

УДК 622.272(571.51) © И.В. Зеньков^{1,4}, В.А. Петров¹, А.С. Конде², Ю.П. Юронен³, В.Н. Вокин⁴, Е.В. Кирюшина⁴, Ю.П. Пташник⁴, А.А. Латынцев⁴, 2026

UDC 622.272(571.51) © I.V. Zenkov^{1,4}, V.A. Petrov¹, A.S. Conde², Yu.P. Yuronen³, V.N. Vokin⁴, E.V. Kiryushina⁴, Yu.P. Ptashnik⁴, A.A. Lатыntsev⁴, 2026

¹ Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела, 660012, г. Красноярск, Россия

¹ Siberian Research Institute of Mining and Surveying, Krasnoyarsk, 660012, Russian Federation

² Компания RUSSKY ALUMINY LIMITED, Представительство в Гвинейской Республике, BP 6506, Конакри, Гвинейская Республика

² RUSSKY ALUMINY LIMITED, Conakry, Representative Office in the Republic of Guinea, BP 6506, Republic of Guinea

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, Россия

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

⁴ Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия
✉ e-mail: zenkoviv@mail.ru

⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
✉ e-mail: zenkoviv@mail.ru

Обоснование технологических параметров открытых горных работ в массивах пород с низкими прочностными характеристиками

Justification of technological parameters for open-pit mining in rock masses with low strength properties

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-5-91-94>

В Красноярском крае открытым способом разрабатывают золоторудные месторождения, в строении которых находятся одна или несколько рудных залежей с распространением полезных компонентов на глубину до ста метров. Вмещающие рудные залежи горные породы имеют зачастую низкие прочностные характеристики. В таких горно-геологических условиях необходимо проводить обоснование основных технологических параметров открытых горных работ, к которым мы отнесли высоту уступа и угол откоса уступа. Получены зависимости коэффициента запаса устойчивости борта карьера, представленного горными породами с низкими прочностными характеристиками, что напрямую влияет на объем вскрышных работ, производимых за весь период работы карьера.

Ключевые слова: Красноярский край, золоторудные месторождения, открытые горные работы, технологические параметры ка-

ЗЕНЬКОВ И.В.

Доктор техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела, 660012, г. Красноярск, Россия, профессор, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: zenkoviv@mail.ru

ПЕТРОВ В.А.

Горный инженер, Сибирский научно-исследовательский институт горного и маркшейдерского дела, 660012, г. Красноярск, Россия

КОНДЕ А.С.

Горный инженер, компания RUSSKY ALUMINY LIMITED, Представительство в Гвинейской Республике, BP 6506, г. Конакри, Гвинейская Республика

ЮРОНЕН Ю.П.

Канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, 660037, г. Красноярск, Россия

ВОКИН В.Н.

Канд. техн. наук, профессор, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия

КИРЮШИНА Е.В.

Канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия

ПТАШНИК Ю.П.

Канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия

ЛАТЫНЦЕВ А.А.

Канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, Россия

рьерера, режим горных работ, устойчивость борта карьера, коэффициент запаса устойчивости.

Для цитирования: Обоснование технологических параметров открытых горных работ в массивах пород с низкими прочностными характеристиками / И.В. Зеньков, В.А. Петров, А.С. Конде и др. // Уголь. 2026;(5):91-94. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-91-94.

Abstract

Open-pit mining is used in the Krasnoyarsk Krai to develop gold deposits that contain one or more ore bodies with mineralization extending to a depth of up to 100 meters. The host rock of the ore bodies is often characterized with low strength properties. Such mining and geological conditions require a justification of the main technological parameters of open pit mining operations, which include the bench height and the bench slope angle. Dependencies for the pit wall safety factor have been obtained for rock masses with low strength properties, which directly affects the volume of overburden removed during the entire life of the pit.

Keywords

Krasnoyarsk Krai, gold deposits, open-pit mining, technical parameters of open pit, mode of mining operations, stability of open pit walls, safety factor.

For citation

Zenkov I.V., Petrov V.A., Conde A.S., Yuronen Yu.P., Vokin V.N., Kiryushina E.V., Ptashnik Yu.P., Latyntsev A.A. Justification of technological parameters for open-pit mining in rock masses with low strength properties. *Ugol'*. 2026;(5):91-94. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-5-91-94.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия центр золотодобывающей промышленности России постоянно смещается в регионы Сибири и Дальнего Востока. На этих территориях возрастают доля месторождений, разрабатываемые массивы которых представлены корами выветривания и зонами гипергенеза. Только в Красноярском крае открытым способом разрабатывается более двенадцати таких месторождений (Верхне-Таловское, Самсоновское, Герфед, Боголюбовское и др.) с крайне невыдержанным горно-геологическим строением. Вмещающие горные породы и продуктивные залежи представлены чередованием глинистых элювиальных образований, дресвяно-щебнистых зон дезинтеграции и реликтов скальных пород. Опыт производства открытых горных работ показывает, что проектные углы откоса бортов, рассчитанные по среднестатистическим параметрам, в 30-40% случаев требуют корректировки в сторону уменьшения их значений. Это автоматически влечет за собой увеличение объемов горно-капитальных работ и вскрышных пород. В ряде случаев необходима консервация запасов в прибортовых зонах. Все это вызывает необходимость обоснования основных технологических параметров бортов карьеров на месторождениях, представленных массивами горных пород с низкими прочностными характеристиками. Подобные вопросы были решены исследователями в следующих работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ И СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ В КАРЬЕРАХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

В последние десятилетия в Красноярском крае в правобережной части р. Ангары наблюдается рост объемов добычи золота открытым способом на месторождениях, где рудные залежи залегают в массивах горных пород с низкими прочностными характеристиками, либо массивы представлены комбинацией горных пород с резко различающимися физико-механическими свойствами. В линейке золоторудных разрабатываемых и перспективных месторождений находятся месторождения, представленные одной или двумя-тремя сближенными рудными залежами. Рудные залежи в плане имеют овальные или округлые формы. К настоящему времени практически на всех месторождениях экономически целесообразная глубина открытой разработки не превышает 100 м. Отработка рудных залежей производится с постоянной углубкой и с разноской борта карьера по всему его периметру.

На бурении взрывных скважин установлены буровые станки СБШ-250. На вскрышных и добычных работах экскаваторно-автомобильные комплексы состоят из карьерных мехлопат ЭКГ-5 и ЭКГ-8 в комбинации с гидравлическими экскаваторами с ковшем вместимостью 2,5-6 куб. м и автосамосвалов грузоподъемностью до 90 т. На вывозке горных пород из карьеров используют автосамосвалы повышенной проходимости с шарнирно-сочлененной рамой грузоподъемностью 30 т [10]. Внешние породные отвалы чаще всего отсыпают на некотором расстоянии от карьера с целью исключения дополнительной нагрузки от массы вскрышных пород, отсыпаемых на поверхность прибортового массива, либо для того, чтобы отвал не располагался в границах горного отвода в случае разноски борта карьера в перспективе.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫСОТЫ И УГЛА ОТКОСА УСТУПОВ В КОНСТРУКЦИИ БОРТА КАРЬЕРОВ В МАССИВАХ ПОРОД С НИЗКИМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Практика производства открытых горных работ высветливает следующие проблемы технологического характера, напрямую связанные с геомеханическими аспектами. Проектные углы откоса бортов карьеров, рассчитанные по среднестатистическим параметрам, в 30-40% случаев требуют корректировки в сторону их уменьшения, что в свою очередь приводит к увеличению объемов вскрышных работ при постановке уступов в конечное положение. Это же относится к временной консервации запасов в прибортовых массивах. Горно-геологическое строение массивов вмещающих горных пород кратко представлено следующими характеристиками. Глинистые коры выветривания мощностью до 100 м представлены каолинит-гидрослюдистыми глинами с обломками кварца и лимонита плотностью в сухом состоянии 1,55-1,82 т/м³, с углами внутреннего трения 14-22° и со сцеплением 0,008-0,018 МПа. Коэффициент крепости этих пород – от 0,7 до 1,3. Зоны дезинтеграции и выщелачивания мощностью до 60 м представлены дресвяно-щебнистыми грунтами с суглинистым заполнителем, реликтами сланцев и ме-



Рис. 1. Деформации бортов карьеров (на снимках из космоса): а – в массиве горных пород с низкими прочностными характеристиками; б – в массиве на контакте горных пород с различающимися прочностными характеристиками

Fig. 1. Deformations of open pit walls (as seen in satellite images): а – in rock masses with low strength properties; б – at the interface between rock masses with differing strength properties

таэффузивов плотностью в сухом состоянии 1,86-2,2 т/м³, с углами внутреннего трения 25-32° и со сцеплением 0,02-0,045 МПа. Коэффициент крепости этих пород – от 1,5 до 3. Скальные и полускальные породы с неограниченной мощностью по вертикали представлены метагаббро-диабазами, метапесчаниками, кварцитами плотностью в сухом состоянии 2,55-2,86 т/м³, с углами внутреннего трения 38-48° и со сцеплением 0,4-1,5 МПа. Коэффициент крепости этих пород – от 6 до 12.

За период разработки двух карьеров с 2017 по 2020 г. было зафиксировано семь различных по объему деформаций бортов карьеров в основном в массивах, представленных вмещающими породами с низкими прочностными характеристиками. Типичные деформации бортов карьеров показаны на рис. 1. Контуры деформированных бортов обведены линиями желтого цвета.

На наш взгляд, появление деформаций борта карьера связано со сложившимся подходом к определению коэффициента запаса прочности борта карьера по усредненным характеристикам массива разрабатываемых горных пород. По предварительной оценке, наиболее проблемными с позиции устойчивости являются секторы бортов карьера в массивах вмещающих пород с низкими прочностными характеристиками.

Для этих условий в большей степени необходимо обоснование коэффициента запаса устойчивости борта карьера. Для количественной оценки устойчивости использован метод конечных элементов. Графическая часть исследования представлена шестнадцатью конструкциями бортов карьера. В моделировании высота борта карьера принималась в диапазоне от 20 до 100 м с шагом 20 м. Значения высоты разрабатываемого уступа в карьере – 7,5; 10; 12,5 и 15 м при углах их откоса 60; 65; 70 и 75 град. Ширина бермы безопасности между двумя смежными по высоте уступами принята равной 10 м.

По результатам расчетов получены зависимости коэффициента запаса устойчивости борта карьера от высоты и угла откоса уступа для условий производства горных работ в массивах пород с низкими прочностными характеристиками. В расчетах приняты следующие средние показатели: плотность в сухом состоянии – 1,88 т/м³, угол

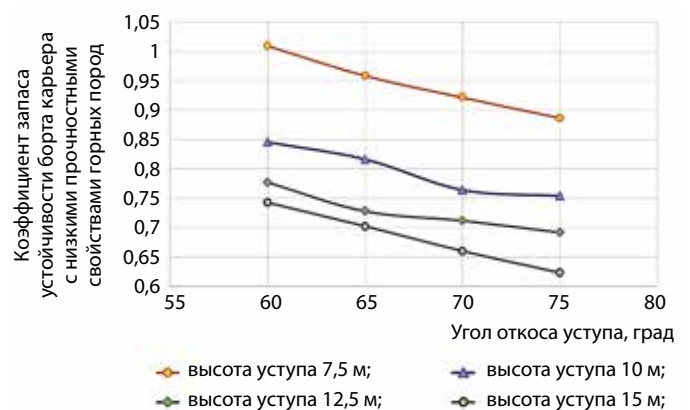


Рис. 2. Изменение коэффициента запаса устойчивости борта карьера в массивах горных пород с низкими прочностными характеристиками

Fig. 2. Changes in the safety factor of open pit walls in rock masses with low strength properties

внутреннего трения – 23°, сцепление – 0,027 МПа, коэффициент крепости – 1,88 (рис. 2).

В ходе анализа графических данных изменения коэффициента запаса устойчивости борта карьера установлены следующие зависимости. Коэффициент запаса устойчивости при углах откоса 60° находится в обратной пропорциональной зависимости от высоты уступов в конструкции борта карьера и определяется полиномом третьей степени с коэффициентом детерминации на уровне единицы. Отметим технологический аспект откосов уступов, равных 60°. Именно при этом значении угла откоса уступа в диапазоне их высоты от 7,5 до 15 м появляется значение коэффициента запаса устойчивости борта карьера немногим более единицы.

По данным моделирования высветилась основная тенденция в изменении основных технологических параметров бортов карьеров. В подавляющем большинстве значений коэффициента запаса устойчивости борта карьера в исследуемых комбинациях угла откоса уступа с его высотой его значение значительно отличается в меньшую сторону от допустимого, что свидетельствует о невозмож-

ности производства открытых горных работ с позиции безопасности.

В практике открытых горных работ, характеризующихся высокими финансовыми затратами, всегда возникает дилемма в принятии решения, касающегося выбора основных технологических параметров борта карьера. В случае выбора параметров, приводящих к существенному снижению уровня коэффициента запаса устойчивости борта, резко поднимается вопрос обеспечения безопасного ведения горных работ. Выбор аналогичных параметров, приводящих к увеличению уровня коэффициента запаса устойчивости борта, влечет за собой рост объемов вскрышных работ, негативно сказывающийся на экономических показателях открытой разработки золоторудных месторождений. В наших практических рекомендациях по отстройке борта карьера в массивах в горных породах с низкими прочностными характеристиками значения угла откосов уступов должны приниматься не более 60° при высоте уступов не более 7,5 м с допустимым увеличением до восьми метров. Только в этом случае обеспечивается значение коэффициента устойчивости борта карьера не менее единицы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обосновании технологических параметров карьера при проектировании открытых горных работ на золоторудных месторождениях, массивы которых представлены горными породами с низкими прочностными характеристиками, необходимо учитывать их геометрические размеры, а также расположение в контурах проектируемых карьеров. В ходе моделирования конструкции борта карьера получены зависимости угла откоса и высоты уступа при его эксплуатации в массиве горных пород с низкими прочностными характеристиками. С большой достоверностью установлено, что высота уступа и угол его откоса в массивах горных пород с низкими прочностными характеристиками не должны превышать восьми метров и 60° соответственно, при которых обеспечивается необходимый для безопасного ведения открытых горных работ коэффициент запаса устойчивости борта карьера.

Список литературы • References

- Suprun V.I., Zelenin D.P., Kazakov V.A. Basic structural factors of pit wall stability in open-pit coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12):52-69. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_52.
- Зеленин Д.П., Ворошилин К.С. Базовые факторы, определяющие устойчивость стационарных бортов угольных разрезов // Горный журнал. 2023. № 12. С. 41-48. DOI: 10.17580/gzh.2023.12.07. Zelenin D.P., Voroshilin K.S. Basic governing factors of slope stability in open pit coal mines. *Gornyy zhurnal.* 2023;(12):41-48. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2023.12.07.
- Анализ обрушения бортов на железорудном карьере Уэнса в Северо-Восточном Алжире методом конечных элементов: причины и выводы для контроля устойчивости / Ф. Бельгелиль, М. Фредж, А. Саадун и др. // Записки Горного института. 2024. Т. 268. С. 576-587. Belgueliel F., Fredj M., Saadoun A., Boukarm R. Finite element analysis of slope failure in Ouenza open-pit iron mine, NE Algeria: causes and lessons for stability control. *Zapiski Gornogo instituta.* 2024;(268): 576-587. (In Russ.).

- Mustafin M.G., Valkova E.O. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров // Уголь. 2024;(7):55-61. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61. Mustafin M.G., Valkova E.O. Surveying and geomechanical justification for the methods of quarry sides deformations observation. *Ugol'.* 2024;(7):55-61. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.
- Liren Ban, Zhigang Tao, Weisheng Du, Yuhang Hou. A consecutive joint shear strength model considering the 3D roughness of real contact joint surface. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2023;33(5):617-624.
- Chang F., Li H., Don S., Yin H. Pre-, Co-, and Post-Failure Deformation Analysis of the Catastrophic Xinjing Open-Pit Coal Mine Landslide, China, from Optical and Radar Remote Sensing Observations. *Remote Sens.* 2025;(17):19. <https://doi.org/10.3390/rs17010019>.
- Akram Deiminiat, Jonathan D. Aubertin, Yannic Ethier. On the calibration of a shear stress criterion for rock joints to represent the full stress-strain profile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2024;16(2):379-392. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.07.019.
- Jianhua Yan, Xiansen Xing, Zhihai Li et al. Development of a DFN-based probabilistic block theory approach for bench face angle design in open pit mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2024;16(8):3047-3062. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.028.
- Jianhua Yan, Xiansen Xing, Zhihai Li et al. Development of a DFN-based probabilistic block theory approach for bench face angle design in open pit mining. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2024;16(8):3047-3062. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.02.028.
- <https://www.google.com.earth>.

Authors Information

Zenkov I.V. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director for Scientific Work, Siberian Research Institute of Mining and Surveying, Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: zenkoviv@mail.ru

Petrov V.A. – Mining engineer, Siberian Research Institute of Mining and Surveying, Krasnoyarsk, 660012, Russian Federation

Conde A.S. – Mining engineer, RUSSKY ALUMINY LIMITED, Representative Office in the Republic of Guinea, Conakry, BP 6506, Republic of Guinea

Yuronen Yu.P. – PhD (Engineering), Associate Professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Vokin V.N. – PhD (Engineering), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Kiryushina E.V. – PhD (Engineering), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Ptashnik Yu.P. – PhD (Engineering), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Latyntsev A.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.03.2026

Поступила после рецензирования: 16.04.2026

Принята к публикации: 30.04.2026

Paper info

Received March 12, 2026

Reviewed April 16, 2026

Accepted April 30, 2026