнауз // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – №1. – С. 14-20.
4. Голик В.И., Дедегкаева Н.Т., Кожиев Х.Х., Белодедов А.А. Ресурсосберегающая технология утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15, №2(56). – С. 225-233.
5. Габараев О.З., Дедегкаева Н.Т., Габараев Г.О. Технология отработки вольфрамо–молибденовых руд слепой залежи Тырнаузского месторождения // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – №1. – С. 92-102.
6. Голик В.И., Габараев О.З., Габараева А.О., Дедегкаева Н.Т. Месторождения Тырнауза – современную технологию разработки // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13, №3(49). – С. 416-425.
7. Гарифулина И.Ю., Зассеев И.А., Дедегкаева Н.Т., Габараев Г.О. Практика применения малозатратных технологий погашения выработанного пространства при добыче руд // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – №4. – С. 304-312.
8. Габараев О.З., Габараева А.О., Дедегкаева Н.Т., Болотбеков Ж. К концепции шахтного подземного выщелачивания металлов // Горные науки и технологии. – 2020. – Т. 5, №4. – С. 349-357.
9. Мельник В.В., Стась Г.В., Соловьев Р.А., Соловьев Д.А. Моделирование свода обрушения в твердых глинах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №3. – С. 531-535.
10. Пыталев И.А., Романько Е.А., Бобылева Е.В., Колкова М.С. Нормирование потерь и разубоживания при поэтапно-камерной системе разработки с последующей закладкой // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, №1(51). – С. 126-133.
11. Шапошник Ю.Н., Неверов С.А., Неверов А.А. Бутобетонная закладка на подземных рудниках Крайнего Севера // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, №1. – С. 282-290.
12. Рыльникова М.В., Джаппуев Р.К., Цупкина М.А., Габараев О.З. Концепция устойчивого развития горнопромышленного региона Кабардино-Балкарии на основе использования хвостов обогащения Тырнаузской фабрики в закладке выработанного пространства // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16, №1(59). – С. 143-158.
13. Васильева М.А., Голик В.И., Зеленцова А.А. Методы интенсификации трубопроводного транспортирования гидросмесей при закладке выработанного пространства // Записки Горного института. – 2025. – Т. 274. – С. 104-116.

References

1. Agarkov N.B., Khaustov V.V., Lukyanenko N.A., Karpenko N.G. Definition of boundaries of dangerous deformations and zones of rock displacement at the Tyrnauz deposit // Mine surveying and subsoil use. 2022, no. 2(118), pp. 46-50.
2. Bodrov A.S. Development of technology for backfilling mined-out spaces using tailings from hydrometallurgical processing of uranium ores: diss. ... cand. of tech. sc. – Chita, 2022. – 182 p.
3. Golik V.I., Garifulina I. Yu., Abdulkhalimov A.G., Zasseev I.A., Maistrov Yu.A. On the problem of safety of combined development of the Tyrnauz deposit // Occupational Safety in Industry. 2021, no. 1, pp. 14-20.
4. Golik V.I., Dedegkaeva N.T., Kozhiev H.Kh., Belodedov A.A. Resource-saving technology for utilization of non-ferrous metal ore beneficiation tailings // Sustainable development of mountain territories. 2023, vol. 15, no. 2(56), pp. 225-233.
5. Gabaraev O.Z., Dedegkaeva N.T., Gabaraev G.O. Technology for mining tungsten–molybdenum ores of the blind deposit of the Tyrnauz deposit // News of higher educational institutions. Mining journal. 2022, no. 1, pp. 92-102.
6. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Gabaraeva A.O., Dedegkaeva N.T. Modern development technology for Tyrnauz deposits // Sustainable development of mountain territories. 2021, vol. 13, no. 3(49), pp. 416-425.
7. Garifulina I.Yu., Zasseev I.A., Dedegkaeva N.T., Gabaraev G.O. Practice of applying low-cost technologies for mined-out space reclamation during ore mining // Bulletin of Tula State University. Earth Sciences. 2021, no. 4, pp. 304-312.
8. Gabaraev O.Z., Gabaraeva A.O., Dedegkaeva N.T., Bolotbekov Zh. On the concept of in-situ leaching of metals // Mining sciences and technologies. 2020, vol. 5, no. 4, pp. 349-357.
9. Melnik V.V., Stas G.V., Soloviev R.A., Soloviev D.A. Modeling of a collapse arch in hard clays // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2023, no. 3, pp. 531-535.

10. Pytalev I.A., Romanko E.A., Bobyleva E.V., Kolkova M.S. Standardization of losses and dilution in the room-and-pillar mining system with subsequent backfilling // Sustainable development of mountainous territories. 2022, vol. 14, no. 1(51), pp. 126-133.
11. ShaposhnikYu.N., Neverov S.A., Neverov A.A. Rubble concrete backfill in underground mines of the Far North// Fundamental and applied issues of mining sciences. 2021, vol. 8, no. 1, pp. 282-290.
12. Rylnikova M.V., Dzhappuev R.K., Tsupkina M.A., Gabaraev O.Z. The concept of sustainable development of the mining region of Kabardino-Balkaria based on the use of beneficiation tailings of the Tyrnyaуз plant in the backfill of the mined-out space // Sustainable development of mountain territories. 2024, vol. 16, no. 1(59), pp. 143-158.
13. Vasilyeva M.A., Golik V.I., Zelentsova A.A. Methods of intensification of pipeline transportation of hydraulic mixtures during backfilling of mined-out spaces // Journal of Mining Institute. 2025, vol. 274, pp. 104-116.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Зассеев Игорь Анатольевич – аспирант	Zasseev Igor Anatolyevich – postgraduate student
Кондратьев Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела	Kondratyev Yuri Ivanovich – doctor of technical sciences, professor of the mining Department
Клыкова Карина Юрьевна – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории разработки экологически чистых и безотходных технологий утилизации техногенного сырья в подземном выработанном пространстве	Klykova Karina Yuryevna – junior researcher of the research laboratory for the development of environmentally friendly and waste-free technologies for the utilization of technogenic raw materials in underground mined space
kafedra-trm@skgmi-gtu.ru	

Получена 07.12.2025