

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.271

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ КАРЬЕРА НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОКТАСЖАЛ (КАЗАХСТАН)

Н. Ф. Низаметдинов¹, В. Д. Барышников², А. А. Нагибин¹,
Р. Ф. Низаметдинов¹, А. С. Туякбай¹

¹Карагандинский технический университет,

E-mail: mdig_kstu@mail.ru, просп. Н. Назарбаева, 56, 100000, г. Караганда, Казахстан

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: v-baryshnikov@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Представлен методический подход к обоснованию параметров бортов карьера на основе комплексных геомеханических исследований горных пород в прибортовых массивах по кернам, взятым из специально пробуренных инженерно-геологических скважин. Определены размеры структурных блоков, индекс качества и коэффициент структурного ослабления массива. В лабораторных условиях изучены прочностные и физические свойства горных пород. Оценка устойчивости бортов карьера различными методами расчета позволила убедиться в хорошей сопоставимости полученных результатов. Рекомендованы оптимальные параметры бортов карьера.

Борт карьера, инженерно-геологическая скважина, керн, образец, прочностные свойства горных пород, коэффициент структурного ослабления, индекс качества массива, методы расчета откосов, коэффициент запаса устойчивости

DOI: 10.15372/FTPRPI20220401

Надежная оценка устойчивости бортов карьеров базируется на детальном изучении физико-механических свойств горных пород, особенностей структуры и трещиноватости прибортовых массивов, что позволяет отрабатывать их при углах наклона максимальной крутизны и сокращать объемы вскрышных работ. На стадии подготовки предполагаемой открытой разработки меднорудных месторождений, особенно глубоких карьеров, помимо геологического изучения строения месторождения, следует уделять особое внимание состоянию прибортовых массивов. Бурение дополнительных инженерно-геологических скважин необходимо для детального изучения строения прибортовых массивов и определения прочностных свойств пород по отобраным кернам. Это дает возможность при анализе кернов установить размеры структурных блоков, элементы залегания трещин и разрывных нарушений для вычисления коэффициентов структурного ослабления и индекса качества массива, а также исследовать прочность породных контактов.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрена устойчивость прибортовых массивов карьера меднорудного месторождения Коктасжал (Казахстан), сложенного плагиогранит-порфирами, диабазовыми порфиритами, альбитофирами, кварцевыми диоритами и плагиогранитами. На месторождении выделены крупные разломы: Центральный, Южный, Западный и Восточный. Центральный разлом наиболее опасен по условиям устойчивости бортов карьера при их пересечении с поверхностями северо-восточного и юго-западного прибортовых массивов, что может вызвать локальные породные вывалы [1].

Для оценки устойчивости бортов карьера необходима исходная информация о геологическом строении прибортовых массивов, физико-механических свойствах горных пород и их контактах: плотности, сцепления, угла внутреннего трения, сопротивления сжатию и растяжению [1, 2]. Физико-механические характеристики пород исследовались в лабораторных условиях на образцах, полученных из кернов инженерно-геологических скважин [3 – 5]. Пробы отбирались сотрудниками Карагандинского технического университета с участием геологической службы рудника из дополнительно пробуренных наклонных скважин С-20-02, С-20-03, С-20-04, С-20-05 и С-20-06 (рис. 1).

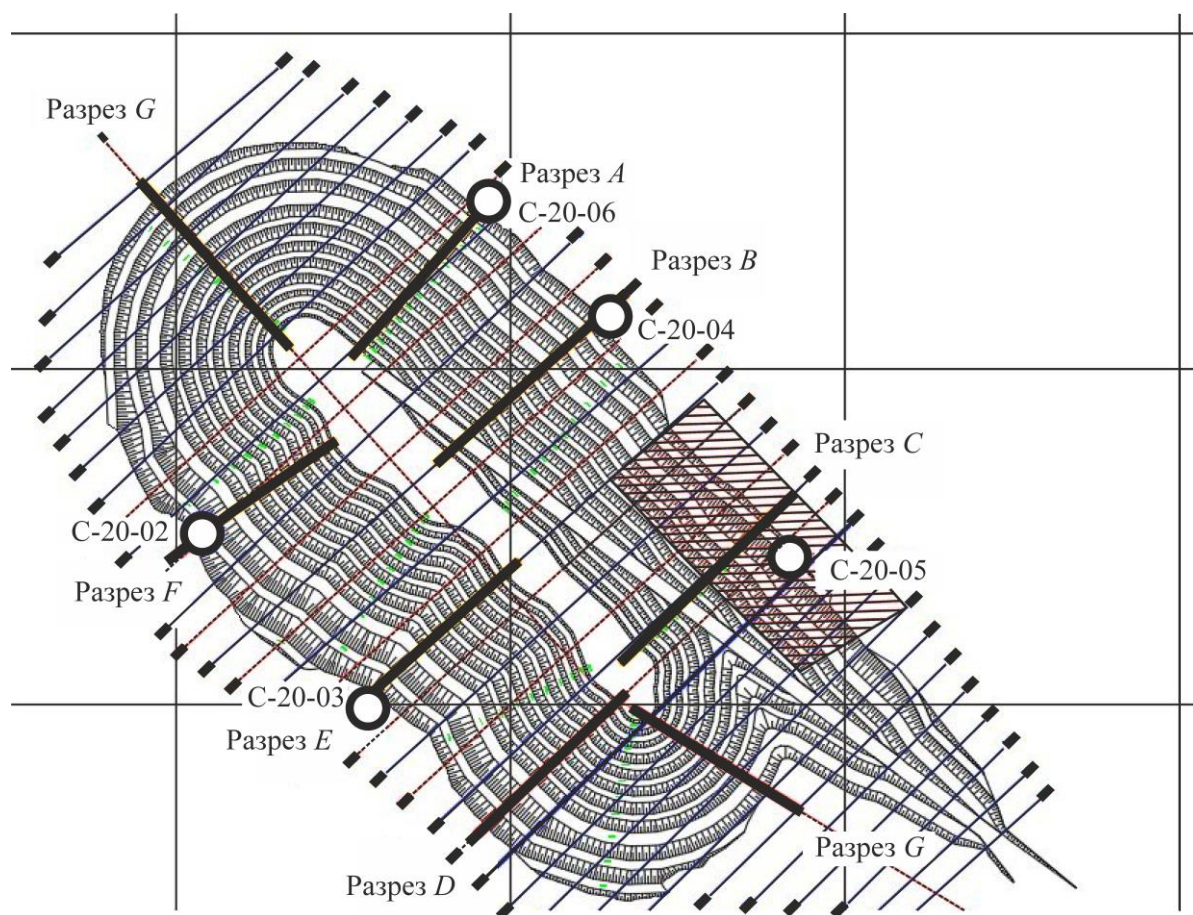


Рис. 1. План горных работ на месторождении Коктасжал с расчетными разрезами и ослабленной зоной

Пробы отбирались по каждой литологической разности пород в количестве, достаточном для изготовления образцов к проведению испытаний на сжатие, разрыв, косой срез в соответствии с ГОСТами [3 – 5]. Испытания выполнялись в лаборатории физики горных пород

ТОО “Центргеоаналит” по всем выделенным типам пород. Для надежного определения коэффициента структурного ослабления λ_0 изучались размеры структурных блоков по всей глубине пробуренных скважин, что позволило построить логарифмическую зависимость $\lambda_0 = -0.016 \ln(H) + 0.1272$ (H — глубина залегания породы) с аппроксимацией $R^2 = 0.978$, которая обеспечивала возможность надежного перехода от сцепления пород в образце к массиву.

Размеры породных блоков определялись по кернам пробуренных скважин с указанием типов пород и использованием масштабированных фотографий на глубину 300 м. Трещины у породных кернов выявлялись по интервалам на глубине 50, 100, 150, 200 и 250 м. В каждом интервале устанавливался средний размер структурного блока и оценивался индекс качества массива RQD: 0–25 — очень слабый массив, 25–50 — слабый, 50–75 — средний, 75–90 — крепкий, 90–100 — очень крепкий.

При анализе выбуренных кернов изучалось состояние и характер трещин и разломов, включая их заполнители, при этом учитывались искусственные разрушения кернов при бурении и укладке их в упаковочные ящики. Выявлено, что величина коры выветривания на месторождении колеблется от 30 до 50 м. В геологической скважине С-20-05 на юго-восточном борту обнаружена аномальная зона дробления от поверхности до глубины 80 м (рис. 2). Для оценки устойчивости прибортовых массивов построены геологические разрезы нормально простиранию бортов карьера с уточненными данными по инженерно-геологическим скважинам (разрезы А, В, С, G-север, G-юг, D, E, F), аналогичные приведенному на рис. 2 разрезу С.

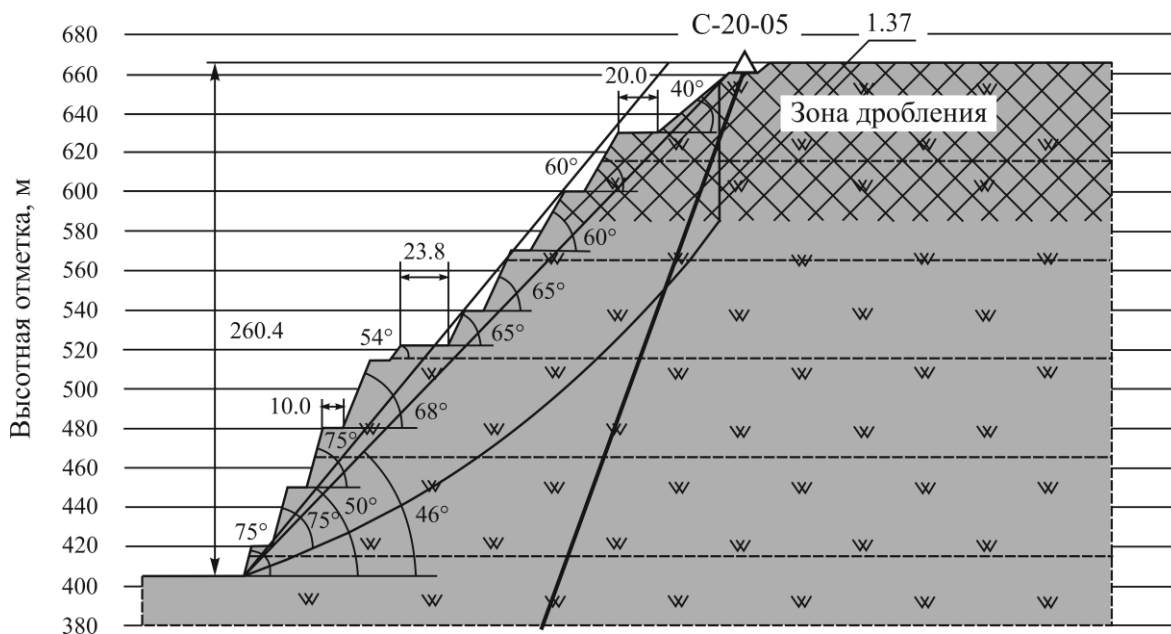


Рис. 2. Юго-восточный борт: разрез С рядом с пробуренной скважиной С-20-05 с выделенной зоной дробления

Для сопоставления результатов применения различных методов оценки устойчивости откосов использовался рейтинг массива Хука – Брауна. Важный параметр при получении данных о прочности горных пород — показатель геологического индекса прочности (GSI). Он рассчитывается с использованием показателя качества пород RQD и рейтинга оценки геологической характеристики трещиноватости J_{cond89} (коэффициент трещиноватости горных пород по системе RMR₈₉):

$$GSI = 1.5J_{\text{cond89}} + \frac{RQD}{2}.$$

Рейтинговая оценка геологической характеристики трещиноватости — это сумма рейтинговых значений по отдельным показателям:

$$J_{\text{cond89}} = J_{A41} + J_{A42} + J_{A43} + J_{A44} + J_{A45},$$

где J_{A41} — шероховатость трещин; J_{A42} — длина трещин; J_{A43} — раскрытие трещин; J_{A44} — заполнитель трещин; J_{A45} — выветренность стенок трещин.

Применение данного метода дает возможность оценить прочность массива горных пород с учетом его блочности и состояния поверхностей нарушений (трещин). В табл. 1 приведена оценка усредненного индекса GSI в зависимости от структуры породного массива и характеристик трещин [4–6].

ТАБЛИЦА 1. Определение геологического индекса GSI и рейтинговой оценки трещиноватости J_{cond89}

Скважина	J_{A41}	J_{A42}	J_{A43}	J_{A44}	J_{A45}	J_{cond89}	RQD	GSI
C-20-02	1	1	4	2	5	15.0	85.72	65.36
C-20-03	1	1	4	2	5	15.0	89.60	67.30
C-20-04	1	2	4	2	5	14.0	80.02	55.01
C-20-05	1	5	4	2	5	17.0	78.10	64.55
C-20-06	1	6	4	2	5	18.0	76.57	65.28
Среднее	—	—	—	—	—	15.8	82.00	63.50

При определении показателя прочности используются такие исходные параметры, как прочность пород на одноосное сжатие, показатель качества пород RQD, расстояние между трещинами, состояние поверхности трещин, ориентация простирания трещин и индекс J_{cond89} . Рейтинговые классификации позволяют получать достоверные прочностные характеристики массива горных пород, необходимые для численного моделирования геомеханических процессов. Для детальной оценки инженерно-геологических условий прибортовых массивов по кернам скважин C-20-02, C-20-03, C-20-04, C-20-05 и C-20-06 исследована структура и физико-механические свойства пород.

Характерная особенность механизма сдвижения прибортового массива — образование областей критических напряжений в откосе. Это ведет к возникновению максимальных деформаций и инициирует образование поверхности скольжения.

В настоящее время существует много методик расчета устойчивости карьерных откосов, вследствие чего возникают трудности при определении оптимальной расчетной схемы, наиболее полно учитывающей горно-геологические условия с требуемой точностью [2–4, 7–9]. В [9] для учета межблочного взаимодействия сил предложено их интегрирование по поверхности скольжения. Форма поверхности скольжения и ее положение определяются по результатам компьютерного расчета и получаемого коэффициента запаса устойчивости способом последовательных приближений. Численно-аналитический способ универсален, он учитывает такие геологические и техногенные факторы, как профиль борта, неоднородность породного массива, гидрогеологические условия, тектонические нарушения и др. [10].

Программа Slide предназначена для оценки устойчивости цилиндрических и нецилиндрических поверхностей обрушения в скальных и грунтовых земляных откосах. При анализе устойчивости поверхностей скольжения используется метод предельного равновесия вертикальных блоков (метод Бишопа и Спенсера, Янбу и Феллениуса) [2, 5, 9, 11]. Для анализа берется отдельная поверхность скольжения. Для определения местонахождения критических поверхностей с наименьшим коэффициентом на исследуемом участке применяется специальный алгоритм. Для расчетов в программу вводятся геометрические параметры борта карьера и характеристики нарушенности горных пород, слагающих прибортовой массив.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка устойчивости бортов выполнена по восьми инженерно-геологическим разрезам карьера с использованием специальных программных продуктов [10], которые впоследствии включены в технический проект отработки месторождения. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты оценки устойчивости бортов карьера Коктасжал

Разрез	Порода	Усредненные расчетные значения пород по борту [1]			Высота борта, м	Угол наклона борта, град	Коэффициент запаса устойчивости
		К, кПа	ρ , град	Плотность, т/м ³			
Разрез А, С-20-06	Порфириты, кварциты	457.38	33.76	2.81	309.0	48 / 51	1.19
Разрез В, С-20-04	Порфириты, кварциты, андезиты	480.44	34.43	2.75	315.0	46	1.31
Разрез С, С-20-05	Порфириты, андезиты, кварциты	398.50	33.95	2.72	260.4	46 / 50	1.37
Разрез D	Порфириты, андезиты	497.62	34.28	2.82	278.3	46 / 52	1.26
Разрез E, С-20-03	Порфириты, андезиты	497.62	34.28	2.82	279.0	46 / 52	1.24
Разрез F, С-20-02	Порфириты, андезиты	450.84	34.33	2.83	270.0	47 / 51	1.26
Разрез G, северо-западный торец	Порфириты, кварциты	457.38	33.76	2.81	309.1	49 / 52	1.19
Разрез G, юго-восточный торец	Порфириты, андезиты, в том числе кварцевые	497.62	34.28	2.82	252.1	50	1.29

Примечание. К — сцепление; ρ — угол внутреннего трения

Анализ полученных данных свидетельствует об устойчивости прибортовых массивов карьера с соблюдением рекомендуемых углов наклона откосов уступов и генеральной высоты бортов, поскольку их коэффициенты устойчивости колеблются в допустимых нормативных пределах (1.19–1.37).

Для геомеханической оценки природных и техногенных массивов широко применяются специализированные программы, базирующиеся на использовании численных методов решения, заимствованных из механики твердого деформируемого тела, например методы конечных и граничных элементов. Наиболее эффективные инженерные продукты — Plaxis, SCad Structure Slope, FLAC, Phase2 и др. Программа Phase2 моделирует геомеханические и гидрогеологические процессы, происходящие в массиве горных пород, и вычисляет коэффициенты запаса устойчивости откосов [3]. Результаты основаны на решении плоской задачи теории упругости для кусочно-однородного массива, свойства которого приняты по результатам проведенных исследований. На месторождении Коктасжал вертикальная составляющая напряжений определяется весом налегающих пород, горизонтальные напряжения — в соответствии с гипотезой Динника. При среднем модуле Юнга 87.3 ГПа коэффициент Пуассона равен 0.23.

Ниже приведена верификация данного программного продукта путем сопоставления результатов моделирования с данными, полученными в программе Slide. Для сравнения коэффициентов запаса устойчивости выполнен расчет в программе Phase2, основанный на методе конечных элементов. На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования устойчивости борта с пригрузкой в виде внешнего отвала. На рис. 4 в массиве показаны участки с максимальными деформациями сдвига. Результаты оценки коэффициента запаса устойчивости с помощью программ, использующих метод предельного равновесия, и значения коэффициента снижения прочности SRF в конечно-элементных программах свидетельствуют об устойчивости прибортового массива. Установлено, что средние коэффициенты запаса устойчивости при использовании программы Slide составили 1.267, программы Phase2 — 1.230.

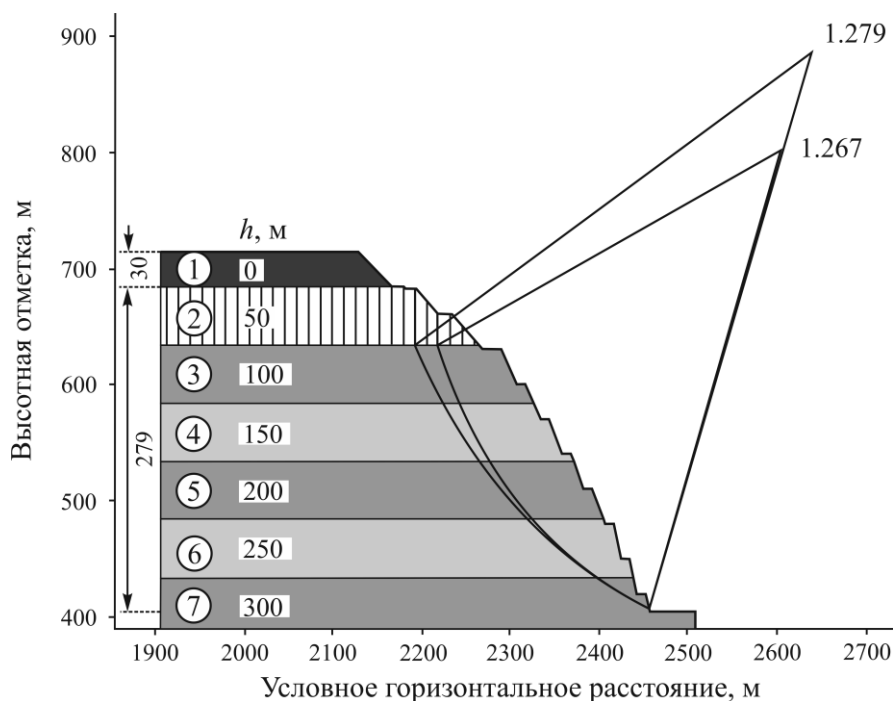


Рис. 3. Значения коэффициента запаса устойчивости бортов карьера в программе Slide по разрезу E: 1 — внешний отвал; 2 — порфиры; 3 — порфиры кварцевые; 4 — андезит с включением порфирита; 5 — порфиры; 6 — кварцевый андезит; 7 — порфирит с включением андезита

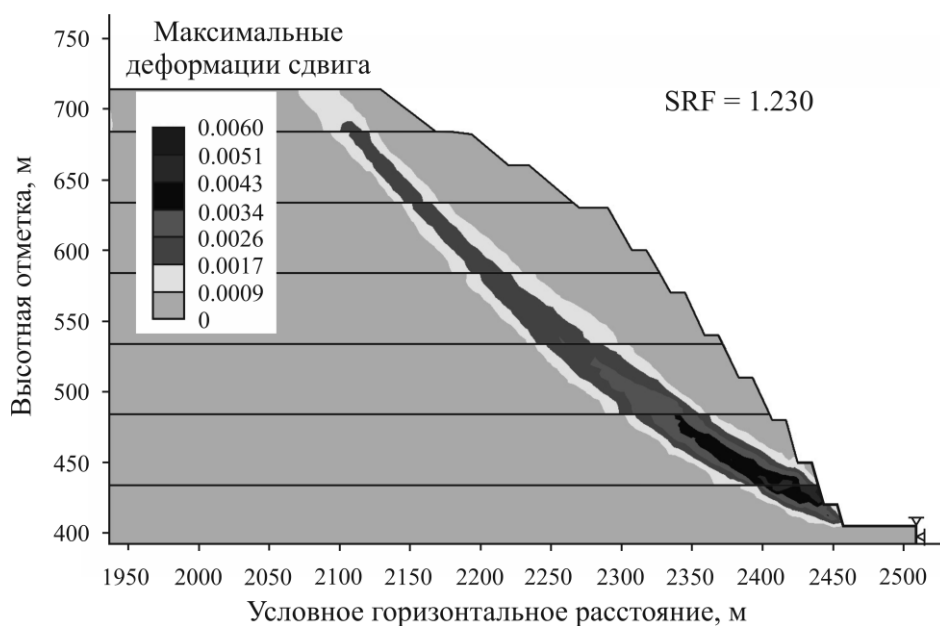


Рис. 4. Деформации сдвига в прибортовом массиве в программе Phase2 (SRF — коэффициент снижения прочности)

Приведенные расчеты показали хорошую сопоставимость коэффициентов запаса устойчивости и возможной реализации потенциальных поверхностей скольжения. Рекомендованные параметры откосов уступов и бортов меднорудного карьера Коктасжал включены в технический проект разработки месторождения с использованием специальных технологических схем заоткоски уступов и мониторинга за состоянием горного массива [6, 12, 13].

ВЫВОДЫ

Предложен методический подход надежного определения параметров устойчивых карьерных бортов, основанный на комплексных геомеханических исследованиях горных пород непосредственно в прибортовых массивах по кернам, полученным из специально пробуренных инженерно-геологических скважин. С помощью анализа кернов и их лабораторных испытаний определены размеры структурных блоков, индекс качества и коэффициенты структурного ослабления прибортовых массивов, а также параметры физико-механических свойств слагающих их горных пород.

Данный подход реализован при обосновании параметров бортов карьера в процессе отработки месторождения Коктасжал. Оценка устойчивости бортов карьера с помощью специализированных программ показала хорошую сопоставимость полученных результатов численного и рейтинговых систем расчета.

Разработаны рекомендации по выбору параметров бортов карьера при высоте 300 м (углы наклона бортов 46–52°, коэффициенты запаса устойчивости 1.19–1.37), отвечающие допустимым нормативным показателям существующих методических указаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Низаметдинов Ф. К., Барышников В. Д., Жанатулы Е., Нагибин А. А., Туякбай А. С., Низаметдинов Н. Ф., Естаева А. Р. Обоснование и выбор расчетных параметров прочностных свойств горных пород для оценки устойчивости бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 31–37.

2. **Фисенко Г. Л.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965. — 378 с.
3. **Правила** обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах открытых разработок. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 164 с.
4. **Галустьян Э. Л.** Управление геомеханическими процессами в карьерах. — М.: Недра, 1980. — 237 с.
5. **Низаметдинов Ф. К., Нагибин А. А., Левашов В. В., Низаметдинов Р. Ф., Низаметдинов Н. Ф., Касымжанова А. Е.** Натурные методы исследования прочностных свойств горных пород и породных контактов // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 26–33.
6. **Методические** указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Утв. МЧС РК № 39 28.09.2008 г.
7. **Попов И. И., Шпаков П. С., Поклад Г. Г.** Устойчивость породных отвалов. — Алма-Ата: Наука, 1987. — 224 с.
8. **Управление** устойчивостью техногенных горных сооружений: под общ. ред. Ф. К. Низаметдинова. — Караганда: КРУ, 2014. — 657 с.
9. **Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л.** Управление устойчивостью карьерных откосов. — М.: Горн. кн., 2008. — 683 с.
10. **Свидетельство** о государственной регистрации прав на объект авторского права “Устойчивость карьерных откосов”, № 126 от 26.01.2015 г., ИС 000641.
11. **Ozhigin S. G., Ozhigina S. B., and Ozhigin D. S.** Method of computing open pit slopes stability of complicated-structure deposits, Inzynieria Mineralna, 2018, Vol. 19, No. 1. — P. 203–208.
12. **Ozhigina S. B., Mozer D. V., Ozhigin D. S., Ozhigin S. G., Bessimbayeva O. G., and Khmyrova E. N.** Monitoring of the undermined territories of Karaganda coal basin on the basis of satellite radar interferometry, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Inform. Sci., 2016, No. 3. — P. 37–40.
13. **Ozhygin D., Šafář V., Dorokhov D., Ozhygina S., Ozhygin S., and Staňková H.** Terrestrial photogrammetry at the quarry and validating the accuracy of slope models for monitoring their stability, IOP Conf. Series, Earth Environmental Sci., 2021, Vol. 906, No. 1. — 012062.

Поступила в редакцию 04/IV 2022

После доработки 21/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022