ISSN 2413–9858

Научная статья
УДК 622.272:622.273.23

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО МАССИВА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖИЛЬНЫХ РУДНЫХ ТЕЛ СЛОЖНОЙ МОРФОЛОГИИ

А.М. Мажитов[1,*]

[1] ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия
[*] E-mail: artur.mazhitov@yandex.ru

Аннотация. В работе представлен подход к расчету нормативной прочности искусственного массива междукамерных целиков, основанный на ранжировании участков рудных тел по элементам залегания и влияющих факторов. К последним относятся устойчивость вертикальных и горизонтальных обнажений несущих элементов горных конструкций, возможность передвижения самоходной техники и величина нагрузок от налегающей толщи пород. Учет всех представленных факторов позволяет сократить расходы на дорогостоящую твердеющую закладку выработанного пространства при требуемом уровне безопасности ведения горных работ. Результатом работы являются представленные зависимости нормативной прочности искусственного массива при отработке рудных тел малой мощности от различных факторов: мощности и угла падения, заданной ширины целика и устойчивости вертикального обнажения.

Ключевые слова: *нормативная прочность; искусственный массив; междукамерные целики; сложная морфология.*

Для цитирования: Мажитов А.М. Обоснование прочности искусственного массива при разработке жильных рудных тел сложной морфологии // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12. № 1. С. 69–76.

Original article

JUSTIFICATION OF THE STRENGTH OF AN ARTIFICIAL MASSIF IN THE DEVELOPMENT OF VEIN ORE BODIES OF COMPLEX MORPHOLOGY

A.M. Mazhitov[1,*]

[1] Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia
[*] E-mail: artur.mazhitov@yandex.ru

Abstract. This paper presents an approach to calculating the standard strength of artificial interchamber pillars based on ranking ore body sections by bedding elements and influencing factors. These factors include the stability of vertical and horizontal outcrops of supporting elements of mining structures, the mobility of self-propelled equipment, and the magnitude of loads from the overlying rock mass. Taking all these factors into account allows for a reduction in the cost of expensive hardening backfilling of mined-out spaces while maintaining the required level of mining safety. The paper presents dependences of the standard strength of artificial pillars when mining thin ore bodies on various factors: thickness and dip angle, specified pillar width, and the stability of the vertical outcrop.

Key words: *standard strength; artificial massif; interchamber pillars; complex morphology.*

For citation: Mazhitov A.M. Justification of the strength of an artificial massif in the development of vein ore bodies of complex morphology. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. V. 12. No. 1. pp. 69–76.

Введение

Золоторудные месторождения чаще всего представляют собой рудные тела жильной формы со сложной морфологией. Месторождения характеризуются широким диапазоном изменчивости размеров по простиранию, мощности и угла падения, а также количеством жил и их взаимным расположением. Широкий диапазон условий и параметров залегания жил обуславливает необходимость зонирования месторождения по однотипным признакам с выделением идентичных выемочных участков. Такой подход обеспечивает возможность применения различных вариантов систем разработки, индивидуально для каждого участка.

Основными технологиями, которые применяются при освоении тонких жильных месторождений, являются камерные системы (подэтажных штреков) и слоевые для отработки рудных тел мощностью более 2-х метров и менее, соответственно. Основным конструктивным элементом, обеспечивающим устойчивость вмещающих пород и выработанного пространства при применении камерных систем разработки являются междукамерные целики.

В основе расчета прочности целиков лежит теория Турнера-Шевякова и заключается в определении тяготеющих сил, действующих на искусственный массив. Отличие представленной методики для жильных месторождений заключается в исходных условиях и параметрах расчета, связанных со стесненными условиями формирования искусственного массива и, соответственно, его формы за счет растекания твердеющей закладки при различных угле залегания и мощности рудных тел.

Материалы и методы

Как правило, жильные рудные тела отрабатываются системой разработки подэтажные штреки с закладкой выработанного пространства. отработка камерных запасов осуществляется этапно с формированием с формированием междукамерных искусственных целиков для поддержания выработанного пространства. в условиях сложной морфологии рудных тел целесообразность дифференцированного (для каждого отднотипного участка) определения их размеров очевидна. Создание искусственного твердеющего массива требует дополнительных высоких материально-трудовых затрат, что ведет к снижению производительности очистной выемки, особенно в условиях ограниченности рудных площадей. Снижение себестоимости закладочных работ и увеличение интенсивности освоения запасов месторождений обеспечивается применением комбинированной закладки выработанного пространства с использованием твердеющей бутобетонной закладки и скальных пород [1,2]. При этом специфика применения камерных систем разработки в условиях жильных месторождений определяется первоочередным формированием искусственных поддерживающих целиков и последующая отработка камерных запасов и заполнение выработанного пространства скальной породой. Сущность и обоснование параметров геотехнологии с использованием комбинированной закладки рассматривались многими исследователями и инженерами и заключаются в разделении залежи на камеры и после их отработки заполнение выработанного пространства в два этапа [3-6]: первоначально твердеющей смесью и затем сухой породой. С учетом вышеприведенных особенностей жильных месторождений, характеризующихся широким диапазоном условий залегания, основной задачей является определение количества твердеющей закладочной смеси в общем объеме выработанного пространства для поддержания в устойчивом состоянии вмещающих пород висячего бока дифференцировано по каждому участку. Такой подход позволяет снизить объем дорогостоящей твердеющей смеси в общем объеме очистных работ.

Существует большое количество методик расчета устойчивости обнажений и нормативной прочности искусственных целиков [3-8]. Однако, широкий диапазон изменчивости элементов залегания рудных тел, устойчивости вмещающих пород и глубины залегания жил обуславливает необходимость разработки методики обоснования параметров комбинированного искусственного массива. Причем, технологическая особенность создания комбинированного искусственного массива в выработанном пространстве, ограниченном по ширине, способствует формированию конструкции неправильной формы, методика расчета которых отсутствует.

Основной целью работы является снижение объема дорогостоящей твердеющей смеси при применении систем разработки с закладкой выработанного пространства и разработка методики обоснования необходимой прочности искусственного массива. Идея работы базируется на дифференцированном подходе к расчету устойчивости конструктивных элементов систем разработки на основе параметров выделенных выемочных участков в соответствии с горно-геологическими условиями. В методике учитываются конструктивные и технологические особенности формирования комбинированного искусственного массива в стесненных условиях жильного рудного тела.

Основным несущим элементом горной конструкции при отработке запасов с использованием варианта подэтажно-камерной системы разработки (подэтажные штреки) является искусственный междукамерный целик, расположенный по восстанию и воспринимающий на себя всю нагрузку от деформирующихся вмещающих пород при отработанных запасах камер (рис. 1).

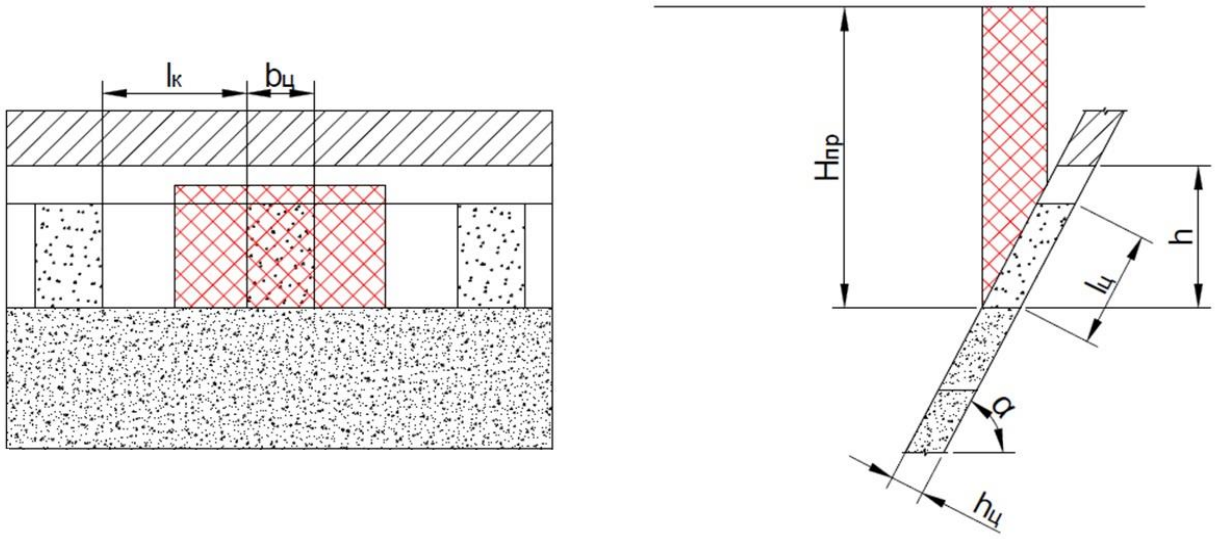


Рисунок 1 – Схема к расчету прочности междукамерного искусственного целика

Нагрузки на искусственный целик определяются по гипотезе Турнера-Шевякова, т.е. пропорционально величине поддерживаемой площади. При этом в расчете нагрузок не учитывается разгружающий эффект междуэтажного бутобетонного целика нижнего подэтажа и сыпучей закладки, что идет в запас прочности.

Из условия поддержания налегающей толщи пород напряжение в массиве закладки и требуемая прочность бутобетонного целика составляют [6]:

, (1)

, (2)

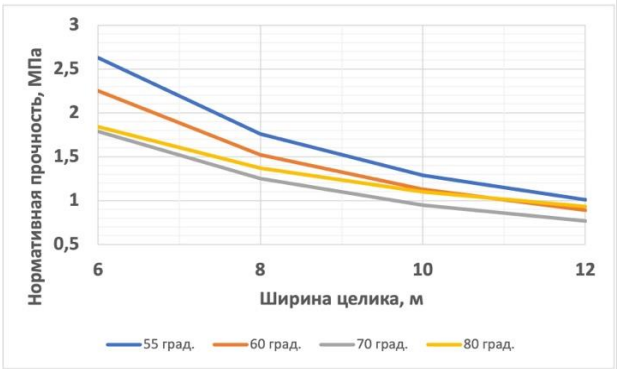
где – требуемая прочность бутобетонного целика, МПа; – напряжение в целике, МПа; $K_{з}$ – коэффициент запаса прочности, доли ед.; $K_{ф}$ – коэффициент, учитывающий влияние формы целика, доли ед.; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий влияние времени (коэффициент длительной прочности), доли ед.; K_{α} – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона

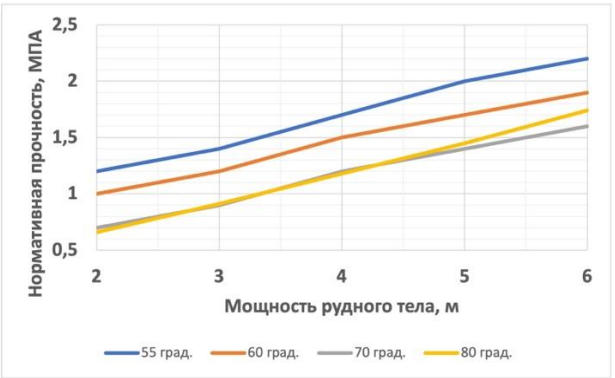
ISSN 2413–9858

залежи на величину нагрузки, доли ед.; $K_н$ – коэффициент, учитывающий степень нагружения искусственного массива налегающими породами, доли ед.; $\gamma_з$ – удельный вес закладки, Н/м^3; H – высота пригружающей толщи, м; $L_п$, $L_з$ – ширина, соответсвенно, подработки (принимается наклонная высота этажа) и искусственного целика (принимается наклонная высота подэтажа), м; γ - объемная масса пород, Н/м^3; $h_з$ – высота целика, м.

Основной характеристикой бутобетонных целиков является нормативная прочность, которая определяется проектом и обеспечивает устойчивость обнажений закладки в течение всего периода эксплуатации. В связи с тем, что несущие элементы – целики, имеют различное конструктивное исполнение и назначение, находятся в разных условиях нагружения, подвержены влиянию различных факторов, целесообразно определять нормативную прочность как результирующее, наибольшее значение, учитывающее влияние всех действующих факторов. Для этого применительно к предлагаемым технологическим схемам рассчитывается требуемая прочность бутобетонных целиков по условиям поддержания налегающей толщи пород, обеспечения устойчивости вертикальных обнажений, при горизонтальной подработке и возможности передвижения оборудования по искусственному массиву.

На рис. 2 представлены графики зависимости нормативной прочности искусственного междукамерного целика от его ширины, мощности и угла наклона рудного тела. При этом в условиях отработки тонких рудных тел глубина и физико-механические свойства вмещающих пород не оказывают существенного влияния на расчетную нормативную прочность. На графиках видно, что показатель нормативной прочности при угле падения рудного тела равный 80 градусов значительно выбивается из общей закономерности. Связано это с тем, что при больших углах падения, близких к вертикальному, нормативная прочность искусственных целиков определяется уже не нагрузками от налегающей толщи пород, а зависит от устойчивости вертикального обнажения. На графике зависимости нормативной прочности от угла наклона рудного тела при различном мощности проведено уточнение этого угла. Таким образом, при угле наклона более 78 градусов нормативная прочность искусственного массива междукамерного целика определяется устойчивостью его вертикального обнажения.





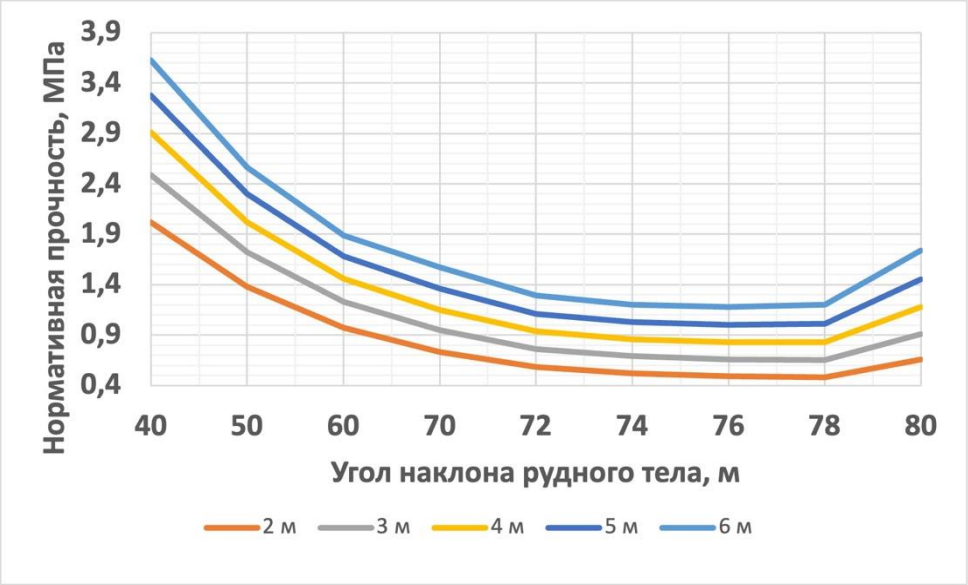


Рисунок 2 – Зависимости нормативной прочности исскусственного массива (МПа) от ширины целика (м), мощности (м) и угла наклона рудного тела (град.)

Устойчивая высота вертикального обнажения определяется [10]:

$$H = H_{90} = \frac{2 \cdot K_{м} \cdot tg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_{м}}{2}\right)}{\gamma}, \quad (3)$$

где H – устойчивая высота вертикального обнажения стенки камеры, м; γ – объемный вес закладки, т/м^3; – угол внутреннего трения искусственного массива, градусов; $K_{м}$ – сцепление в массиве закладки, т/м^2.

Величина сцепления в закладочном массива принимается согласно структурного строения. С целью повышения коэффициента запаса структурное ослабление закладочного массива в расчете можно принимать 0,05-0,06 м. Угол внутреннего трения принимается согласно лабораторным исследованиям физико-механических свойств бутобетонной закладки и в расчетах составляет 50 градусов. Удельный вес бутобетонной закладки принят 2,0 т/м^3.

, т/м^2 (4)

Результаты расчёта устойчивой высоты вертикального обнажения закладочного массива представлены в табл. 1.

Таблица 2.1 – Устойчивая высота вертикальных обнажений закладочного массива

Высота вертикального обнажения $h_{з}$, м	Нормативная прочность, МПа
15	1,0
20	1,5
30	2,0

Расчет вертикального обнажения и анализ табл. 1 показывают, что при заданных горно-геологических условиях и параметрах технологии отработки сохраняется устойчивость вертикальной стенки бутобетонного закладочного массива при его прочности не менее 1,0 (при углах падения рудных тел до 50°), 1,5 МПа (при углах падения рудных тел от 50° до 60°) и не менее 2,0 МПа (при углах падения рудных тел более 60°).

Таким образом, поскольку нет методик, позволяющих учесть все возможные влияющие факторы, то определение необходимой прочности производится отдельно по каждому фактору с последующим выбором или корректировкой нормативной. Применительно к золоторудным жильным месторождениям обоснование прочностных параметров осложняется существенным разбросом характеристик по мощности залежей, углу падения, глубине залегания, невозможности определения средних значений, что предопределяет проведение расчетов по диапазону учитываемых показателей и исходных данных.

Для определения прочности бутобетонных целиков принимаются апробированные методики расчета. Так для расчета нагрузок на междукамерные бутобетонные целики разной конфигурации используется теория тяготеющих площадей и условие прочности Турнера-Шевякова [6], позволяющая найти воспринимаемые опорой силовые воздействия с учетом основных влияющих факторов: глубина ведения горных работ, угол наклона жилы, пространственные параметры горной конструкции, плотностные свойства массива, а также искомые прочностные параметры массива закладки.

Известно, что большое влияние на величину горного давления на искусственные целики оказывает разгружающий эффект более жесткого горного массива, который предполагается учитывать через отношение размеров залежи по короткой стороне (размеров выемочной единицы) и глубины работ. Учет этого фактора производился согласно рекомендациям, приведенным в [9].

Заключение

Так как, формирование бутобетонного целика производится камерами в режиме сплошной отработки, то прочность искусственного массива принимается одинаковой по всей длине. При расчете нагрузок на целик не учитывается разгружающий эффект междукамерных бутобетонных целиков верхнего подэтажа и сыпучей закладки, что идет в запас прочности. Нагрузки на искусственный целик определяются по гипотезе Турнера-Шевякова, т.е. пропорционально величине поддерживаемой площади [8]. Значение требуемой прочности закладки проверяется и корректируется по условию горизонтальной подработки при выемке рудного междуэтажного целика.

С целью упрощения подбора рецептуры составов закладочных смесей и технологии их приготовления проводится корректировка расчетных значений требуемой прочности (, которая не приводит к снижению коэффициента запаса прочности. Рекомендуемые значения нормативной прочности по условию поддержания налегающей толщи пород уточняются по фактору устойчивости вертикальных и горизонтальных обнажений несущих элементов, передвижения самоходных машин при восходящей выемке и из них принимается в проект наибольшее значение.

Рекомендуемые значения нормативной прочности для бутобетонных целиков различного назначения в диапазоне изменения угла падения и мощности рудного тела приведены в табл. 2. При значениях угла падения и мощности рудного тела, не входящих в таблицы (промежуточные значения), применяется метод интерполяции.

Таблица 2 – Нормативная прочность закладки бутобетонных целиков по варианту системы разработки № 1

№ п/п	Угол падения РТ, град.	Мощность РТ, м	Высота вертикального обнажения, м	Нормативная прочность, МПа
				МКЦ
1	40	3	3,9	2,5
		4	5,2	3,0
		5	6,5	3,0

2	50	3	4,7	2,0
		4	6,2	2,0
		5	7,8	2,5
3	60	3	6,0	1,5
		4	8,0	1,5
		5	10,0	2,0
4	70	3	8,8	1,0
		4	11,7	1,5
		5	14,6	1,5
5	80	3	17,3	1,5
		4	23,0	2,0
		5	28,8	2,0

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровиков, Е.В. Технология формирования закладочного массива с заданными геотехническими характеристиками / Е.В. Боровиков, А.М. Мажитов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 52-61.

2. Разработка технологии формирования искусственного массива с заданными геотехническими характеристиками / А.М. Мажитов, П.В. Волков, А.В. Красавин, А.Б. Аллабердин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 51-58.

3. Голик, В.И. Обоснование возможности уменьшения потерь в целиках за счет подпора твердеющими смесями / В.И. Голик, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 12. – С. 31-38.

4. Дик, Ю.А. Геомеханическое обоснование камерной системы разработки с «шахматным» расположением ромбовидных камер и закладкой выработанного пространства / Ю.А. Дик, А.В. Котенков, М.С. Танков // Горный журнал. – 2014. – № 9. – С. 41-45.

5. Каплунов, Д.Р. Перспективы развития технологии закладки выработанного пространства при подземной разработке рудных месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 12. – С. 5-10.

6. Закладочные работы в шахтах / М.И. Весков, Н.Ф. Замесов, И.Т. Слащилин [и др.]. – Москва: Издательство «Недра», 1989. – 400 с.

7. К расчету параметров целиков при камерной системе разработки с закладкой выработанного пространства / Н. Г. Валиев, В. Д. Пропп, В. Х. Беркович, А. А. Колесников // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : Уральская горнопромышленная декада : сборник докладов X Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 20–21 мая 2021 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2021. – С. 12-16.

8. Макаров, А. Б. Обоснование допустимых параметров очистных камер и целиков / А. Б. Макаров // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 261-267.

9. Методические указания по определению размеров камер и целиков при подземной разработке руд цветных металлов. – Чита, 1988.

10. Временные методические указания по управлению устойчивости бортов карьеров цветной металлургии, М.: Министерство цветной металлургии СССР, 1989 г.

REFERENCES

1. Borovikov, E.V. Tekhnologiya formirovaniya zakladochnogo massiva s zadannymi geotekhnicheskimi harakteristikami / E.V. Borovikov, A.M. Mazhitov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2023. – № 2. – S. 52-61.

2. Razrabotka tekhnologii formirovaniya iskusstvennogo massiva s zadannymi geotekhnicheskimi harakteristikami / A.M. Mazhitov, P.V. Volkov, A.V. Krasavin, A.B. Allaberdin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal. – 2019. – № 2. – S. 51-58.

3. Golik, V.I. Obosnovanie vozmozhnosti umen'sheniya poter' v celikah za schet podpora tverdeyushchimi smesyami / V.I. Golik, V.G. Luk'yanov // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2015. – T. 326, № 12. – S. 31-38.

4. Dik, YU.A. Geomekhanicheskoe obosnovanie kamernoj sistemy razrabotki s «shahmatnym» raspolozheniem rombovidnyh kamer i zakladkoj vyrabotannogo prostranstva / YU.A. Dik, A.V. Kotenkov, M.S. Tankov // Gornyj zhurnal. – 2014. – № 9. – S. 41-45.

5. Kaplunov, D.R. Perspektivy razvitiya tekhnologii zakladki vyrabotannogo prostranstva pri podzemnoj razrabotke rudnyh mestorozhdenij / D.R. Kaplunov, M.V. Ryl'nikova, D.N. Radchenko // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2011. – № 12. – S. 5-10.

6. Zakladochnye raboty v shahtah / M.I. Veskov, N.F. Zamesov, I.T. Slashchilin [i dr.]. – Moskva: Izdatel'stvo «Nedra», 1989. – 400 s.

7. K raschetu parametrov celikov pri kamernoj sisteme razrabotki s zakladkoj vyrabotannogo prostranstva / N. G. Valiev, V. D. Propp, V. H. Berkovich, A. A. Kolesnikov // Innovacionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnyh i nerudnyh mestorozhdenij : Ural'skaya gornopromyshlennaya dekada : sbornik dokladov X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Ekaterinburg, 20–21 maya 2021 goda. – Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj gornyj universitet, 2021. – S. 12-16.

8. Makarov, A. B. Obosnovanie dopustimyh parametrov ochistnyh kamer i celikov / A. B. Makarov // Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. – 2015. – T. 2, № 2. – S. 261-267.

9. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu razmerov kamer i celikov pri podzemnoj razrabotke rud cvetnyh metallov. – CHita, 1988.

10. Vremennye metodicheskie ukazaniya po upravleniyu ustojchivosti bortov kar'erov cvetnoj metallurgii, M.: Ministerstvo cvetnoj metallurgii SSSR, 1989 g.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Мажитов Артур Маратович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Россия, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, д. 38, e-mail: artur.mazhitov@yandex.ru)	*Mazhitov Artur Maratovich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Russia, Magnitogorsk, Lenina ave. 38, e-mail: artur.mazhitov@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 17.11.2025; одобрена после рецензирования 15.12.2025, принята к публикации 31.01.2026.
The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 15.12.2025; accepted for publication 31.01.2026.