ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):122-133
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_122

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ РАДАРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРА «ЖЕЛЕЗНЫЙ» АО «КОВДОРСКИЙ ГОК»

И.Ю. Розанов[1], Д.А. Ковалев[2]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru
[2] ООО «Гексагон Геосистемс Рус», Москва, Россия

Аннотация: В России радары стали применяться относительно недавно и на сегодняшний день этот метод мониторинга становится все более используемым, несмотря на достаточно высокую стоимость оборудования. Несомненными преимуществами перед другими методами являются: способность за короткий промежуток времени выдавать большое количество информации о перемещении массива горных пород, возможность контроля устойчивости массива 24 ч в сутки в любую погоду, высокая точность наблюдений и т.д. Существенным недостатком является отсутствие инструктивных материалов для сотрудников предприятий по использованию данных систем. Приведены данные о зафиксированных радаром IBIS FM случаях потери устойчивости прибортового массива пород в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК». Полученные данные полевых измерений были проанализированы и определены критические значения скорости смещения уступов, предшествующие потере устойчивости. Проанализированные данные и имеющийся опыт позволили составить две инструкции для персонала геомеханической службы, в которых указываются мероприятия, обеспечивающие эффективную работу данной технологии, порядок действий персонала для обнаружения участков массива с потенциально опасными деформациями, разрушениями и при подаче сигналов тревоги.

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, мониторинг устойчивости уступов, деформирование и разрушение массива горных пород, радары, борт, откос, уступ.

Для цитирования: *Розанов И. Ю., Ковалев Д. А.* Результаты анализа данных радарной системы мониторинга устойчивости борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 122–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_122.

Analysis of radar monitoring data on the slope stability of Zhelezny open pit, Kovdorsky GOK JSC

I.Yu. Rozanov[1], D.A. Kovalev[2]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia,
e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru
[2] JSC Hexagon Systems Rus, Moscow, Russia

Abstract: Radars have been used in Russia relatively recently and nowadays this monitoring method becomes more and more popular in spite of rather high cost of equipment. Such popu-

© И.Ю. Розанов, Д.А. Ковалев. 2022.

larity is due to the undoubted advantages over other methods: the ability to produce a large amount of information about the rock mass movement in a short period of time; 24-hour control of the rock mass stability in any weather; high accuracy of observations, etc. A significant drawback is the lack of instructional materials for employees of enterprises on the use of these systems. This article presents data on cases of loss of stability of the adjacent rock mass in the Zhelezny open pit recorded by the IBIS FM radar (manufactured by IDS (Italy)). The data obtained from field measurements were analyzed and critical values of benches displacement rates preceding the loss of stability were determined. The analyzed data and available experience made it possible to draw up two instructions for the personnel of the geomechanical service, which specify the measures to ensure the effective operation of this technology, the procedure for detecting areas of the rock massif with potentially dangerous deformation, destructions and actions of personnel when giving alarms.

Key words: open mining, open pit, slope stability monitoring, deformation and destruction of rock mass, radars.

For citation: Rozanov I. Yu., Kovalev D. A. Analysis of radar monitoring data on the slope stability of Zhelezny open pit, Kovdorsky GOK JSC. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1): 122-133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_122.

Введение

При развитии открытых горных работ необходимо особое внимание уделять вопросам обеспечения безопасности. Горный институт КНЦ РАН имеет достаточный опыт в подготовке регламентов по отработке запасов месторождений Кольского региона открытым способом, в которых уделялось значительное внимание контролю состояния прибортового массива и устойчивости бортов карьеров.

Характерной особенностью условий разработки месторождений при открытых горных работах, является достаточно высокая доля приповерхностных, большей частью слабых слоев пород, часто по своим свойствам приближающихся к грунтовым массивам. Грунтовые массивы отличаются небольшими размерами слагающих их частиц (в пределах нескольких миллиметров), весьма малым сцеплением между частицами, практически полным отсутствием систем структурных неоднородностей, за исключением слоистости, а также наличием естественного напряженного состояния, обусловленного исключительно гравитационным полем [1 — 3].

По мере увеличения глубины карьеров доля грунтовых массивов уменьшается, а скальных, большей частью, достаточно прочных пород, увеличивается. Массивы скальных пород характеризуются ярко выраженной иерархично-блочной структурой, обусловленной широким развитием систем разномасштабных структурных неоднородностей, их естественное напряженное состояние в общем случае обусловлено гравитационно-тектоническими полями напряжений.

С точки зрения геомеханики борта карьеров следует рассматривать как специфические инженерные сооружения, в которых разные уступы имеют различный срок службы. При этом самые долгоживущие верхние уступы располагаются в наиболее ослабленных грунтовых массивах, где наиболее вероятными видами потери устойчивости являются оползневые явления [4, 5].

Уступы, сложенные скальными породами, вследствие иерархично-блочной структуры, с различной степенью ин-

тенсивности ослабляются структурными неоднородностями, и здесь преобладающими проявлениями геомеханических процессов являются образования приконтурных зон нарушенных пород (зон неупругих деформаций и разрушений), в пределах которых возможно образование отдельных вывалов.

В пределах всего борта вследствие наличия крупномасштабных неоднородностей (ослабленных зон, геологических нарушений, разломов), определяющих устойчивость бортов в целом, возможны смещения крупных структурных блоков и их смещение в сторону выработанного пространства, а также оползневые явления в пределах самих крупных структурных неоднородностей.

Подобный механизм развития деформаций и разрушений пород в массивах иерархично-блочной структуры применительно к условиям контроля устойчивости бортов и уступов карьеров обусловливает иерархичную структуру мониторинга. В настоящее время достаточно активно применяются различные натурные методы мониторинга устойчивости бортов карьеров, охватывающие как отдельные уступы, группы уступов, так и борт карьера в целом. В частности, эффективным методом, в настоящее время, является применение наземных радаров [6].

В 2014 г. на борту карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» был установлен радар IBIS FM. На сегодняшний день радарная система мониторинга насчитывает уже 4 радара и покрывает практически все участки борта карьера.

Интерферометрический радарный мониторинг устойчивости бортов карьеров

В 2002 г. в Университете Квинсленда (Австралия), группа исследователей разработала сканирующую радиолокационную систему для мониторинга устойчивости бортов карьеров с использованием дифференциальной интерферометрии. На сегодняшний день радарные системы мониторинга являются одним из лучших методов локального мониторинга устойчивости уступов и бортов карьеров и разрезов.

Принцип проведения измерений радаром отличается от принципов, используемых в традиционном маркшейдерском оборудовании.

Радар является активным датчиком и посылает импульс с частотой 17,1–17,3 ГГц. Импульс взаимодействует с отражающей поверхностью, частично поглощается и частично отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения ин-

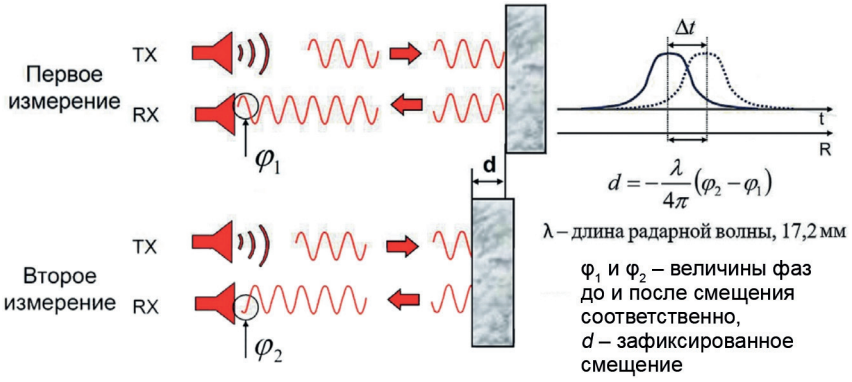

Рис. 1. Принцип работы радарной системы
Fig. 1. Radar system operating principle

формации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала (рис. 1). Величина смещения прямо пропорциональна величине разности фаз [7, 8].

Все существующие инструменты делятся на радары с реальной апертурой и синтезированной апертурой. Под апертурой понимается та часть антенны, которая участвует в излучении или приеме электромагнитной волны.

Во время каждого измерения отражение радарного сигнала принимается от каждого пикселя. Это отражение дает информацию об амплитуде сигнала и фазе. Чем меньше размер пикселя, наложенного на модель объекта, тем более детально можно наблюдать за массивом горных пород.

Зачастую радары с синтезированной апертурой имеют размер пикселя меньше, чем радары с реальной апертурой и способны производить съемку с больших расстояний до объекта мониторинга.

Основным преимуществом радарного мониторинга устойчивости бортов карьеров является их способность проводить измерения 24 ч в сутки в любую погоду, невзирая на осадки (снег, дождь, град, туман) или плохую видимость в карьере, вызванную пылью, выхлопными газами и т.п. Программное обеспечение радара способно за короткое время проанализировать данные измерений и при необходимости выдать предупреждение об эвакуации персонала. Кроме того, заявленная производителями точность измерения (0,1 мм) позволяет зафиксировать сдвижение уступов на ранних стадиях процесса деформирования.

Минусом является отсутствие инструктивных материалов для сотрудников предприятий по использованию данных систем.

С момента выпуска первого радара прошло больше 19 лет и на сегодняшний день радарные технологии активно применяются на многих зарубежных предприятиях. Например, на золотом руднике «Geita» (Танзания) [9], в карьере «Palabora» (Южная Африка) [10], в «Siilinjärvi» (Финляндия), «Sadiola Gold mine» (Мали) и «Jwaneng Diamond mine» (Ботсвана) [11], «Kanmantoo Coper Mine» (Австралия) [12] «Bingham-Canyon» (США) и многие другие.

Применение радарной системы мониторинга в условиях карьера «Железный»

В 2014 г. АО «Ковдорский ГОК» стационарно установил на контуре карьере «Железный» 2D радар с синтезированной апертурой IBIS FM [13—18] фирмы IDS в контейнерном исполнении. Дальность выполнения измерений от 10 до 4000 м. Размер пикселя (минимальная область покрытия радара) 4,4 м на 0,75 м (при удалении на 1000 м) и 8,8 м на 0,75 м (при удалении на 2000 м). Рабочие температуры окружающей среды в контейнерном исполнении от –50° до +55°.

После установки радара при настройке системы оповещения персонала была поставлена задача определить критические параметры деформирования массива, при превышении значений которых неизбежно произойдет потеря устойчивости.

Для этого в период с 2014 по 2015 гг. собиралась и анализировалась информация о произошедших обрушениях различного масштабного уровня.

В этот период радар зафиксировал несколько незначительных обрушений от 200 до 500 м^3 и одно относительно более крупное — размером 100 000 м^3, которое произошло 24 августа 2015 г. на восточном участке борта (гор. +70 м; –35 м) [19].

По величинам перемещений, предшествующим обрушениям, рассчитыва-

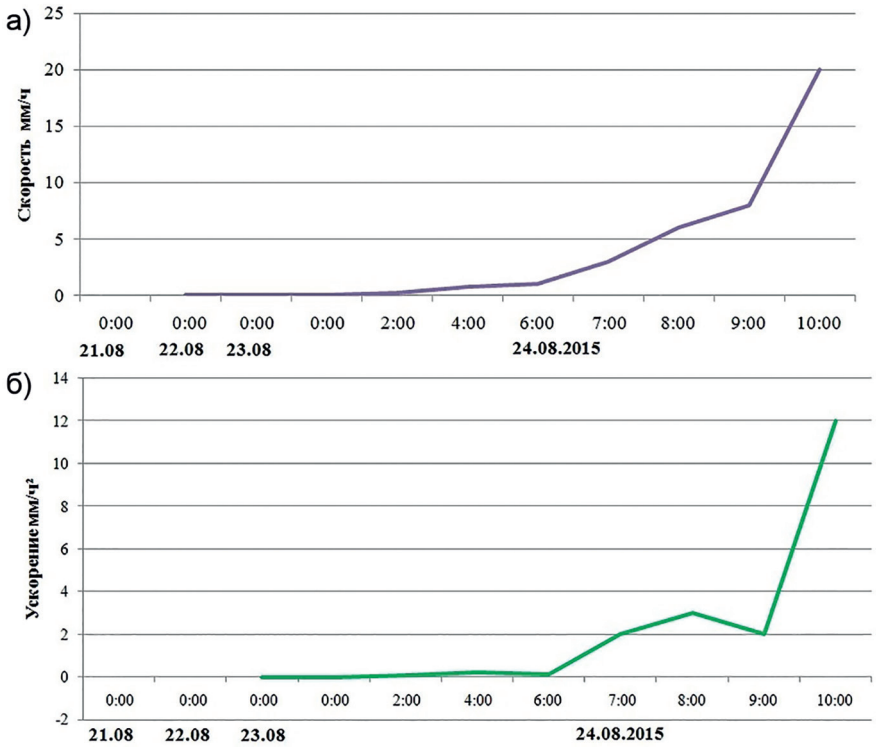

Рис. 2. Графики изменений скорости (а) и ускорения (б) смещений во времени (обрушение 24 августа 2015 г.)

Fig. 2. Graphs of changes in velocity (a) and acceleration (b) of displacements over time (August 24, 2015 failure)

лись значения скоростей и ускорений, строились соответствующие графики. В качестве примера на рис. 2 приведены графики скоростей и ускорений смещений для обрушения, произошедшего 24 августа 2015 г.

По данным, приведенным на рис. 2, видно, что резкое увеличение значений ускорения и скорости произошло около 7 ч 24 августа. Ускорение увеличилось с 0,13 мм/ч^2 до 2 мм/ч^2, а скорость от 1 мм/ч до 3 мм/ч. После этого скорость развития процесса продолжала возрастать до момента обрушения, которое наступило через 4 ч.

Сопоставляя данные об обрушении 24 августа 2015 г. с другими случаями потери устойчивости, зафиксированные радаром IBIS FM, был сделан вывод о том, что в качестве основного параметра деформирования необходимо выбрать скорость смещения массива. Также было определено, что для выявления и дальнейшего наблюдения за деформациями целесообразно выставить три пороговых значения по скорости смещений (1, 2 и 3 мм/ч), причем скорость 3 мм/ч можно было предварительно считать критическим параметром деформирования массива, после превышения которого происходит обрушение.

После определения предварительной критической скорости деформирования ее достоверность необходимо было проверить на других обрушениях, которые произошли в условиях Ковдорского месторождения.

За период с октября 2018 г. по ноябрь 2019 г. было зафиксировано 5 случаев потери устойчивости участков борта ка-

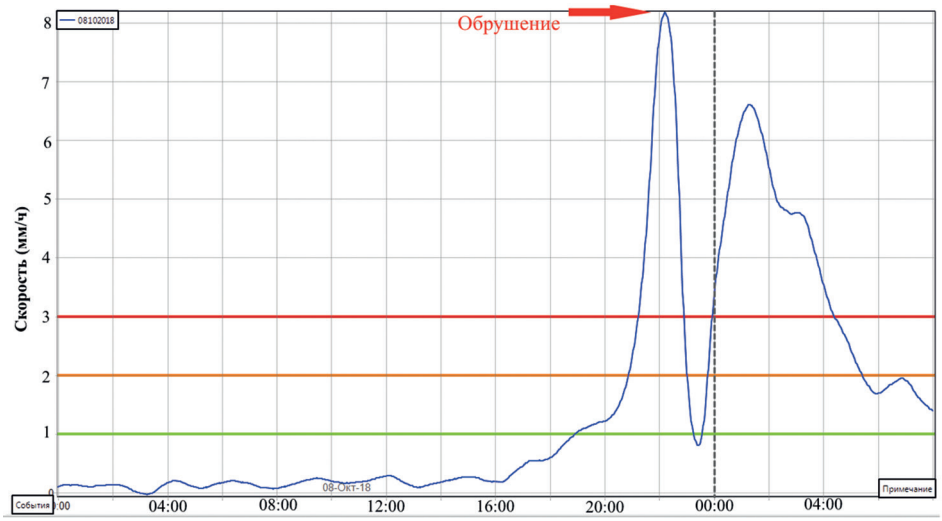

Рис. 3. График скорости смещения массива 08.10.2018 с выставленными предельными значениями
Fig. 3. The graph of the rock mass displacement velocity (08.10.2018) with the exposed limit values

рьера: из них три случая представляют собой локальные обрушения в массиве скальных пород; два обрушения представляют собой оползни, произошедшие в грунтовом массиве. Практически все случаи потери устойчивости имели объем 100 м^3 и менее.

Для уточнения критических значений скоростей перемещений совместно со специалистами Geological Survey of Finland (GTK) были проанализированы наиболее характерные обрушения различного масштабного уровня в условиях скальных массивов горных пород [20].

Первый случай произошел 8 октября. Процесс деформирования от начала и до момента потери устойчивости со-

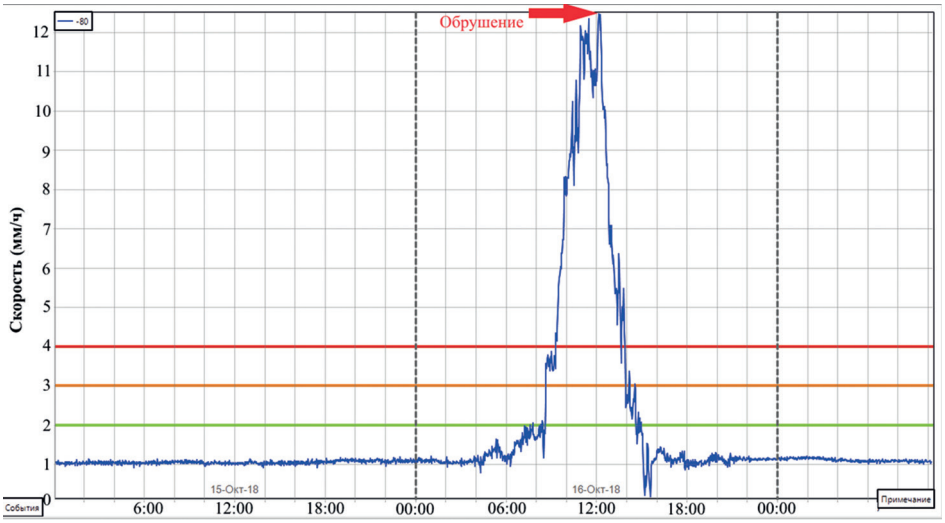

Рис. 4. График скорости смещения массива 16.10.2018 с выставленными предельными значениями
Fig. 4. The graph of the rock mass displacement velocity (16.10.2018) with the exposed limit values

ставил приблизительно 21 ч. Предельное зафиксированное смещение области составило 20 мм. На рис. 3 приведен график скорости развития процесса деформирования во времени с отмеченными предварительными критическими значениями по скорости. Обрушение произошло через, приблизительно, 1 ч после превышения установленной критической скорости 3 мм/ч.

Второй случай произошел 16 октября. Процесс деформирования до момента обрушения составил приблизительно 30 ч. Предельное зафиксированное смещение области составило 42 мм.

На рис. 4 приведен график скорости развития процесса деформирования во времени с отмеченными предельными значениями по скорости. Предупреждение сработало около 9 ч утра, то есть за 3 ч до обрушения, произошедшего в 12 ч.

Третье обрушение произошло 17 октября (рис. 5). Процесс деформирования и последующего разрушения происходил в массиве слабых и дезинтегрированных пород. Предельное смещение составило 350 мм. Процесс деформирования до момента основного обрушения составил приблизительно 24 ч. Время от превышения предельной скорости и до момента основного обрушения составило приблизительно 20 ч. На графике также видно, что процесс деформирования продолжался еще 10 дней после обрушения и на этом участке наблюдались незначительные осыпи.

Из приведенных выше графиков скорости видно, что во всех случаях после превышения критической скорости в 3 мм/ч через определенные моменты времени происходит обрушение участка массива. На сегодняшний день не было случаев, когда смещающийся участок массива при превышении скорости в 3 мм/ч не обрушался бы, а замедлял скорость своего движения. Однако из графиков на рис. 3 и 4 видно, что процесс деформирования разделен на этапы, которые характеризуются своими скоростями.

На рис. 6 и 7 показаны графики скорости смещения массива для обрушений, которые произошли 08.10.2018 и

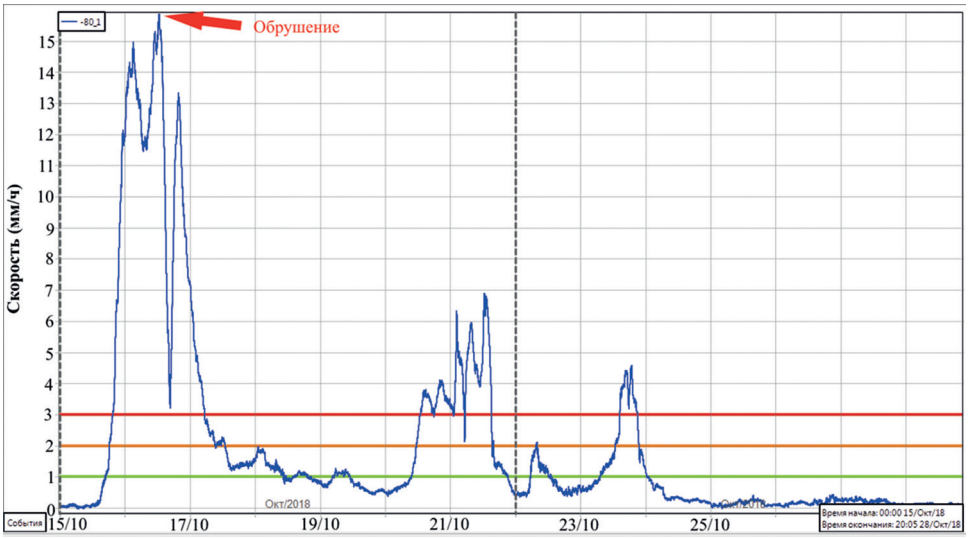

Рис. 5. График скорости смещения массива 17.10.2018 с выставленными предельными значениями
Fig. 5. The graph of the rock mass displacement velocity (17.10.2018) with the exposed limit values

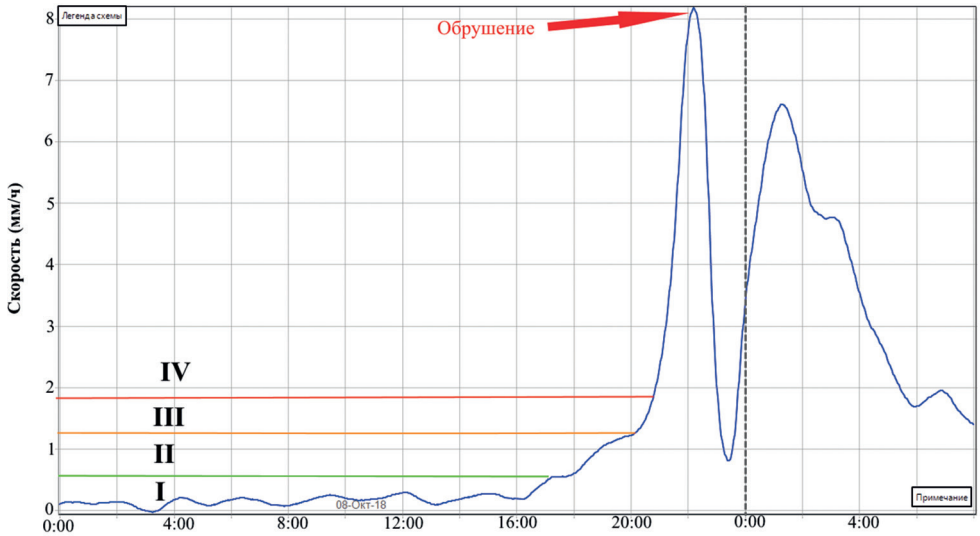

Рис. 6. График скорости смещения массива 08.10.2018 с этапами деформирования
Fig. 6. The graph of the rock mass displacement velocity (08.10.2018) with the deformation stages

16.10.2018 с этапами развития процессов деформирования и разрушения.

Первый этап характеризуется увеличением скорости до 0,5 мм/ч и дальнейшим развитием процесса деформирования с постоянной скоростью. Второй этап — увеличение скорости от 0,5 до 1,3 мм/ч. На третьем этапе скорость возрастает до 1,8 мм/ч. Четвертый этап характеризуется резким увеличением скорости и заканчивается в момент обрушения.

На втором графике также выделяется 4 этапа. Первый этап характеризует-

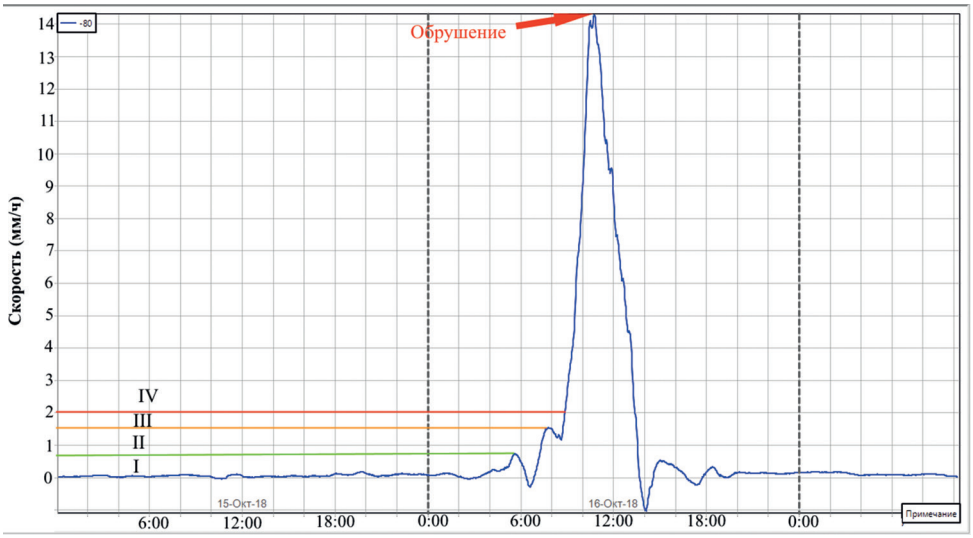

Рис. 7. График скорости смещения массива 16.10.2018 с этапами деформирования
Fig. 7. The graph of the rock mass displacement velocity (17.10.2018) with the deformation stages

ся увеличением скорости до 0,8 мм/ч. На втором этапе происходит сначала снижение скорости практически до 0, а после этого заметное увеличение скорости до 1,5 мм/ч. На третьем этапе скорость также уменьшается до 1,1 мм/ч, а затем практически мгновенно увеличивается до 2 мм/ч. На четвертом этапе скорость продолжает увеличиваться до момента обрушения.

Учитывая данные о случаях потери устойчивости, произошедших 8 и 16 октября 2018 г., было определено, что значение критической скорости 3 мм/ч является достоверным, однако при настройке системы оповещения целесообразнее выставлять критическую скорость смещения массива — 2 мм/ч. Это позволит раньше предупредить оператора об опасности и даст больше времени на эвакуацию рабочего персонала.

Выводы

Опыт проведения работ по мониторингу устойчивости борта карьера «Железный» свидетельствует о том, что радарные системы — эффективный метод локального мониторинга на сегодняшний день.

В результате совместной работы специалистов Горного института КНЦ РАН, ООО «Гексагон Геосистемс Рус» и сотрудников геомеханической службы «АО Ковдорский ГОК» были выявлены закономерности развития процесса деформирования и разрушения массива скальных пород Ковдорского месторождения, определено критическое значение скорости смещения, что послужило основой при настройке системы оповещения персонала при выявлении участков смещения массива.

Проанализированные данные и имеющийся опыт позволили составить две инструкции для персонала геомеханической службы, в которых указываются мероприятия, обеспечивающие эффективную работу данной технологии, порядок действий для обнаружения участков массива с потенциально опасными деформациями и действия персонала при подаче сигналов тревоги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козырев А. А., Савченко С. Н., Панин В. И., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Федотова Ю. В., Козырев С. А.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками: Монография. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН. — 2019. — 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

2. *Рыбин В. В.* Развитие теории геомеханического обоснования рациональных конструкций бортов карьеров в скальных тектонически напряженных породах. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Апатиты, 2016. — 41 с.

3. *Харисов Т. Ф., Харисова О. Д., Ефремов Е. Ю., Коновалова Ю. П.* Исследование устойчивости бортов и уступов карьера Киембаевского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. — 2018. — № 5. — С. 30—39. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-5-30-39.

4. *Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S.* Dam safety: the question of tailings dams // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 1—26. DOI: 10.47260/jesge/1111.

5. *Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S.* Dam safety and dams hazards // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 10, no. 6, pp. 23—40.

6. *Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A.* Integrated monitoring of engineering structures in mining // Eurasian Mining. 2018, no. 2, pp. 18—21.

7. *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 // Горная промышленность. — 2020. — № 3. — С. 84—90. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90.

8. *Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Бадтиев Б. П., Павлович А. А.* Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере михайловского ГОКа // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 120—126. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-120-126.

9. *Dyke G. P.* Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali—a case study / World Gold Conference 2009. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009, pp. 169—176.

10. *Severin E., Eberhardt S., Stewart N. A.* Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations / Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Toronto, 2009 pp. 214—225.

11. *Ramsden F., Coli N., Benedetti A. I., Falomi A., Leoni L., Michelini A.* Effective use of slope monitoring radar to predict a slope failure at Jwaneng Mine, Botswana / Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015, pp. 162—179.

12. *Hutchison B. J., Naude S., Howarth J.* Management of a toppling failure wall collapse at the Kanmantoo Coper Mine in South Australia / Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015, pp. 81—98.

13. *Mitri H., Vennes I.* Rock slope surface monitoring technologies with focus on ground-based synthetic aperture radar / Proceedings Mine Planning and Equipment Selection. Switzerland, 2014, pp. 1251—1263.

14. *Pieraccini M.* Real Beam vs. Synthetic aperture radar for slope monitoring / Proceedings Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. Stockholm, Sweden, 2013, pp. 1627—1632.

15. *Atzeni C., Barla M., Pieraccini F., Antolini A.* Early warning monitoring of natural and engineered slopes with ground based sythetic aperture radar // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015, vol 48, no. 1, pp. 235—246. DOI: 10.1007/s00603-014-0554-4.

16. *Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Ricci P.* IBIS-M, innovative radar for monitoring slopes in open-pit mines / Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. Vancouver, Canada, 2011, pp. 1625—1639.

17. *Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Coli N., Helbawi A.* Monitoring open pit slopes through slope monitoring radar based on synthetic aperture radar / Proceedings RockEng 2012 21st Canadian Rock Mechanics Symposium. Edmonton (AB), Canada, 2012, pp. 1452—1465.

18. *Farina P., Coli N., Yon R., Eken G., Ketizmen H.* Efficient real time stability monitoring of mine walls: the Çöllolar Mine case study / Proceedings of 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey. Antalya, Turkey, 2013, pp. 111—117.

19. *Розанов И. Ю., Завьялов А. А.* Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 7. — С. 40—46. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46.

20. *Rozanov I., Zavialov A.* Determination of critical deformation and destruction parameters of the zhelezny open pit rock mass (JSC Kovdorsky GOK) based on IBIS FM ground radar data / Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, 2019, pp. 387—393. DOI: 10.1007/978-3-030-31970-0_41. ГИАБ

REFERENCES

1. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V., Fedotova Yu. V., Kozyrev S. A. *Geomekhanicheskie protsessy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami*: Monografiya [Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and management of geodynamic risks], Apatity, FITs KNTs RAN. 2019, 431 p. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

2. Rybin V. V. *Razvitie teorii geomekhanicheskogo obosnovaniya ratsional'nykh konstruktsiy bortov kar'erov v skal'nykh tektonicheski napryazhennykh porodakh* [Development of the theory of geomechanical substantiation of rational designs of open pit walls in tectonically stressed rocks], Candidate's thesis, Apatity, 2016, 41 p.

3. Kharisov T. F., Kharisova O. D., Efremov E. Yu., Konovalova Yu. P. Reserch of stability of endges and benches of thr Kiyembayevsry field open-pit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 30 — 39. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-5-30-39.

4. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety: the question of tailings dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 1 — 26. DOI: 10.47260/jesge/1111.

5. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam safety and dams hazards. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 10, no. 6, pp. 23 — 40.

6. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018, no. 2, pp. 18 — 21.

7. Ismagilov R. I., Zakharov A. G., Badtiev B. P., Senin N. V., Pavlovich A. A., Sviridenko A. S. Use (testing experience) of a ground-based radar at the construction site of a steeply inclined conveyor complex at the southern pit of Mikhailovsky GOK. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 3, pp. 84 — 90. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90.

8. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Badtiev B. P., Pavlovich A. A. Introduction of safety monitoring at the construction site of high-angle conveyor in Yuzhny open pit mine of Mikhailovsky GOK. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 1, pp. 120 — 126. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-120-126.

9. Dyke G. P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali — a case study. *World Gold Conference 2009*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009, pp. 169 — 176.

10. Severin E., Eberhardt S., Stewart N. A. Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations. *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium*. Toronto, 2009 pp. 214 — 225.

11. Ramsden F., Coli N., Benedetti A. I., Falomi A., Leoni L., Michelini A. Effective use of slope monitoring radar to predict a slope failure at Jwaneng Mine, Botswana. *Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015, pp. 162 — 179.

12. Hutchison B.. J., Naude S., Howarth J. Management of a toppling failure wall collapse at the Kanmantoo Coper Mine in South Australia. *Proceedings of the 2015 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 2015, pp. 81 — 98.

13. Mitri H., Vennes I. Rock slope surface monitoring technologies with focus on ground-based synthetic aperture radar. *Proceedings Mine Planning and Equipment Selection*. Switzerland, 2014, pp. 1251 — 1263.

14. Pieraccini M. Real Beam vs. Synthetic aperture radar for slope monitoring. *Proceedings Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*. Stockholm, Sweden, 2013, pp. 1627 — 1632.

15. Atzeni C., Barla M., Pieraccini F., Antolini A. Early warning monitoring of natural and engineered slopes with ground based sythetic aperture radar. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015, vol 48, no. 1, pp. 235 — 246. DOI: 10.1007/s00603-014-0554-4.

16. Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Ricci P. IBIS-M, innovative radar for monitoring slopes in open-pit mines. *Proceedings, Slope Stability 2011: International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Vancouver, Canada, 2011, pp. 1625 — 1639.

17. Farina P., Leoni L., Babboni F., Coppi F., Mayer L., Coli N., Helbawi A. Monitoring open pit slopes through slope monitoring radar based on synthetic aperture radar. *Proceedings RockEng 2012 21st Canadian Rock Mechanics Symposium*. Edmonton (AB), Canada, 2012, pp. 1452 — 1465.

18. Farina P., Coli N., Yon R., Eken G., Ketizmen H. Efficient real time stability monitoring of mine walls: the Çöllolar Mine case study. *Proceedings of 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey*. Antalya, Turkey, 2013, pp. 111 — 117.

19. Rozanov I. Yu., Zavyalov A. A. Application of IBIS FM radar to pit wall monitoring at Zhelezny open pit mine of Kovdor Mining and Processing Plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 7, pp. 40 — 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46.

20. Rozanov I., Zavialov A. Determination of critical deformation and destruction parameters of the zhelezny open pit rock mass (JSC Kovdorsky GOK) based on IBIS FM ground radar data. *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, 2019, pp. 387 — 393. DOI: 10.1007/978-3-030-31970-0_41.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Розанов Иван Юрьевич — научный сотрудник,
Горный институт Кольского научного центра РАН,
e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0236-6749,
Ковалев Дмитрий Александрович — инженер,
ООО «Гексагон Геосистемс Рус»,
e-mail: dmitry.kovalev@geosystems.ru.
Для контактов: Розанов И.Ю., e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.Yu. Rozanov, Researcher, Mining Institute,
Kola Scientific Centre of Russian Academy
of Sciences, 184209, Apatity, Russia,
e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0236-6749,
D.A. Kovalev, Engineer,
JSC Hexagon Systems Rus, Moscow, Russia,
e-mail: dmitry.kovalev@geosystems.ru.
Corresponding author: I.Yu. Rozanov, e-mail: ivan-rozanov@yandex.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 22.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 22.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.