РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024 № 6

УДК 622.015:622.271.33

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРА КОМПЛЕКСОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ

В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, А. С. Калюжный

Горный институт Кольского научного центра РАН,
E-mail: v.rybin@ksc.ru, *ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

При отработке месторождений с использованием открытой геотехнологии происходит формирование глубоких карьерных выемок и возникает ситуация близкого взаимного расположения промышленных зданий предприятий и зоны открытых горных работ. Подобная ситуация требует организации комплексного мониторинга и периодической оценки устойчивости участков бортов карьеров с учетом новых данных о свойствах и состоянии массива пород. В настоящей статье описан подход к организации системы мониторинга и оценки устойчивости на опасном участке борта карьера. В результате периодического инструментального контроля сейсмическим методом в варианте профилирования показано, что исследуемый участок борта карьера значительно нарушен. Результаты оценки устойчивости данного участка карьера с применением метода предельного равновесия показали, что он находится в неустойчивом состоянии. Сделан вывод о том, что прогноз развития зон разрушения пород на данном участке целесообразно выполнять комплексно, на основе применения натурных и расчетных методов контроля устойчивости.

Открытые горные работы, карьер, мониторинг устойчивости уступов, геофизические методы мониторинга устойчивости, деформирование массива горных пород, борт, откос, уступ, геомеханика

DOI: 10.15372/FTPRPI20240603
EDN: TVGKRO

Необходимым условием безопасной и рентабельной эксплуатации глубокого рудного карьера является учет влияния на устойчивость его бортов совокупности ряда факторов. Основные из них можно разделить на горно-геологические, к числу которых относятся параметры структурных нарушений массива пород, его физико-механические свойства, гидрогеологический режим, и технологические, в том числе параметры борта карьера и качество буровзрывных работ. Совокупное влияние вышеперечисленных факторов определяет устойчивость участков борта карьера и отдельных уступов [1 – 6].

Объект исследования работы — прибортовой массив карьера магнетитовых и апатитовых руд рудника “Железный” (далее — карьер), отрабатывающего месторождение апатит-бадделеитовых руд. В настоящее время контур карьера подвергается изменениям из-за осуществляемой разноски борта, вследствие чего происходит увеличение площади карьерного пространства (размеры карьера в плане в направлении север – юг примерно 3.5 км, запад – восток — 2.5 км) и его глубины (около 600 м).

Под контролем комплексной системы геомеханического мониторинга находится практически весь контур карьера. В результате длительных наблюдений выделены участки прибортового массива пород, требующие наиболее пристального внимания. К их числу относится восточный участок, в пределах которого залегают крутопадающие разломы и системы трещин различных рангов, влияющие на устойчивость групп уступов [7]. Актуальность геомеханического мониторинга данного участка прибортового массива пород объясняется тем, что к востоку от карьерной выемки располагаются здания и сооружения промплощадки предприятия, это затрудняет изменение конструкции борта карьера.

Верхние горизонты по всему периметру контура карьера сложены слабосвязанными, дезинтегрированными породами. Ниже в прибортовом массиве залегают в основном прочные скальные породы. В массиве пород имеют место структурные неоднородности различного порядка, которые формируют его иерархично-блочную среду.

МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОСТИ УЧАСТКА БОРТА КАРЬЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Мониторинг устойчивости восточного участка борта карьера выполнялся с использованием сейсмического метода контроля. Сейсмический метод позволяет определить структуру массива, выявить ослабленные участки как в приконтурной зоне, так и в глубине. С целью оперативного получения геомеханической информации о состоянии приконтурного массива пород выполняются периодические сейсмические измерения.

Для оценки сохранности массива применяется методика сейсмического профилирования с помощью продольных преломленных волн, при которой возбуждение и прием упругих колебаний осуществляется вдоль общего профиля. Такая методика позволяет получить достаточное количество данных, с помощью которых можно адекватно отразить структуру массива пород [8].

Поскольку прибортовой массив пород приповерхностных горизонтов по всему периметру сложен преимущественно слабосвязанными и дезинтегрированными литотипными разностями, контроль динамики изменения распространения упругих волн под влиянием сезонного фактора на исследуемом участке борта является одним из эффективных способов предупреждения развития катастрофических последствий потери устойчивости группы уступов.

С целью получения упругих характеристик и оценки нарушенности прибортового массива пород на отметках +250…265 м восточного участка борта карьера в период с сентября 2023 г. по март 2024 г. выполнено 3 цикла сейсмического профилирования в вертикальной плоскости (рис. 1). Выбор объекта исследований обусловлен тем, что в летний период 2022 г. на данном участке отмечалась потеря устойчивости массива пород, слагающих контролируемую группу уступов, вследствие чего возникла необходимость получения информации об изменении их геомеханического состояния.

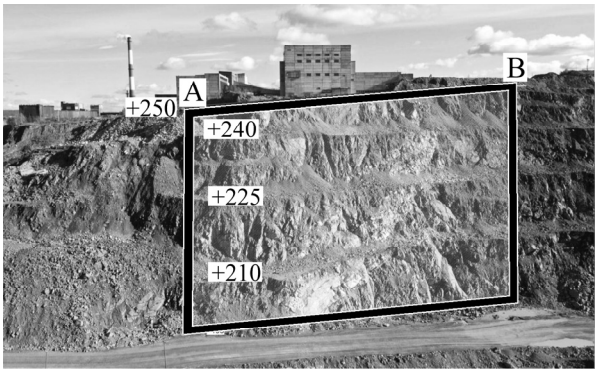


Рис. 1. Схема контролируемого участка борта карьера, в пределах которого осуществлялся мониторинг устойчивости с использованием сейсмического метода; А – В — сейсмический профиль

Шаг расстановки сейсмических датчиков и пунктов возбуждения составлял 7 м, что обеспечивало необходимую точность исследований. Количество источников сейсмических сигналов 30. Исследуемая область массива представляет собой вертикальную плоскость длиной 210 м и высотой 55 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось механическим способом с помощью механизированного молота с накоплением (10 ударов). Для регистрации упругих колебаний применялась 24-канальная сейсмостанция DAQLink 4. Обработка сейсмических измерений выполнена с помощью специализированной программы ZondST2D. При выделении полезного сигнала и анализе данных необходимо учитывать влияние помех от производственных процессов промплощадки комбината, находящейся в непосредственной близости к контролируемому участку борта. Приведенная конфигурация расположения профильной линии, шаг расстановки сейсмодатчиков, технология выполнения и обработки измерений неизменна на всех циклах измерений.

В сентябре 2023 г., в период положительных температур и интенсивного выпадения атмосферных осадков, выполнен первый цикл измерений. Частотный диапазон полезного сигнала относительно низкий и находится в интервале 60 – 70 Гц, что косвенно указывает на значительную нарушенность массива. Установлено, что наблюдаемый участок характеризуется высокой неоднородностью скоростей распространения продольных упругих волн V_p, которые изменяются в интервале от 0.6 до 4.0 км/с (рис. 2*а*). Это косвенно указывает на то, что в целом контролируемый участок группы уступов в интервале глубин на отметках +250…195 м характеризуется значительной трещиноватостью и дезинтеграцией.

Второй цикл исследований на контролируемом участке выполнен в ноябре 2023 г. (рис. 2*б*). Частотный диапазон полезного сигнала по сравнению со вторым циклом измерений более высокий и находился в интервале 70 – 90 Гц. Необходимо отметить, что измерения проводились в период устоявшихся отрицательных температур, поэтому породы верхней части разреза промораживались и условия возбуждения сейсмических сигналов улучшались.

Практически идентичным распределением скорости на ноябрь 2023 г. представляется распределение изолиний скорости V_p на участке контроля в феврале 2024 г., в период промораживания верхней части разреза (рис. 2*в*).

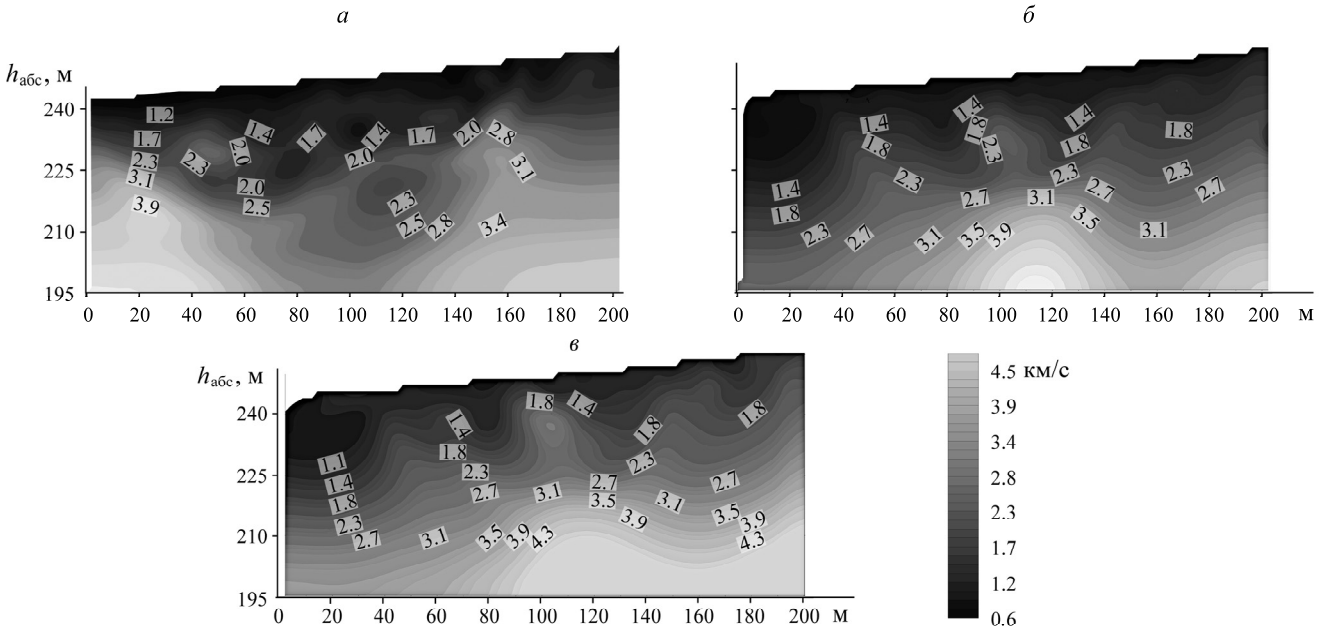


Рис. 2. Распределение скоростей продольных волн на контролируемом участке 23.09.2023 г. (*а*), 15.11.2023 г. (*б*), 29.02.2024 г. (*в*): 1.1–4.3 — значение изолиний скоростей

По результатам трех циклов измерений контролируемую область в вертикальной плоскости условно можно разделить на три зоны. Приповерхностный участок характеризуется низкоскоростным распределением V_p в интервале 0.6 – 1.7 км/с, описывающим геологическую среду из слабосвязных, четвертичных отложений (рис. 2, 3). Размеры этой зоны в границах контролируемого участка существенно не менялись в указанных временных отрезках. Дезинтегрированные, сильнотрещиноватые породы характеризуются V_p в диапазоне 1.7 – 3.1 км/с. Для менее трещиноватых, более крупной блочности обнажений скальных пород характерны скорости 3.1 – 4.3 км/с, для слаботрещиноватых ненарушенных пород — 4.2 – 6.5 км/с. Несколько изменилась конфигурация изолиний скорости между осенним и двумя зимними циклами. Вероятно, это связано с влиянием сезонного фактора и промерзанием пород. Однако визуально на поверхности контролируемой группы уступов участки обводненности в виде притоков воды с поверхности откосов в осенний или наледей в зимний периоды не были выявлены.

В целом результаты периодического инструментального контроля сейсмическим методом при профилировании указывают на неблагоприятное геомеханическое состояние группы уступов. Имевшиеся ранее случаи потери устойчивости на данном участке увеличивают вероятность развития негативных процессов в ближайшее время. С целью получения комплексной геомеханической информации о состоянии массива пород, слагающих контролируемую группу уступов, необходимо применение расчетных методов оценки устойчивости.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА

Находящаяся на руднике система радарного мониторинга [9] позволила предприятию минимизировать риски от потери устойчивости борта. Установлены причины произошедшего события и разработаны способы предупреждения развития подобных явлений в дальнейшем [10].

Оценка устойчивости участка борта карьера выполнялась с помощью метода предельного равновесия в постановке Моргенштерна – Прайса [11 – 16]. Согласно принятым нормативным правовым документам и сложившейся практике оценки устойчивости откосов [17 – 19], данный метод может быть использован для расчета коэффициента запаса устойчивости (КЗУ).

В результате визуального обследования контролируемого участка геомеханической службой рудника установлено, что породы характеризуются сильной трещиноватостью и для расчета устойчивости необходимо принимать физические свойства в соответствии с коэффициентом структурного ослабления для данных типов пород. Так как на данном участке и смежных к нему физические свойства массива детально не уточнены, то они принимались по аналогии с участками, имеющими подобное строение (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства для расчета устойчивости участка борта карьера

Наименование	Плотность γ, т/м^3	Сцепление C, МПа	Угол внутреннего трения φ, град
Четвертичные отложения	2.22	0.010	20.5
Сильнотрещиноватые ийолиты, пироксениты, фениты	2.60	0.08	24
Разлом	2.10	0.05	18

По схемам обрушения, кадрам аэрофотосъемки (рис. 3) и данным о геологии и параметрах борта сформирована расчетная схема данного участка (рис. 4). В непосредственной близости от карьера находится здание корпуса среднего и мелкого дробления (КСМД). В расчетной схеме нагрузка от данного здания была принята равнораспределенной.

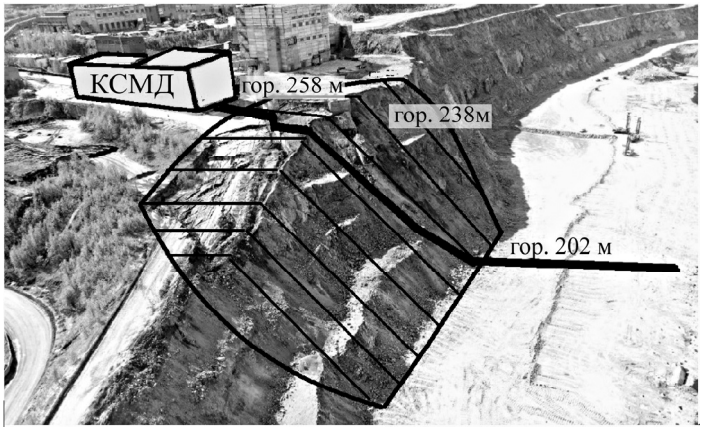


Рис. 3. Аэрофотоснимок с обозначением зоны обрушения, июль 2022 г.

Расчеты коэффициента запаса устойчивости проводились в автоматизированном программном комплексе SVSlope (приложения SVOffice).

Поверхность скольжения задавалась в следующих вариантах:

— круглоцилиндрическая (автоматический поиск наиболее ослабленной поверхности);

— ломанная (вручную по разлому).

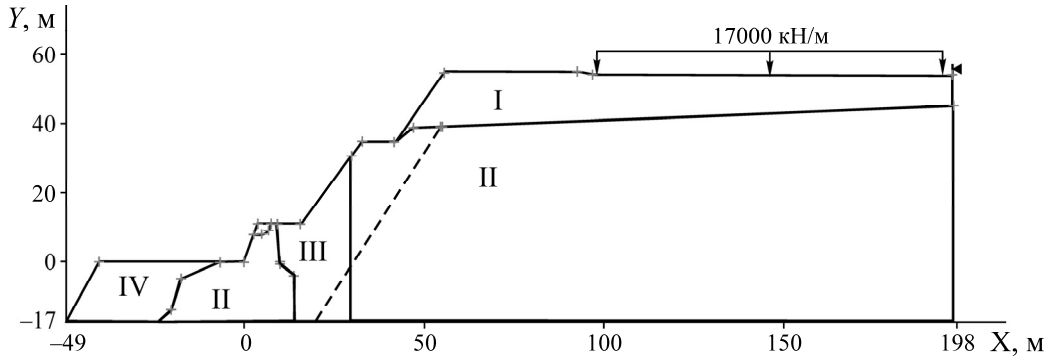


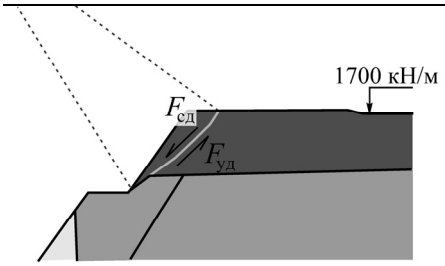
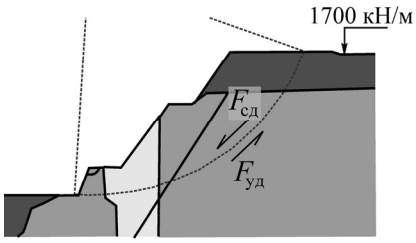
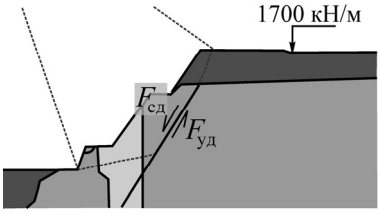
Рис. 4. Расчетная схема для оценки устойчивости участка борта: штриховая линия — разлом; стрелки — нагрузка от здания КСМД; I — четвертичные отложения; II — ийолиты; III — пироксениты; IV — фениты

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ

При определении круглоцилиндрической поверхности ослабления наименьший коэффициент запаса устойчивости имеет верхний уступ, сложенный четвертичными отложениями ($КЗУ_{ВУ} = 0.62$), для группы уступов $КЗУ_{ГУ} = 1.09$. Относительно заданной по разлому ломанной поверхности скольжения для группы уступов $КЗУ_{РГУ} = 0.97$. Результаты расчета оценки устойчивости обобщены в табл. 2.

В настоящее время проводится ряд мероприятий по уточнению прочностных характеристик участка. Исследуется керн скважин, пробуренных ранее в непосредственной близости от наблюдаемого участка. Визуальный осмотр керна доказывает, что массив сложен сильнотрещиноватыми породами с чередованием дробленой горной массы до глубины свыше 120 м. Данный факт подтверждает, что свойства данного массива соответствуют принятым при расчетах.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов обрушившегося участка борта

Схема расчета	Условие	Параметры участка	КЗУ/состояние
	По верхнему уступу	Высота уступа 20 м; угол уступа 58°	0.62 / неустойчивое
	По участку борта	Высота участка 56 м; угол участка борта 43°	1.09 / предельное (неустойчивое)
	По разлому	Высота участка 56 м; угол участка борта 43°	0.97 / неустойчивое

Примечание. $F_{сд}$ — сдвиговая сила, $F_{уд}$ — удерживающая сила.

ВЫВОДЫ

Результаты периодического инструментального контроля с использованием сейсмического метода исследования свидетельствуют о неблагоприятном геомеханическом состоянии группы уступов, что также подтверждается результатами оценки устойчивости рассматриваемого участка борта карьера с помощью расчетного метода.

Повышение достоверности оценки устойчивости участка борта карьера требует обновления данных о физико-механических свойствах горных пород, которые могут меняться во времени под влиянием экзо- и эндогенных процессов.

Для обеспечения устойчивости массива горных пород в пределах исследуемого участка контура карьера необходимо рассмотреть вопрос корректировки его конструкции, возможного применения укрепительных мероприятий. Прогноз развития зон неустойчивости на данном участке целесообразно выполнять комплексно, на основе применения нескольких методов контроля устойчивости борта карьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефремов Е. Ю., Обогрелова П. И.** Анализ условий устойчивости бортов железорудных карьеров, сложенных осадочными породами / Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 9. — С. 178 – 184.
2. **Liu X., Wang Y., and Li D.** Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods, Comput. Geotechnics, 2019, Vol. 111. — P. 301 – 312.

3. **Старостина О. В., Долгоносов В. Н., Алиев С. Б., Абуева Е. В.** Исследование устойчивости уступов верхних горизонтов стационарного борта разреза “Богатырь” // Уголь. — 2019. — Т. 1138. — № 1. — С. 27 – 32.
4. **Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В.** Особенности развития геомеханических процессов в массивах пород глубоких карьеров // ГИАБ. — 2015. — № 4. — С. 32 – 40.
5. **Carrubba P. and Moraci N.** Residual strength parameters from a slope instability, 3rd Int. Conf. Case Histories Geotech. Eng., St. Louis, Missouri, 1993. — P. 2.58.
6. **Tschuchnigg F., Schweiger H. F., and Sloan S. W.** Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Pt. II: Back analyses of a case history, Comput. Geotechnics, 2015, Vol. 70. — P. 178 – 189.
7. **Рыбин В. В., Калашник А. И., Константинов К. Н., Дьяков А. Ю., Старцев Ю. А., Запорожец Д. В.** Комплексный анализ результатов мониторинга устойчивости уступов карьера с использованием геофизических методов исследования // Горн. пром-сть. — 2023. — № 5S. — С. 87 – 92.
8. **Рыбин В. В., Константинов К. Н., Старцев Ю. А.** Оценка динамики изменения упругих характеристик массива пород в борту карьера // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 40 – 46.
9. **Розанов И. Ю., Завьялов А. А.** Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника “Железный” (АО “Ковдорский ГОК”) // ГИАБ. — 2018. — № 7. — С. 40 – 46.
10. **Калюжный А. С., Розанов И. Ю.** Установление причин обрушения участка борта карьера на основе радарного мониторинга и расчетов устойчивости // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 40 – 49.
11. **Krahn J., Price V. E., and Morgenstern N. R.** Slope stability computer program for Morgenstern – Price method of analysis, Univ. Alberta, Edmonton, Alta, 1971, Vol. 14.
12. **Калинин Э. В., Кропоткин М. П.** Методы расчета устойчивости склонов и откосов: российские подходы в сопоставлении с мировыми тенденциями // Инженерная геология. — 2022. — Т. XVII. — № 4. — С. 22 – 38.
13. **Абелев М. Ю., Аверин И. В., Чунюк Д. Ю.** Опыт строительства сооружений на оползневых склонах в сейсмических районах // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2022. — № 5. — С. 28–32.
14. **Фоменко И. К., Безруков И. В.** Оценка устойчивости оползневого склона с учетом прогноза изменения инженерно-геологических условий // Материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. “Новые идеи в науках о Земле”. — 2019. — Т. 3. — С. 46 – 49.
15. **Hedianto H., Ma’arief A. A., and Mahyuni E. T.** Analisis kestabilan lereng metode Morgenstern – Price jalan poros malino — sinjai kabupaten gowa, J. Geomine, 2022, Vol. 10 (1). — P. 28 – 42.
16. **Alok A., Burman A., Samui P., R. Kaloop, M., and Eldessouki M.** A generalized limit equilibrium-based platform incorporating simplified Bishop, Janbu and Morgenstern – Price methods for soil slope stability problems, Adv. Civil Eng., 2024. — P. 1 – 16.
17. **Исмагилов Р. И., Захаров А. Г., Бадтиев Б.П., Сенин Н. В., Павлович А. А., Свириденко А. С.** Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа // Горн. пром-сть. — 2020. — № 3. — С. 84 – 90.
18. **Макаров А. Б., Ливинский И. С., Спирин В. И., Павлович А. А.** Управление устойчивостью бортов карьеров как основа обеспечения ответа на глобальные вызовы // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 3. — С. 188 – 202.
19. **Федеральные нормы** и правила в области промышленной безопасности “Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов” Приказ от 13.11.2020 № 439.

Поступила в редакцию 01/VII 2024
После доработки 30/X 2024
Принята к публикации 08/XI 2024