

УДК 622.831

**МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА  
УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ**

**В. В. Рыбин, К. Н. Константинов, И. Ю. Розанов**

*Горный институт КНЦ РАН,*

*E-mail: k.konstantinov@ksc.ru, ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Показано, что повышение безопасности при ведении открытых горных работ в сложных горно-геологических условиях может быть достигнуто при организации на предприятии многоуровневой системы геомеханического мониторинга по отслеживанию состояния уступов и бортов карьера, а также законтурного массива пород на различных масштабных уровнях. Приводится характеристика широко используемых как в отечественной, так и в зарубежной практике методов мониторинга за устойчивостью конструктивных элементов карьера. Предложенный подход свидетельствует о необходимости оснащения действующих предприятий современными средствами контроля, методиками, специальными службами, которые в своей взаимосвязи существенно расширяют возможности геомеханического мониторинга.

*Мониторинг, многоуровневость, устойчивость бортов карьеров, геодезия, радарные технологии, геофизические методы, напряженно-деформированное состояние, коэффициент Пуассона*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210510

---

Развитие открытых горных работ с углублением и расширением карьерных выемок требует особого внимания к вопросам обеспечения безопасности. Горный институт КНЦ РАН имеет достаточный опыт исследований физических свойств, напряженного состояния, устойчивости массивов горных пород в окрестности крупных карьерных выемок, в подготовке геомеханических обоснований, регламентов по отработке запасов месторождений Кольского региона открытым способом, в которых важное значение приобретает контроль состояния прибортового массива и устойчивости бортов карьеров [1]. При этом элементы открытой геотехнологии (уступы, группы уступов, участки борта карьера и др.) по периметру и глубине формирующейся карьерной выемки могут находиться в различных условиях.

С одной стороны, это вызвано тем, что приповерхностные участки массива обычно представлены малопрочными, часто мало- или вообще несвязными четвертичными и моренными отложениями или сильно выветрелыми разновидностями скальных горных пород. Это позволяет отождествлять свойства подобных массивов с грунтами [2]. В то же время массив пород, слагающий нижележащие уступы, как правило, характеризуется существенно более высокой степенью сохранности и большими значениями деформационно-прочностных свойств, т. е. соответствует свойствам скальных пород.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-242001).

С другой стороны, контроль устойчивости элементов открытой геотехнологии должен включать в себя как наблюдения за отдельно взятыми уступами, так и за группами уступов, участками борта и бортом карьера в целом, что предопределяет многоуровневость мониторинга. Многоуровневость соответствует иерархично-блочному состоянию прибортового массива пород и может быть достигнута применением различных методов и средств контроля. В настоящее время достаточно активно применяются методы мониторинга устойчивости бортов карьеров, охватывающие как отдельные уступы, группы уступов, так и борт карьера в целом, что предполагает многоуровневость процесса мониторинга устойчивости элементов открытой геотехнологии. Такой подход в организации мониторинга позволяет рассматривать борта карьера и слагающие его уступы как специфические инженерные сооружения, безопасным состоянием которых во многом определяется эффективная работа всего горного предприятия.

Для условий элементов открытой геотехнологии целесообразно выделять уровень регионального мониторинга для борта карьера в целом и уровень локального мониторинга для отдельных уступов [3]. Выбор оптимальных методов исследования деформационных процессов должен быть проведен на основе учета структурных особенностей массива, изучения его геологического строения, физико-механических свойств пород и естественного напряженно-деформированного состояния [4, 5]. Так, методы спутниковой геодезии могут быть применимы для борта карьера в целом и массива пород, включающего в себя карьерную выемку, радарные технологии — для участков борта карьера, геофизические методы — для групп уступов и отдельно взятых уступов.

Цель настоящей работы — показать, что надежный контроль устойчивости бортов карьеров обеспечивается разработкой и внедрением комплексной многоуровневой системы мониторинга, геомеханического состояния геологической среды как по наблюдениям за поверхностью бортов карьеров, так и по изучению законтурного массива пород на различных масштабных уровнях.

### РЕГИОНАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

Для наблюдения за процессами деформирования массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение, а также выявления участков борта карьера, потенциально опасных с точки зрения устойчивости, наиболее эффективными являются методы спутниковой геодезии, использующие системы GPS и ГЛОНАСС, насчитывающие по 24 спутника каждая.

В настоящее время методы спутниковой геодезии широко применяются на российских и зарубежных месторождениях полезных ископаемых, обрабатываемых открытым способом [6–12]. Например, в карьере Центрального рудника, обрабатывающего хибинское месторождение апатит-нефелиновых руд плато Расвумчорр, геодинамический полигон, заложенный в 1999 г., состоит из 8 фундаментальных пунктов [13] (рис. 1).

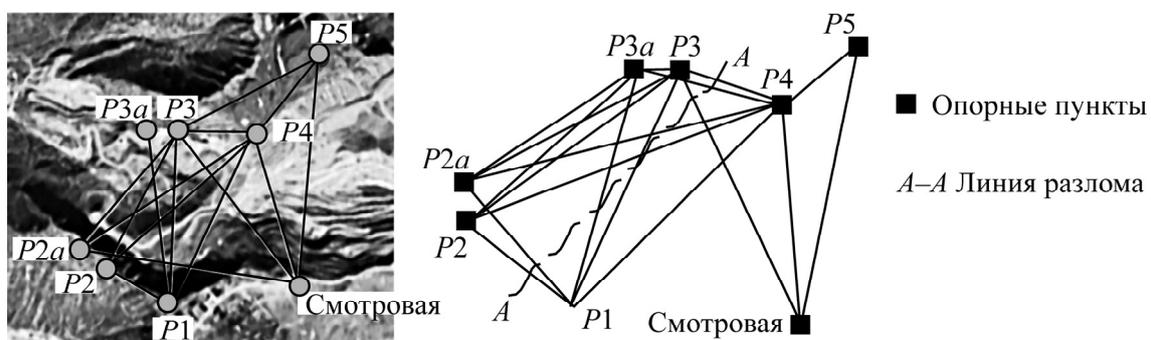


Рис. 1. Общая конфигурация сети фундаментальных пунктов в карьере рудника Центральный ОАО «Апатит»

Результаты наблюдений в карьере рудника Центральный обнаружили тенденцию общего сжатия массива пород в квазилинейном режиме в направлении, нормальном к разлому  $A-A$ . Для мониторинга устойчивости бортов карьеров активно применяется методика измерения расстояний между фундаментальными пунктами, расположенными по контуру карьера. Измерения выполняются светодальномерами и тахеометрами.

Подобные системы часто используются совместно с GPS-приемниками. Основные преимущества таких систем — высокая точность и скорость измерений, а также полная автоматизация процессов съемки и обработки информации. При обработке месторождений открытым способом данный вид мониторинга встречается на таких зарубежных месторождениях, как Palabora (ЮАР), Chuquibambilla (Чили), BarrickPorgera (Папуа – Новая Гвинея), Sunrise Dam Gold Mine (Австралия) и др.

В России такой мониторинг применяется в карьере “Железный” АО “Ковдорский ГОК”. На рис. 2 показана схема расположения фундаментальных пунктов в карьере “Железный” (римские цифры, 220А и 295Б), обрабатывающего месторождение магнетит-апатит-бадделейтовых руд. Результаты многолетних GPS-измерений представлены в виде стрелок, указывающих направление смещения каждого фундаментального пункта. Длина стрелок зависит от величины максимального результирующего смещения.

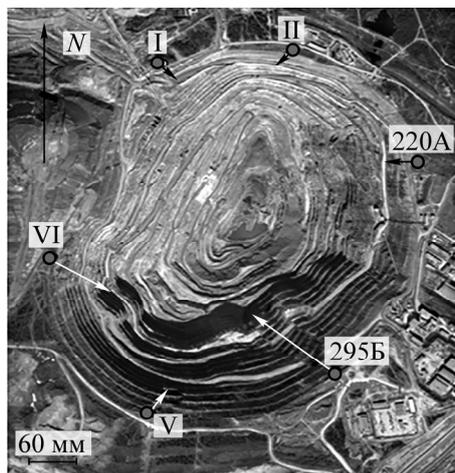


Рис. 2. Схема расположения фундаментальных пунктов в карьере “Железный” и результаты многолетних GPS-измерений

Полученные результаты позволили условно районировать карьер по характеру наблюдаемых сдвижений на северный и южный участок. Сравнительно длинные стрелки на южном участке борта, вероятно, свидетельствуют о смещениях, которые могли оказать негативное влияние на устойчивость отдельных уступов и спровоцировать ряд локальных обрушений на нижележащих горизонтах.

#### МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ УЧАСТКОВ БОРТА КАРЬЕРА

Одной из значимых технологических новинок стало внедрение в практику мониторинга устойчивости бортов карьеров радарных технологий. Производителями радаров являются три фирмы: Reutech Mining (ЮАР), Ground Probe (Австралия) и IDS (Италия). Принцип работы георадаров основан на использовании эффекта интерференции электромагнитных волн. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения фаз отраженного сигнала.

В настоящее время радары активно применяются на зарубежных месторождениях: на золотом руднике “Geita” (Танзания) [14], в карьере “Palabora” (Южная Африка) [15], в “Siilinjärvi” (Финляндия), “Sadiola Gold mine” (Мали) и “Sunrise Dam Gold mine” (Австралия), “Turtle Mountain” (Канада) [16] и многих других. АО “Ковдорский ГОК” — одно из первых предприятий в России, которые начали использовать подобные технологии. В карьере “Железный” работает система радарного мониторинга устойчивости бортов карьеров, состоящая из четырех радаров (показанных на рис. 3 в виде прямоугольников), три из них — мобильные радары IBIS ArcSAR.

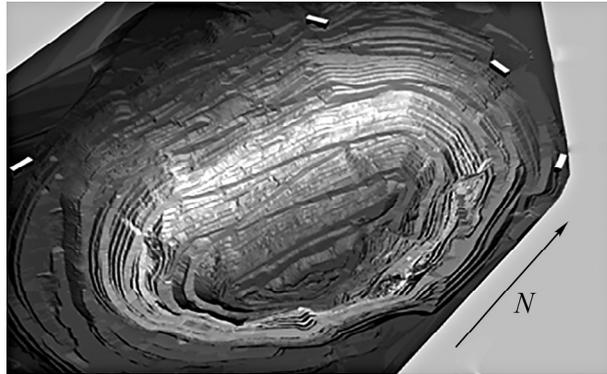


Рис. 3. Схема организации системы радарного мониторинга в карьере “Железный” АО “Ковдорский ГОК”

В период с 2014 по 2019 г., радарная система мониторинга зафиксировала и предупредила большое количество локальных обрушений в масштабе одного уступа и объемами, не превышающими  $100 \text{ м}^3$ , а также одно крупное обрушение группы уступов объемом около  $100\,000 \text{ м}^3$  (момент обрушения — серая звезда на рис. 4б) [17].

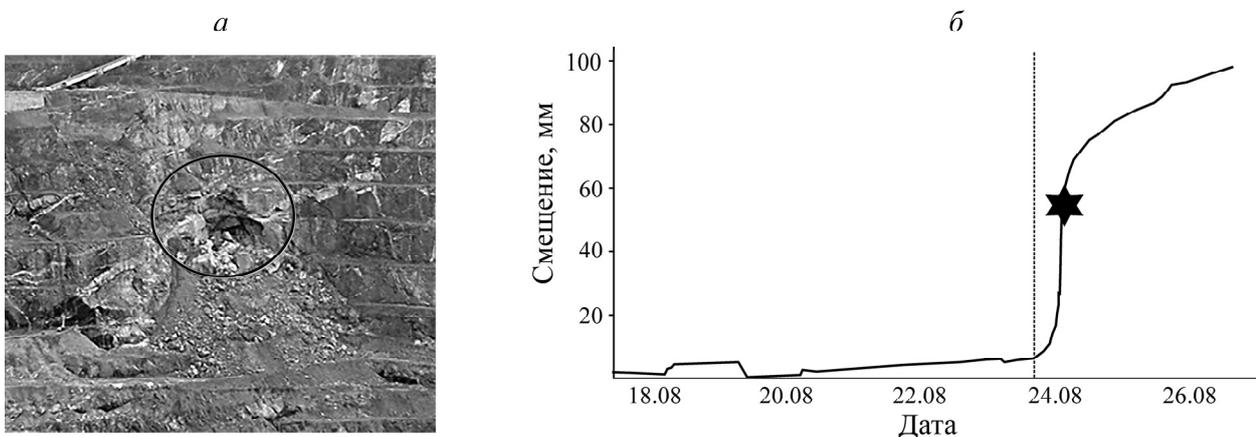


Рис. 4. Последствия обрушения группы уступов в карьере “Железный” АО “Ковдорский ГОК” (а) и зафиксированный рост смещений во времени перед обрушением (б)

Процесс деформирования массива начался 20 августа 2015 г. и развивался с постоянной скоростью на протяжении почти четырех дней. 24 августа скорость смещения массива начала возрастать и примерно через 6 ч произошло обрушение. Суммарное смещение массива горных пород перед обрушением составило 55 мм.

Анализируя данные крупного обрушения (см. рис. 4), сделаны первые выводы о критических значениях скорости смещения массивов, характерных для условий Ковдорского месторождения и других крупных рудных месторождений Мурманской области.

## ЛОКАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУПП УСТУПОВ И ОТДЕЛЬНЫХ УСТУПОВ

Помимо мониторинга устойчивости поверхности бортов карьеров, неотъемлемой частью многоуровневого подхода является контроль процессов упругого деформирования в прибортовом массиве пород геофизическими методами. Наиболее применимы к горно-геологическим условиям карьера “Железный” и другим подобным карьерам методы сейсмоакустического контроля в различных вариациях (микросейсмомониторинг, сейсмический метод в вариантах профилирования и томографии, ультразвуковое профилирование). С целью получения информации о геомеханическом состоянии массива пород и проведения обоснованной оценки устойчивости борта карьера используются сейсмические методы разного масштабного уровня в различном техническом исполнении [18, 19].

Микросейсмический мониторинг широко применяется на ряде предприятий, ведущих открытые горные работы в Австралии, Канаде, Намибии и ЮАР [20, 21]. Система микросейсмического мониторинга в карьере “Железный” функционирует с 2007 г. и решает главным образом задачу выявления предвестников развития деформаций в законтурном массиве пород карьера с последующим выделением и детальным изучением потенциально неблагоприятных участков с точки зрения устойчивости борта [22]. Определенные по сейсмическим событиям плоскости ослабления могут также указывать на ранее неизвестные геологические структуры, которые впоследствии могут быть подтверждены другими геотехническими методами.

Так, в 2012 г. в массиве пород восточного участка борта микросейсмической системой были выделены предвестники развития поверхностей ослабления, по которым в августе 2015 г. произошла потеря устойчивости группы уступов, что также подтверждается данными напряженно-деформированного состояния [23].

Учитывая важность инструментального контроля устойчивости не только борта в целом, но и отдельных групп уступов, актуальной является задача геофизического контроля геологической среды в массиве пород на выявленных потенциально неустойчивых участках борта карьера, требующих особого внимания и контроля. Сейсмический метод позволяет определить структуру массива, которая существенно влияет на его напряженно-деформированное состояние, обнаружить высокопрочные и ослабленные участки на контуре выработки и в глубине массива. С 2006 г. с целью оперативного получения динамических упругих характеристик приконтурного массива пород на участках борта, актуальных с точки зрения устойчивости, выполняются периодические сейсмические измерения сначала в варианте профилирования, а с 2014 г., с развитием технических средств геоконтроля, — в варианте томографии [24].

В комплексе с результатами исследований локальных скважинных методов данные измерений методом сейсмического профилирования позволяют качественно оценивать степень техногенной нарушенности прибортового массива вследствие ведущихся взрывных работ и давать рекомендации, повышающие эффективность и безопасность выполнения горных работ. Данные исследования осуществлялись при участии финских специалистов-геологов в рамках проекта HazArctic, основная задача которого — изучение устойчивости бортов карьеров.

На рис. 5 показан пример сопоставительного анализа данных исследований методами телевизионного контроля скважин и ультразвукового каротажа, по результатам которого в прибортовой части карьера выделена трещиноватая зона техногенного происхождения (участок, выделенный кружком, и стоп-кадр участка ствола скважины с параметрами трещиноватости на диаграмме).

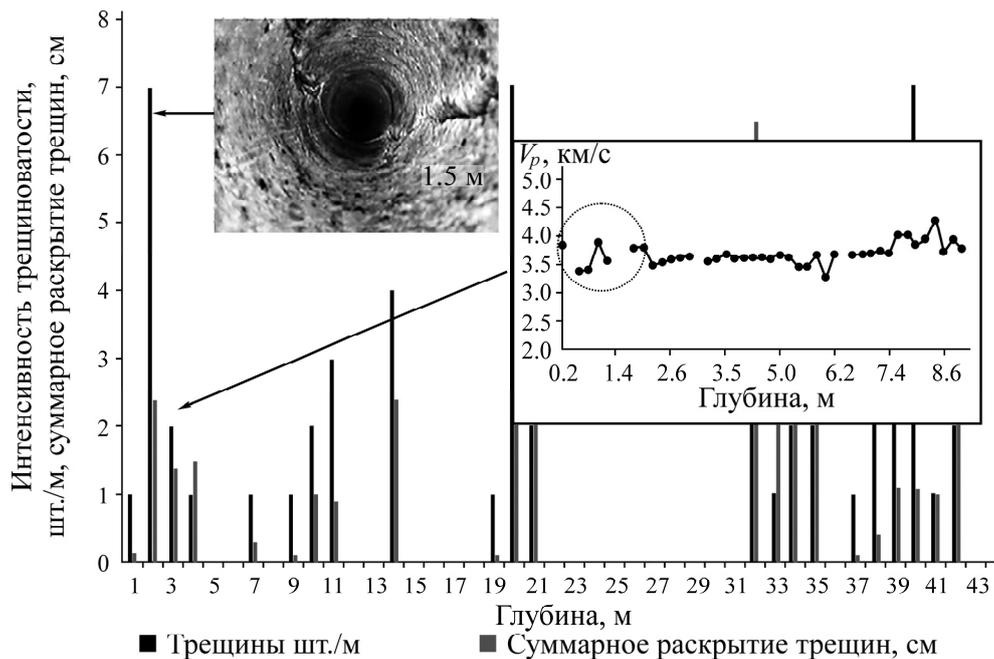


Рис. 5. Сопоставительный анализ результатов исследования приборного массива пород комплексом локальных методов

В отличие от профилирования вдоль одиночного уступа, измерения методом сейсмической томографии позволяют оценивать упругие характеристики законтурного массива пород, слагающих группу уступов (100–150 м по вертикали). Применительно к сейсмическому методу в варианте томографии в качестве наиболее показательного критерия устойчивости выступает коэффициент Пуассона, характеризующий степень ослабления структурных связей и повышение трещиноватости в массиве пород. В результате по данным периодических циклических измерений выполняется оценка геомеханического состояния контролируемого участка и с учетом влияющих горно-геологических факторов даются рекомендации по обеспечению устойчивости и безопасному ведению горных работ в пределах контролируемого участка борта карьера.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемый подход к организации многоуровневой комплексной системы мониторинга устойчивости приборного массива пород, включающего в себя элементы открытой геотехнологии, базируется на учете свойств и состояния массива, а также на учете масштабного уровня контролируемых объектов. Это в полной мере соответствует представлениям об иерархично-блочном строении массива пород, в пределах которого ведутся горные работы открытым способом и формируется карьерная выемка.

Представлен комплекс региональных и локальных методов контроля устойчивости бортов карьеров на действующих предприятиях. Их взаимосвязь при организации многоуровневой системы геомеханического мониторинга обеспечивает надежный контроль за процессами деформирования массива пород как по наблюдениям за поверхностью бортов карьеров, так и по изучению законтурного пространства на различных масштабных уровнях (от отдельного уступа до борта карьера в целом).

Приводится положительный опыт реализации системы на горнорудных предприятиях Мурманской области с участием специалистов Горного института КНЦ РАН.

Данная статья подготовлена при поддержке международного проекта HazArctic. Мнение авторов может не совпадать со взглядами Европейского Союза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилкин А. А., Козырев А. А., Бочаров С. Н., Рыбин В. В. Перспективная концепция развития горных работ на АО “Ковдорский ГОК” // Горн. журн. — 2019. — № 6. — С. 30–34.
2. Низаметдинов Н. Ф., Низаметдинов Р. Ф., Нагибин А. А., Естаева А. Р. Устойчивость откосов уступов и бортов карьера в глинистых породах // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 43–44
3. Каспарьян Э. В., Кожуховский А. В., Розанов И. Ю. Опыт организации мониторинга устойчивости бортов и уступов карьера // Изв. вузов. Горн. журн. — 2015. — № 5. — С. 67–74.
4. 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.
5. Машуков В. И., Пирля К. В., Барышников В. Д. Структура горной породы и ее паспорт прочности // ФТПРПИ. — 1990. — № 3. — С. 21–27.
6. Ильинская Е. А., Будилова В. В. Комплексный маркшейдерский мониторинг при совместном применении спутниковой и наземной систем наблюдения за деформациями бортов карьеров // Материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. конф. “Проблемы недропользования”, 8–10 февраля 2012. — Екатеринбург, 2012. — С. 446–452.
7. Романько Е. А., Ковырзин К. Л. Организация маркшейдерских наблюдений на месторождении Юбилейное ООО “Башкирская медь” // Маркшейдерский вестн. — 2014. — № 4. — С. 22–24.
8. Панжин А. А., Сашурин А. Д., Панжина Н. А., Ефремов Е. Ю. Методика и результаты геодинамического мониторинга при разработке Узельгинского и Талганского месторождений Южного Урала // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 41–49.
9. Спиринов В. И. Принципы организации инструментальных наблюдений за деформационными процессами, протекающими в прибортовых массивах карьера “Восточный” Олимпиадинского ГОКа // Материалы VI Всерос. молодежной науч.-практ. конф. “Проблемы недропользования”, 8–10 февраля 2012. — Екатеринбург, 2012. — С. 529–540.
10. Sakurai S. and Shimizu N. Monitoring the stability of slopes by GPS, Int. Symp. on Stability of Rock Slopes in Open Pit Min. and Civil Eng., SAIMM, 2007. — P. 353–359.
11. Kim D., Langley R. B., Bond J., Chrzanowski A. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: Initial study, GPS Solutions, 2003, No. 7. — P. 176–185.
12. Zahariadis H. and Tsakiri M. Low cost monitoring system in the open pit lignite mines of megalopoli, Greece, 3rd IAG / 12<sup>th</sup> FIG Symp., Baden, May 22–24, 2006.
13. Kozyrev A. A., Kasparian E. V., Savchenko S. N., and Dostovalov R. N. Rock Mechanics monitoring of hard rock massifs using space geodesy methods, Proc. of the 23<sup>rd</sup> Int. Mining Congr. of Turkey, April 16–19, 2013, Antalya, Turkey, Ed. Ilkay Celik & Mehtap Kilic, Publ. TMMOD Maden Muhendisleri Odasi Selanic Cad. 19/14 Kizilay-Ankara, ISBN: 978-605-01-0467-7. — P. 627–629.
14. Dyke G. P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali — a case study, World Gold Conf. 2009, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009.
15. Severin J., Eberhardt E., Ngidi S., and Stewart A. Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations: Proc. of the 3<sup>rd</sup> CANUS Rock Mechanics Symp., Toronto, May 2009.
16. Ingegneria Dei Sistemi (IDS) — Radar for mining applications, Available at: [www.mining-technology.com/contractors/exploration/idsingegneria](http://www.mining-technology.com/contractors/exploration/idsingegneria) (Accessed 05 October, 2011).

- 17. 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.
- 18. Верхоланцев А. В., Дягилев Р. А., Шулаков Д. Ю., Шкурко А. В.** Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере “Шахтау” // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 59–69.
- 19. Маловичко Д. А., Линч Р. Э.** Микросейсмический мониторинг бортов карьеров // Горн. эхо. — 2006. — № 2 (24). — С. 21–30.
- 20. Wesseloo J. and Sweby G. J.** Microseismic monitoring of hard rock mine slopes, Proc. South. Hemisphere Int. Rock Mech. Symp. (SHIRMS), Vol. 1, Perth, Western Australia, 2008. — P. 433–450.
- 21. Lynch R. A., Wuite R., Smith B.S., and Cichowicz A.** Micro-seismic monitoring of open pit slopes. Proc. of the 6<sup>th</sup> Simp. on Rockbursts and Seismicity in Mines, ed. Y. Potvin and M. Hudyma, ACG: Perth, 2005. — P. 581–592.
- 22. Kozyrev A. A., Kagan M. M., and Chernobrov D. S.** Results related pit wall microseismic monitoring (“Zhelezny” mine, Kovdorsky GOK, JSC), Proc. of 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines., Perm. Mining Institute of RAS, 2013. — P. 501–505.
- 23. Rybin V. V., Panin V. I., Kagan M. M., and Konstantinov K. N.** Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits, Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proc. of the 2018 European Rock Mechanics Symp., 2018, 1<sup>st</sup> Edition, Vol. 1. — P. 551–556.
- 24. Rybin V.V., Konstantinov K. N., and Kalyuzhny A. S.** Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines, Eurasian Min., 2019, No. 2. — P. 23–26.

*Поступила в редакцию 01/VII 2021*

*После доработки 07/IX 2021*

*Принята к публикации 10/IX 2021*