

Анализ устойчивости междуэтажных и межкамерных целиков при камерной системе разработки месторождения «Майское»

В.В. Арно¹✉, Е.П. Колесниченко², И.Ю. Гарифулина¹, Н.Е. Ломакина¹

¹ Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ kobylnik.s@misis.ru

Резюме: В статье представлены результаты комплексного анализа устойчивости междуэтажных и межкамерных целиков для месторождения «Майское» на основе геомеханических исследований. Рассмотрены ключевые параметры камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства, включая влияние угла падения рудного тела, глубины ведения горных работ, а также механических свойств вмещающих пород и закладочного материала на оптимальные размеры целиков. Проведены численные моделирования с использованием современных программных комплексов, позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние массива при различных сценариях отработки. Особое внимание уделено технологическим решениям, направленным на повышение устойчивости целиков и эффективности добычи, включая выбор рациональной последовательности выемки, оптимизацию геометрии камер и параметров закладки. Показано, что угол падения залежи и глубина отработки оказывают значительное влияние на распределение нагрузок в целиках, что необходимо учитывать при проектировании систем разработки.

Приведены практические рекомендации по снижению риска обрушения и повышению безопасности ведения горных работ. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и эксплуатации аналогичных месторождений с камерными системами разработки и закладкой.

Рассмотрены параметры камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства, а также влияние угла падения залежи и глубины горных работ на размеры целиков. Приведены технологические решения для обеспечения устойчивости и эффективности добычи.

Ключевые слова: междуэтажные целики, межкамерные целики, геомеханические исследования, устойчивость целиков, камерная система разработки, закладка выработанного пространства, месторождение «Майское», напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Арно В.В., Колесниченко Е.П., Гарифулина И.Ю., Ломакина Н.Е. Анализ устойчивости междуэтажных и межкамерных целиков при камерной системе разработки месторождения «Майское». *Горная промышленность*. 2025;(4):165–169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-165-169>

Analysis of the floor pillars and room fenders stability in the room-and-pillar mining system at the Mayskoye deposit

V.V. Arno¹✉, E.P. Kolesnichenko², I.Yu. Garifulina¹, N.E. Lomakina¹

¹ North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉ vvnika@mail.ru

Abstract: The article presents the results of a comprehensive analysis of the floor pillars and room fenders stability for the Mayskoye deposit based on geomechanical studies. The key parameters of the room-and-pillar mining system with backfilling of the excavated space are examined, including the impact of the dip angle of the ore body, the depth of mining operations, as well as the mechanical properties of the host rock and backfill material on the optimum dimensions of the pillars. Numerical modeling was performed using advanced software suites, which allowed estimating the stress-and-strain state of the rock mass under various mining scenarios. Special attention is paid to technological solutions aimed at improving pillar stability and mining efficiency, including the choice of a rational mining sequence, optimization of the room geometry and backfill parameters. It is shown that the deposit dip angle and mining depth have a significant impact on the load distribution in pillars, which should be taken into account when designing the mining systems.

Practical recommendations are provided to reduce the risk of the roof collapse and improve the safety of mining operations. The research results can be used in the design and operation of similar fields with the room-and-pillar mining and backfill systems. The paper discusses parameters of the room-and-pillar mining system with backfilling of the mined space as well as the impact of the dip angle of the ore body and the depth of the mining operations on the dimensions of the pillars. Technological solutions are presented to ensure the stability and efficiency of mining operations.

Keywords: floor pillars, room fenders, geomechanical studies, pillar stability, room-and-pillar mining system, backfilling of the mined space, Mayskoye deposit, stress-and-strain state

For citation: Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifulina I.Yu., Lomakina N.E. Analysis of the floor pillars and room fenders stability in the room-and-pillar mining system at the Mayskoye deposit. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):165–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-165-169>

Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом требует тщательного анализа геомеханических условий для обеспечения устойчивости горных выработок. Устойчивость междуэтажных и межкамерных целиков на месторождении «определяется комплексом геомеханических и технологических факторов» [1].

Исследования показывают, что ключевое влияние на их стабильность оказывают мощность технологического междупластья, глубина горных работ и реологические свойства пород [2]. Первостепенное значение имеет комплексное изучение геологической структуры месторождения [3–6].

На основе полученных данных проектируется геометрия камер и межкамерных простенков. Важно соблюдать оптимальные размеры, которые обеспечат необходимую устойчивость, но при этом позволят максимально эффективно извлекать полезные ископаемые. Также критически важно учитывать напряженно-деформированное состояние пород, окружающих выработки. Это включает анализ напряжений, возникающих от выемки пород и возможного гидродинамического воздействия [7].

Одним из ключевых элементов камерной системы разработки являются целики, которые выполняют опорную функцию и предотвращают обрушение вмещающих пород. В данной статье рассматриваются расчеты устойчивости междуэтажных и межкамерных целиков для месторождения «Майское».

Методы

Математическое моделирование напряженного состояния выполняется с использованием критериев обрушения пород кровли и динамики изменения степени нагружения $C = P(t)/Q(t)$, где P – действующая нагрузка, Q – несущая способность целика [1]. Для учета объемного напряженного состояния применяется корректировка по методу Зубкова:

$$\sigma_{\text{цел}} = \sigma_{\text{техн}} \cdot k_{\text{об}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{об}}$ – коэффициент перехода от плоской к объемной задаче [2].

Расчеты мощности междуэтажных и ширины межкамерных целиков выполнены в соответствии с «Методическими указаниями по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов». Основными параметрами, влияющими на размеры целиков, являются:

- угол падения залежи (от 40 до 90°);
- глубина горных работ (от 300 до 800 м);
- мощность рудного тела (от 1 до 8 м).

Результаты

Результаты расчетов представлены рис. 1, 2, где приведены зависимости размеров целиков от указанных параметров.

При этом определено, что мощность междуэтажных целиков зависит от нескольких ключевых факторов:

Угол падения залежи: С увеличением угла падения залежи мощность междуэтажных целиков, как правило, уменьшается. Это связано с тем, что при более крутом угле

падения нагрузка от вышележащих пород распределяется более равномерно, что позволяет уменьшить размеры целиков [4; 5; 8–10].

Глубина горных работ: С увеличением глубины горных работ мощность междуэтажных целиков увеличивается из-за роста горного давления, требующего большей площади для поддержания устойчивости [6; 11–14].

Мощность рудного тела: Более мощное рудное тело требует большей мощности целиков для поддержания кровли и бортов выработки.

Физико-механические свойства пород: Сила сцепления и угол внутреннего трения пород влияют на расчет размеров целиков. В более крепких породах можно использовать меньшие целики [2].

Геологические условия (кровля и почва): Характер кровли и почвы, а также наличие водоносных горизонтов влияют на нагрузку на целик и его размеры [3].

Технология разработки: Способ подготовки залежи и технология выемки также влияют на размеры целиков. Например, при использовании коротких очистных забоев могут быть необходимы более мощные целики [6–8].

Представленные результаты позволяют оценить влияние различных факторов на устойчивость междуэтажных и межкамерных целиков. Увеличение глубины горных работ и мощности рудного тела приводит к необходимости увеличения размеров целиков для обеспечения их устойчивости. Угол падения залежи также оказывает влияние на размеры целиков, что связано с изменением напряженного состояния в массиве горных пород. Например, для угла падения 40° и глубины 300 м мощность междуэтажного целика составляет 6,0 м при мощности рудного тела 1 м и увеличивается до 11,5 м при мощности 8 м.

При анализе результатов расчета определено влияние угла падения, глубины, мощности рудного тела, мощности междупластья.

При увеличении угла падения залежи с 40 до 90° наблюдается уменьшение размеров целиков. Например, для глубины 500 м и мощности рудного тела 4 м:

- 40°: 13,0 м (междуэтажный), 6,5 м (межкамерный);
- 90°: 4,5 м (междуэтажный), 5,0 м (межкамерный).

Влияние глубины:

С увеличением глубины горных работ размеры целиков возрастают. Например, для угла падения 60° и мощности рудного тела 3 м:

- 300 м: 5,0 м (междуэтажный), 3,5 м (межкамерный);
- 800 м: 10,0 м (междуэтажный), 6,0 м (межкамерный).

Влияние мощности рудного тела:

Чем больше мощность рудного тела, тем крупнее требуются целики. Например, для угла падения 70° и глубины 400 м:

- 1 м: 3,5 м (междуэтажный), 2,5 м (межкамерный);
- 8 м: 7,0 м (междуэтажный), 6,0 м (межкамерный).

Ширина межкамерного целика при камерной системе разработки месторождения «Майское» зависит от нескольких ключевых факторов:

Ширина и длина камер: Ширина и длина камер напрямую влияют на размеры целиков. Большие камеры требуют более широких целиков для поддержания устойчивости.

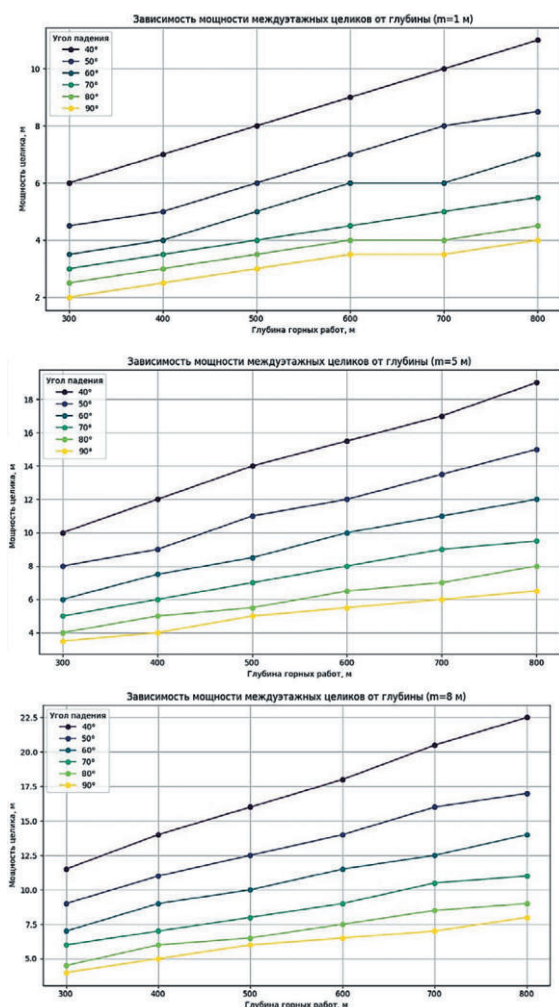


Рис. 1
Зависимость мощности
междугорных целиков от
глубины

Fig. 1
The dependence of the floor
pillar thickness on the depth

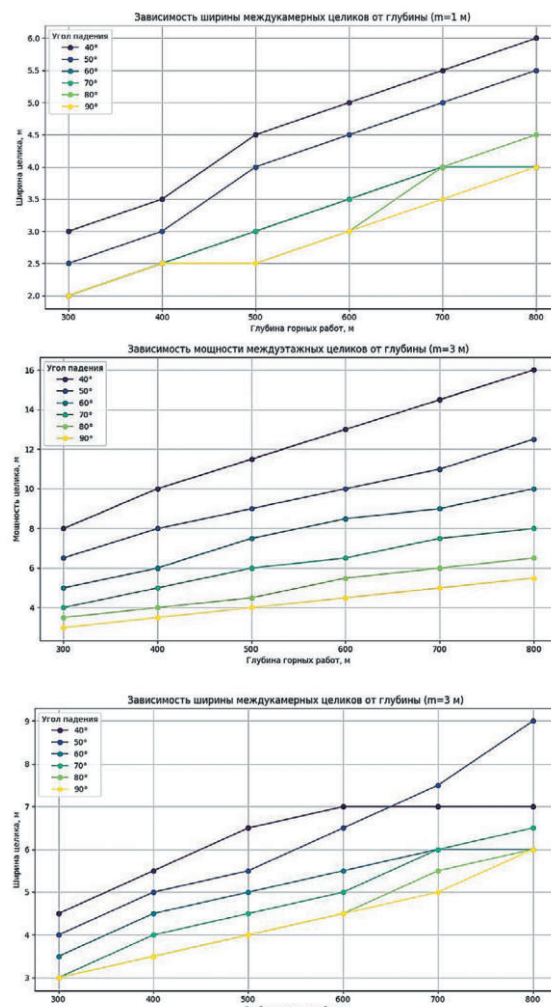


Рис. 2
Зависимость мощности
междугорных целиков от
глубины для m = 1 м; 3 м

Fig. 2
The dependence of the floor
pillar thickness on the depth
for m = 1 м; 3 м

Глубина горных работ: С увеличением глубины горных работ ширина междугорных целиков увеличивается из-за роста горного давления, требующего большей площади для поддержания устойчивости [6].

Физико-механические свойства пород: Сила сцепления и угол внутреннего трения пород влияют на расчет размеров целиков. В более крепких породах можно использовать меньшие целики [4; 10].

Геологические условия (кровля и почва): Характер кровли и почвы, а также наличие водоносных горизонтов влияют на нагрузку на целик и его размеры.

Наличие междугорных целиков: Наличие междугорных целиков влияет на степень нагружения междугорных целиков и их размеры. Разрушение междугорных целиков может привести к увеличению нагрузки на междугорные целики [4; 10].

Влияние мощности междугорных целиков:

1. При $h = 8$ м степень нагружения увеличивается с 0,35 до 0,7 за счет обрушения краевых частей целиков [1].

2. Формирование устойчивого свода в кровле снижает пролёт камеры, но требует увеличения высоты целиков на 2,5 м [1].

Полученные данные могут быть использованы при проектировании камерной системы разработки месторождения «Майское» для оптимизации размеров камер и целиков, что позволит повысить эффективность извлечения полезных

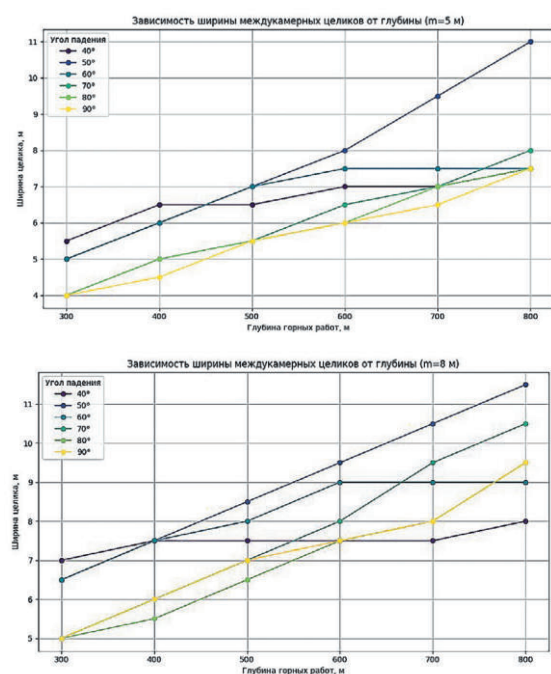


Рис. 3
Зависимость мощности
междугорных целиков от
глубины для m = 5 м; 8 м

Fig. 3
The dependence of the floor
pillar thickness on the depth
for m = 5 м; 8 м

ископаемых и обеспечить безопасность горных работ.

Глубина горных работ:

1. На глубине 600 м минимальная толщина междуэтажных целиков достигает 8–10 м для обеспечения устойчивости [3].

2. При мощности рудного тела 3 м допустимые напряжения в целиках снижаются на 15–20% по сравнению с 1-метровым пластом [3].

Реологические эффекты:

1. Длительная прочность целиков снижается по экспоненциальному закону $Q_{(t)} = Q_0 \cdot e^{-\lambda t}$, что приводит к постепенному росту C до критических значений [1].

Заключение

Влияние угла падения залежи:

С увеличением угла падения залежи (от 40 до 90°) как мощность междуэтажных целиков, так и ширина межкамерных целиков, как правило, уменьшаются. Это связано с тем, что при более крутом угле падения нагрузка от вышележащих пород более равномерно распределяется, что позволяет уменьшить размеры целиков.

Влияние глубины горных работ:

С увеличением глубины горных работ (от 300 до 800 м) как мощность междуэтажных целиков, так и ширина меж-

камерных целиков увеличиваются. Это объясняется тем, что с увеличением глубины возрастает горное давление, что требует увеличения размеров целиков для обеспечения устойчивости горных выработок.

Влияние мощности рудного тела:

С увеличением мощности рудного тела (от 1 до 8 м) как мощность междуэтажных целиков, так и ширина межкамерных целиков увеличиваются. Это связано с тем, что при большей мощности рудного тела требуется большая площадь для поддержания кровли и бортов выработки.

Общие выводы:

Данные, представленные на рисунках, позволяют определить оптимальные размеры междуэтажных и межкамерных целиков в зависимости от конкретных горно-геологических условий.

При проектировании горных работ необходимо учитывать все три фактора (угол падения залежи, глубину горных работ и мощность рудного тела) для обеспечения безопасности и эффективности выемки полезного ископаемого.

Представленные данные могут быть использованы для разработки нормативных документов и рекомендаций по безопасному ведению горных работ на месторождениях с аналогичными горно-геологическими условиями.

Вклад авторов

В.В. Арно – идея исследований, формулировка конфликта текущей парадигмы и новых фактов, написание научной работы.

Е.П. Колесниченко, И.Ю. Гарифулина – оценка результатов и коррекция написанной работы.

Н.Е. Ломакина – оценка результатов исследования, выборка и сбор материала для исследований.

Contribution

V.V. Arno – research idea, formulating the conflict between the current paradigm and the new facts, drafting the research paper.

E.P. Kolesnichenko, I.Yu. Garifulina – evaluation of the results and correction of the paper written.

N.E. Lomakina – evaluation of the research results, sampling and collection of the research material.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы / References

- Макаров А.Б., Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Ливинский И.С., Потапчук М.И. Геомеханическое обоснование параметров камерной системы разработки при переходе на подземный способ добычи руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(3):27–38.
Makarov A.B., Livinsky I.S., Rasskazov I.Y., Saksin B.G., Potapchuk M.I. Geomechanical evaluation of roof-and-pillar parameters in transition to underground mining. *Journal of Mining Science*. 2016;52(3):438–447. <https://doi.org/10.1134/S1062739116030633>
- Лебедева О.О. Анализ устойчивости междупластовой потолочины в условиях отработки промышленных пластов на БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых*. 2018;(1):250–253.
Lebedeva O.O. Analysis of the stability of the interlayer ceiling in the conditions of mining industrial formations at BKPRU-2 of PJSC Uralkali. *Problemy Razrabotki Mestorozhdenii Uglevodorodnykh i Rudnykh Poleznykh Iskopaemykh*. 2018;(1):250–253. (In Russ.)
- Барях А.А., Лобанов С.Ю., Ломакин И.С. Анализ изменения степени нагружения междукammerных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015;(4):70–82.
Baryakh A.A., Lobanov S.Y., Lomakin I.S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama potash salt deposit. *Journal of Mining Science*. 2015;51(4):696–706. <https://doi.org/10.1134/S1062739115040064>
- Бакиров Ж.Б., Такишов А.А., Бакиров М.Ж., Михайлов В.Ф. Определение ширины целиков при камерной отработке рудного месторождения. *Труды университета*. 2021;(4):119–125. https://doi.org/10.52209/1609_1825_2021_4_119
Bakirov Zh.B., Takishov A.A., Bakirov M.Zh., Mikhailov V.F. Determination of the pillar width during the chamber mining of an ore deposit. *Universitet Enbekteri – University Proceedings*. 2021;(4):119–125. (In Russ.) https://doi.org/10.52209/1609_1825_2021_4_119

5. Харисов Т.Ф., Харисова О.Д. Геомеханическое обоснование параметров устойчивых камер и целиков в сложных горно-геологических условиях. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(7):25–33. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/7/2173>
 Kharisov T.F., Kharisova O.D. Geomechanical substantiation of the parameters of stable chambers and pillars in complex mining and geological conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(7):25–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/7/2173>
6. Watson J., Canbulat I., Wei C., Gao M. Ultimate Bearing Capacity of Weak Foundations under Coal Pillars. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2024;57(11):9497–9510. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-03999-z>
7. Сосновская Е.Л. Обоснование параметров подземной геотехнологии наклонных жил малой мощности. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015;(5):60–68. Режим доступа: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2015/05/articles/09 (дата обращения: 29.03.2025).
 Sosnovskaya E.L. Parameter substantiation of inclined thin ore vein underground mining technology. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;(5):60–68. (In Russ.) Available at: https://journals.istu.edu/vestnik_irgtu/journals/2015/05/articles/09 (accessed: 29.03.2025).
8. Павлов А.М., Семенов Ю.М., Сосновский Л.И. Определение параметров устойчивых целиков и обнажений камер при разработке наклонных жил в криогенных зонах в условиях Ирокиндинского золоторудного месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(10):21–27. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2014/10/21-27_Pavlov.pdf (дата обращения: 29.03.2025).
 Pavlov A.M., Semenov Yu.M., Sosnovskii L.I. Evaluation of parameters of stable pillars and room roofs in underlay lode mining in cryogenic zones in terms of the Irokindinsky gold deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(10):21–27. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2014/10/21-27_Pavlov.pdf (accessed: 29.03.2025).
9. Губанова Е.А. Анализ устойчивости междукammerного целика при залповом прорыве воды через гидроизолирующую перемычку. *Горное эхо*. 2020;(3):39–44. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.7>
 Gubanova E.A. Analysis of the stability of an inter-chamber rear sight during a salvo of water through a waterproofing lintel. *Gornoe Ekho*. 2020;(3):39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.3.7>
10. Ермошкин Д.Н., Курманалиев К.З., Мансуров В.А., Межеловский В.И., Бабкин Е.А. Обоснование применимости мозаичной системы целиков в безрудных блоках при отработке жильных месторождений золота. *Горная промышленность*. 2023;(3):108–114. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-108-114>
 Ermoshkin D.N., Kurmanaliev K.Z., Mansurov V.A., Mezhelovsky V.I., Babkin E.A. Justification of applicability of the mosaic pillar system in the ore-free blocks in mining of lode gold deposits. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):108–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-108-114>
11. Хомченко В.Н., Карасев В.А., Масаев Ю.А. Зависимость расчётных размеров целиков от глубины разработки в системах с короткими очистными забоями. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015;(1):45–50. Режим доступа: <https://journals.kuzstu.ru/article/2805.pdf> (дата обращения: 29.03.2025).
 Khomchenko C.N., Karasev V.N., Masaev Yu.A. The dependence of the estimated sizes of pillars from the depths of development in systems with short treatment faces. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2015;(1):45–50. (In Russ.) Available at: <https://journals.kuzstu.ru/article/2805.pdf> (accessed: 29.03.2025).
12. Zhang S., Qiu S., Jiang Q., Wang B., Hu X., Zhang H. Numerical study of unstable failure behavior in heterogeneous rock pillar. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023;290:109529. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109529>
13. Xie H., Li C., Gao M., Zhang R., Gao F., Zhu J. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2021;40(2):217–232. (In Chinese) <https://doi.org/10.13722/j.cnki.jrme.2020.0317>
14. Lianheng Z., Dongliang H., Shuaihao Z., Xiao C., Yibo L., A new method for constructing finite difference model of soil-rock mixture slope and its stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021;138:104605. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104605>

Информация об авторах

Арно Вероника Владимировна – кандидат технических наук, доцент Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: vvnika@mail.ru

Колесниченко Ева Павловна – студент направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит» Высшей школы государственного аудита, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Гарифулина Ирина Юрьевна – старший преподаватель кафедры геологии и горного дела Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Ломакина Наталья Евгеньевна – старший преподаватель кафедры горного дела Политехнического института, Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан, Российская Федерация; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.05.2025

Поступила после рецензирования: 10.06.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

Information about the authors

Veronika V. Arno – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: vvnika@mail.ru

Eva P. Kolesnichenko – Student of the field of training “State and Municipal Audit”, Higher School of Public Audit, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: kolesnicheva@gmail.com

Irina Yu. Garifulina – Senior Lecturer of the Department of Geology and Mining, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: irina-kajtukova@yandex.ru

Natalia E. Lomakina – Senior Lecturer of the Mining Department, Polytechnic Institute, North-Eastern State University, Magadan, Russian Federation; e-mail: lom_a_n@mail.ru

Article info

Received: 17.05.2025

Revised: 10.06.2025

Accepted: 18.06.2025