



Реализация многоуровневого комплексного мониторинга устойчивости бортов карьеров

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

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ i.rozanov@ksc.ru

Резюме: В настоящее время большое количество месторождений обрабатывается открытым способом. По мере развития горных работ увеличиваются как размеры карьеров в плане, так и их глубина. Чем интенсивнее проводятся горные работы, тем большее воздействие оказывается на окружающую среду, в том числе и на вмещающий массив горных пород. Это в свою очередь влияет на устойчивость отдельных уступов карьера и на борт карьера в целом. Для обеспечения безопасности ведения горных работ необходимо получать достоверную информацию об изменениях состояния массива горных пород, а также выявлять потенциально неустойчивые участки карьера. Эту информацию невозможно получить без организации комплексной системы геомеханического мониторинга состояния массива горных пород, которая должна учитывать как неоднородность массива горных пород, так и виды геомеханических процессов, происходящие в нем, а также масштабы области деформирования.

Достаточно активно сейчас применяются различные натурные методы мониторинга устойчивости бортов карьеров, охватывающие как отдельные уступы, группы уступов, так и борт карьера в целом, что в свою очередь также подразумевает и многоуровневость процесса мониторинга устойчивости элементов открытой геотехнологии. Такой подход к организации мониторинга предполагает рассмотрение борта карьера и слагающие его уступы как специфические инженерные сооружения, безопасным состоянием которых во многом определяется устойчивая эффективная работа всего горного предприятия. В качестве примера излагаемого подхода в статье приводится система комплексного мониторинга, организованная в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК».

Ключевые слова: открытые горные работы, карьер, комплексный мониторинг устойчивости уступов, деформирование массива горных пород, борт, откос, уступ, геотехнология

Для цитирования: Розанов И.Ю., Рыбин В.В., Константинов К.Н. Реализация многоуровневого комплексного мониторинга устойчивости бортов карьеров. *Горная промышленность*. 2023;(S1):135–141. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-135-141>

Implementation of multi-tier integrated monitoring of wall stability in open pit mines

I.Yu. Rozanov✉, V.V. Rybin, K.N. Konstantinov

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation
✉ i.rozanov@ksc.ru

Abstract: A large number of deposits are currently mined using the open-pit method. As mining progress, both the size and the depth of the pits increase. The more intensive the mining operations are, the greater the impact they have on the environment, including the host rock mass. This in turn affects the stability of both individual benches and the pit wall in general. In order to ensure the safety of mining operations it is necessary to obtain reliable information on changes in the condition of the rock mass and to identify potentially unstable areas of the open pit. It is impossible to obtain such information without an integrated system of geomechanical monitoring of the rock mass condition, which needs to take into account both heterogeneity of the rock mass and the types of geomechanical processes that take place inside it, as well as the scale of the deformation zone.

Various in-situ methods are currently used to monitor the stability of the pit walls, which cover both individual benches, groups of benches and the pit wall as a whole, which in turn also implies a multi-tier process of monitoring the stability of the elements of the open pit mining system. This approach to monitoring involves treating the pit wall and its benches as specific engineering structures which their safe condition largely determines the sustainable and efficient operation of the mining enterprise as a whole. This approach is exemplified in the article by the integrated monitoring system organized in the Zhelezny open pit mine of the Kovdorsky GOK JSC.

Keywords: open-pit mining, quarry, integrated monitoring of bench stability, rock mass deformation, wall, slope, bench, mining system

For citation: Rozanov I.Yu., Rybin V.V., Konstantinov K.N. Implementation of multi-tier integrated monitoring of wall stability in open pit mines. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):135–141. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-135-141>



Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом неизбежно вызывает преобразования геомеханического состояния геологической среды: от незначительных деформаций уступа или ряда уступов до существенных подвижек по границам структурных блоков, обширных оползней и техногенных землетрясений. В области влияния горных работ зачастую оказываются жилые и промышленные объекты, разрушение которых может привести к тяжелым последствиям, причем результаты техногенной деятельности сказываются не только в период эксплуатации горного предприятия, но и на протяжении длительного периода после его ликвидации.

Характерной особенностью условий разработки месторождений при открытых горных работах является достаточно высокая доля приповерхностных, большей частью слабых слоёв пород, часто по своим свойствам приближающихся к грунтовым массивам. 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. Кроме того, грунтовые массивы и массивы скальных пород различаются по формам проявления геомеханических процессов. Если в грунтовых массивах это в основном оползни, то в массивах скальных пород наблюдаются вывалы различных типов в масштабе одного или нескольких уступов.

Для проведения необходимых мероприятий по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьера необходимо получать достоверную информацию об изменениях состояния массива горных пород, а также выявлять потенциально неустойчивые участки карьера. Эту информацию невозможно получить без организации комплексной системы геомеханического мониторинга состояния массива горных пород, которая должна учитывать как неоднородность массива горных пород, так и виды геомеханических процессов, происходящие в нем, а также масштабы области деформирования.

Объект исследования

Ковдорское комплексное бадделеит-апатит-магнетитовое месторождение открыто в 1933 г., а в 1962 г. вступил в строй Ковдорский горно-обогатительный комбинат, выпустивший сначала только магнетитовый концентрат.

Ввиду того что физико-механические свойства пород тесно связаны с их петрографическими особенностями, все геологические образования Ковдорского месторождения специалистами ФГУП «Институт ВИОГЕМ» разделены на 6 литотипов: метаморфиты; гипербазиты; щелочные породы; апатит-силикатно-магнетитовые руды; апатит-карбонатно-магнетитовые руды и карбонатиты; породы зоны дезинтеграции.

Все литотипы, исключая последний, относятся к прочным или очень прочным породам, хотя гипогенные изменения пород заметно снижают их прочность. Только в зоне интенсивной дезинтеграции преобладают скальные грунты средней прочности, малопрочные и полускальные, а также рыхлые грунты, в совокупности образующие шестой литотип [1].

В настоящее время рудник «Железный» разрабатывает комплексные бадделеит-апатит-магнетитовые и мало-железистые апатитовые руды, а также осваивает место-

рождение франколитовых (апатит-штаффелитовых) руд и карбонатитов. Кроме того, с 1995 г. разрабатывается техногенное месторождение отходов обогатительного производства, которые содержат промышленные концентрации апатита и бадделеита [2]. За прошедшие с начала эксплуатации десятилетия карьер достиг глубины более 600 м от максимальных превышений первоначального рельефа.

В пределах карьера «Железный» наблюдаются следующие виды разрушений [2]: вывалы и осыпи трещиноватых и дезинтегрированных пород, оползни-обрушения, клиновидные (призматические) обрушения, плоскостные обрушения, комбинированные.

Первая группа является наиболее часто встречающейся и наименее опасной с точки зрения обеспечения устойчивости уступов и борта карьера. Ее появление определяют наличие участков интенсивной трещиноватости и/или недостаточно качественная технология постановки уступов на конечный контур.

Оползневые явления развиваются преимущественно в зоне приповерхностной дезинтеграции скальных пород верхней части карьера (до 100–120 м от поверхности). В их формировании активное участие принимают поверхностные и подземные воды. Процесс деформирования развивается длительное время, иногда месяцами, и может захватывать огромные объемы массива. Перемещения, предшествующие обрушению, могут достигать десятков метров.

Деформации типа клиновидных (призматических) обрушений образуются за счет взаимного подсечения двух и более поверхностей ослабления (трещины, разрывные нарушения, разломы), линия скрещения которых наклонена в сторону карьерной выемки. Призма обрушения, ограниченная этими поверхностями и откосом уступа, имеет форму клина. Развитие масштабной деформации этого типа представляет реальную опасность для устойчивости уступа или группы (2–3) уступов.

Плоскостное обрушение – это смещение пород по наклонной, в сторону карьерной выемки, поверхности, образованной трещиной, субпараллельной или близкой по простиранию откосу. Это наиболее опасный вид обрушения, так как может вызвать нарушение устойчивости не только уступа (группы уступов), но и всего борта.

Стоит отметить, что в случае обрушения клинового или плоскостного типа предшествующий процесс деформирования массива визуально малозаметен. Предшествующие перемещения массива достигают значений от десятой доли миллиметра до нескольких сантиметров. Период от начала деформирования массива и до обрушения может укладываться в 2–3 ч.

Комплексный многоуровневый подход к мониторингу карьера «Железный»

Для условий карьера «Железный» мониторинг должен учитывать иерархично-блочное строение массива горных пород, виды разрушений и масштабы обрушающихся участков борта, а следовательно, и иметь иерархичную структуру, в частности, его региональный и локальный уровни.

В задачи регионального мониторинга входит [3]:

- наблюдение за процессами деформирования массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение;
- районирование карьера на отдельные участки по выявленному характеру процесса деформирования массива;



– выявление участков борта карьера, потенциально опасных с точки зрения устойчивости.

В задачи локального мониторинга входит [3]:

- наблюдение за выявленными потенциально опасными участками деформирования массива горных пород;
- контроль состояния потенциально опасного участка;
- прогнозирование развития процессов обрушения;
- анализ причин, характера и параметров деформаций и обрушений пород.

Для наблюдений за процессами деформирования массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение, а также выявления участков борта карьера, потенциально опасных с точки зрения устойчивости, одними из наиболее эффективных являются методы спутниковой геодезии, использующие в основном наиболее развитые в настоящее время системы GPS и ГЛОНАСС. В настоящее время методы спутниковой геодезии широко применяются на зарубежных [4–6] и российских [7; 8] месторождениях полезных ископаемых, обрабатываемых открытым способом, в том числе и в карьере «Железный». На рис. 1 представлена схема расположения фундаментальных пунктов и результаты многолетних GPS-измерений [9], где стрелками показаны направления смещений каждого фундаментального пункта и их абсолютные значения, представленные в виде векторов различной длины. Максимальные значения смещений были зафиксированы на пунктах 295Б и VI и составляли 0,1387 м и 0,0883 м соответственно.



Рис. 1
Схема расположения фундаментальных пунктов в карьере «Железный» и результаты многолетних GPS-измерений

Fig. 1
Map of the permanent bench mark locations in the Zhelezny open pit mine and results of multi-year GPS measurements

Полученные результаты позволили условно районировать карьер по характеру наблюдаемых смещений на северный и южный участки. Вполне вероятно, что смещения, наблюдаемые на южном участке, могли оказать негативное влияние на устойчивость отдельных уступов и спровоцировать ряд обрушений на нижележащих горизонтах.

Для решения задач локального мониторинга в карьере «Железный» работает система радарного мониторинга устойчивости бортов карьеров, состоящая из 4 радаров (3 мобильных – IBIS ArcSAR и один стационарный – IBIS FM, рис. 2).

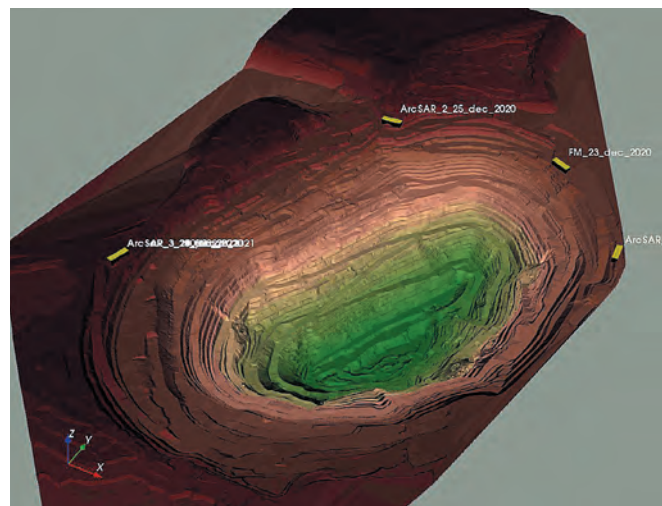


Рис. 2
Схема организации системы радарного мониторинга в карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК»

Fig. 2
Schematic map of the radar monitoring system in the Zhelezny open pit mine of the Kovdor GOK JSC

Стоит отметить, что подобные системы применяются уже больше 20 лет на многих зарубежных месторождениях, таких как «Geita» (Танзания) [10], в отработанном карьере «Palabora» (Южная Африка) [11], «Turtle Mountain» (Канада) [12] и многих других. АО «Ковдорский ГОК» является одним из первых предприятий в России, которые начали применять подобные технологии.

Радарная система мониторинга в карьере «Железный» уже зарекомендовала себя как высоко эффективный способ объявления предупреждения краткосрочной тревоги (первые часы), зафиксировала и предупредила о большом количестве локальных нарушений устойчивости в масштабе одного уступа и объемами, не превышающими 100 м³, а также несколько крупных обрушений групп уступов, одно из них объемом около 100 000 м³ (рис. 3) [13].

Анализ данных этого крупного обрушения позволил сделать первые выводы о критических значениях скорости смещения массивов, характерных для условий Ковдорского месторождения и других месторождений Мурманской области.

Указанные методы мониторинга – как локального, так и регионального, относятся к группе поверхностных методов, и если на региональном уровне, где фиксируются относительно медленные смещения массива (3–5 мм/год), этого вполне достаточно для своевременного реагирования на изменившиеся условия процесса деформирования,

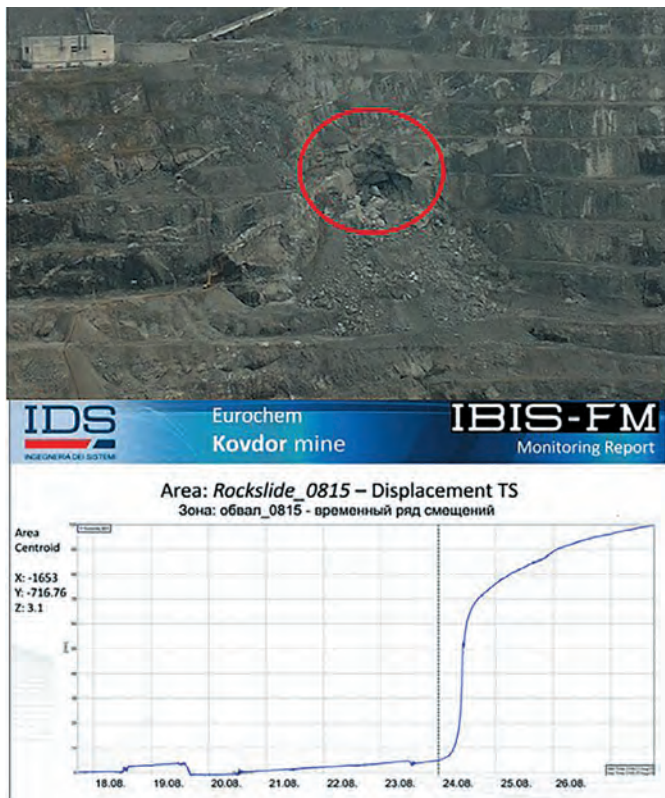


Рис. 3
Последствия обрушения
группы уступов в карьере
«Железный» АО «Ковдорский
ГОК» (верхний рисунок) и
зафиксированный рост
смещений во времени перед
обрушением (нижний рисунок)

Fig. 3
Consequences of a group of
benches failed in the Zhelezny
open pit mine of the
Kovdorsky GOK JSC (top) and
the recorded increase in
displacement over time before
the failure (bottom)

то на масштабном уровне 1–3-го уступов в условиях массива пород карьера «Железный», где процесс разрушения может длиться всего 2–3 ч, времени может хватить только на эвакуацию персонала. Для оценки состояния массива уступов борта, поставленных в конечное положение, особенно при размещении в карьере сооружений (например, насосных станций водоотлива или дробильно-конвейерных комплексов), необходимо применение так называемых глубинных методов мониторинга, таких как различные методы сейсмоакустического контроля (микросейсмомониторинг, сейсмический метод в вариантах профилирования и томографии, ультразвуковое профилирование), а также георадарное исследование массива [14; 15]. Кроме того, в карьере «Железный» практически ежегодно выполняются измерения напряжений в борте карьера. В результате проводимых измерений параметров НДС карьер был районирован по величинам действующих напряжений (рис. 4).

Микросейсмический мониторинг на сегодняшний день широко применяется на ряде предприятий, ведущих открытые горные работы в Австралии, Канаде, Намибии и ЮАР [16; 17]. Система микросейсмического мониторинга в карьере «Железный» функционирует с 2007 г. и решает главным образом задачу выявления предвестников развития деформаций в законтурном массиве пород карьера «Железный» с последующим выделением и детальным из-

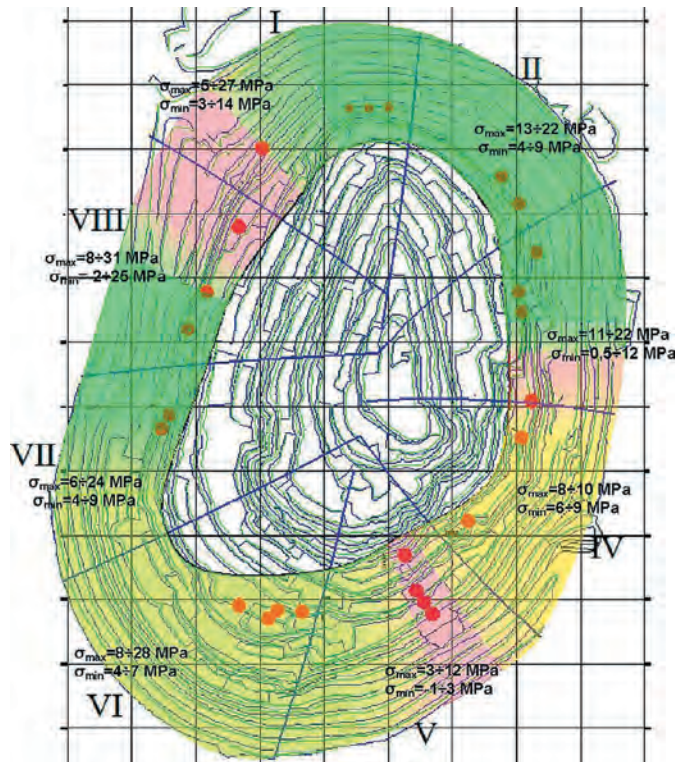


Рис. 4
Районирование карьера
рудника «Железный» по
величинам действующих
напряжений с учетом геолого-
структурных особенностей
строения массива горных
пород

Fig. 4
Zoning of the Zhelezny open
pit mine by the effective
stress values with account
for the geological and
structural features
of the rock mass

учением потенциально неблагоприятных участков с точки зрения устойчивости борта [18]. 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 о напряженно-деформированном состоянии [19].

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, выявить высокопрочные и ослабленные участки не только на контуре выработки, но и в глубине массива. Таким образом, 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 [20], а с 2014 г. с развитием технических средств геоконтроля, – в варианте томографии [21].

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 ведения горных работ [22].

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 состоя-

ния 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.

Заключение

Предлагаемый подход к организации многоуровневой комплексной системы мониторинга устойчивости прибортового массива пород в карьере «Железный» базируется, с одной стороны, на учёте свойств и состояния массива, с другой стороны, на учёте масштабного уровня контролируемых объектов. Такой подход в полной мере соответствует представлениям об иерархично-блочном строении массива пород, в пределах которого ведутся горные работы открытым способом и формируется карьерная выемка. Кроме того, система мониторинга локальных участков учитывает также временной фактор, который особенно важен при постановке уступов карьера в конечное положение, а также при размещении в карьере сооружений различного назначения.

Список литературы

1. Дунаев В.А., Серый С.С., Герасимов А.В., Журин С.Н., Быховец А.Н., Славский Б.В. Геолого-структурное картирование Ковдорского месторождения для решения геомеханических и горно-эксплуатационных задач с применением компьютерных технологий. *Горный журнал*. 1998;(4):41–46.
2. Завьялов А.А. Мониторинг бортов и уступов карьера рудника Железный ОАО «Ковдорский ГОК» в целях долгосрочного прогноза их устойчивости. В кн.: *Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы 2-й молодежной школы семинара, г. Москва, 17–21 октября 2011 г.* М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН; 2011. Т. 1. С. 110–117.
3. Rozanov I.Yu., Zavyalov A.A. Specifics in organization of the slope stability monitoring in high-strength hard rock massifs of the Kovdor deposit. In: *Topical issues of rational use of natural resources 2019*. CRC Press; 2019. Vol. 1, pp. 229–234. <https://doi.org/10.1201/9781003014577-29>
4. Sakurai S., Shimizu N. Monitoring the stability of slopes by GPS. In: *International symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering*. SAIMM; 2007, pp. 353–359. Available at: http://www.saimm.co.za/Conferences/RockSlopes/353-360_Sakurai.pdf
5. Kim D. (Don), Langley R.B., Bond J., Chrzanowski A. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: Initial study. *GPS Solutions*. 2003;7(3):176–185. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0075-1>
6. Zahariadis H., Tsakiri M. Low cost monitoring system in the open pit lignite mines of Megalopoli, Greece. In: *3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22–24, 2006*. Available at: <https://vdocuments.site/low-cost-monitoring-system-in-the-open-pit-lignite-low-cost-monitoring-system-in.html?page=1>
7. Романько Е.А., Ковырзин К.Л. Организация маркшейдерских наблюдений за деформациями на месторождении Юбилейное ООО «Башкирская медь». *Маркшейдерский вестник*. 2014;(4):22–24.
8. Спирин В.И. Принципы организации инструментальных наблюдений за деформационными процессами, протекающими в прибортовых массивах карьера «Восточный» Олимпиадинского ГОКа. В кн.: Глебов А.В., Журавлев А.Г. (ред.) *Проблемы недропользования: материалы 6-й Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (с участием иностранных ученых), г. Екатеринбург, 8–10 февраля 2012 г.* Екатеринбург: Ин-т горного дела УрО РАН; 2012. С. 529–540.
9. Розанов И.Ю., Достовалов Р.Н., Кузнецов М.А. Опыт применения GNSS и светодальномерных наблюдений для изучения деформаций массива горных пород в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(S56):183–191. Режим доступа: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/12487/p30.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Dyke G.P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali—a case study. In: *World Gold Conference 2009*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009, pp. 169–176.
11. Severin J., Eberhardt E., Ngidi S., Stewart A. Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations. In: Diederichs M., Grasselli G. (eds) *ROCKEN09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009*. Available at: <https://geogroup.utoronto.ca/wp-content/uploads/RockEng09/PDF/Session17/3914%20PAPER.pdf>
12. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Y. A multilevel approach to pitwall stability monitoring. *Journal of Mining Science*. 2021;57(5):805–811. <https://doi.org/10.1134/S1062739121050100>
13. 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):40–46. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46>
14. Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015;(6):73–78.
15. Дьяков А.Ю., Калашник А.И. *Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов*. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН; 2021. 110 с. Режим доступа: https://rio.ksc.ru/data/documents/2_d-jakov_kalashnik_2021.pdf
16. Wesseloo J., Sweby G.J. Microseismic monitoring of hard rock mine slopes. In: Potvin Y., Carter J., Dyskin A., Jeffrey R. (eds) *SHIRMS 2008: Proceedings of the first southern hemisphere international rock mechanics symposium*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2008, pp. 433–450. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/808_179
17. Lynch R.A., Wuite R., Smith B.S., Cichowicz A. Microseismic monitoring of open pit slopes. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds) *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in mines proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2005, pp. 581–592. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_65
18. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Chernobrov D.S. Results related Pit wall Microseismic Monitoring (“Zhelezny” mine, Kovdorsky GOK, JSC). In: *Proceedings of 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in mines*. Perm. Mining Institute of RAS; 2013, pp. 501–505.
19. Rybin V.V., Panin V.I., Kagan M.M., Konstantinov K.N. Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits. In: Litvinenko V.S. (ed.) *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium, St. Petersburg, May 22–26, 2018*. London, UK: Taylor & Francis Group; 2018. Vol. 1, pp. 551–556.
20. Каспарьян Э.В., Рыбин В.В., Старцев Ю.А. Применение сейсмотомографических исследований для геомеханического мониторинга участка борта карьера. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2011;(3):30–33.
21. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines. *Eurasian Mining*. 2019;(2):23–26. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.05>
22. Рыбин В.В., Калюжный А.С., Константинов К.Н., Старцев Ю.А., Потапов Д.А., Панин В.И. Результаты определения параметров деструкции борта карьера комплексом геофизических методов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(4):113–118. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2015/04/15_113-118_Ribin.pdf?ysclid=ldwxek6wh8108364395

References

1. Dunaev V.A., Seryi S.S., Gerasimov A.V., Zhurin S.N., Bykhovets A.N., Slavskii B.V. Geological and structural mapping of the Kovdorskoye deposit to resolve geomechanical and mining engineering problems using computer technologies. *Gornyi zhurnal*. 1998;(4):41–46. (In Russ.)
2. Zavyalov A.A. Monitoring of the walls and benches of the Zhelezny open pit mine of the Kovdorsky GOK JSC for long-term forecasting of their stability. In: *Modern Tectonophysics. Methods and findings: Proceedings of the 2nd Youth Workshop School, Moscow, October 17–21, 2011*. Moscow: Institute of Physics of the Earth. O.Yu. Schmidt RAS; 2011. Vol. 1, pp. 110–117. (In Russ.)
3. Rozanov I.Yu., Zavyalov A.A. Specifics in organization of the slope stability monitoring in high-strength hard rock massif of the Kovdor deposit. In: *Topical issues of rational use of natural resources 2019*. CRC Press; 2019. Vol. 1, pp. 229–234. <https://doi.org/10.1201/9781003014577-29>
4. Sakurai S., Shimizu N. Monitoring the stability of slopes by GPS. In: *International symposium on stability of rock slopes in open pit mining and civil engineering*. SAIMM; 2007, pp. 353–359. Available at: http://www.saimm.co.za/Conferences/RockSlopes/353-360_Sakurai.pdf
5. Kim D. (Don), Langley R.B., Bond J., Chrzanowski A. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: Initial study. *GPS Solutions*. 2003;7(3):176–185. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0075-1>
6. Zahariadis H., Tsakiri M. Low cost monitoring system in the open pit lignite mines of Megalopoli, Greece. In: *3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22–24, 2006*. Available at: <https://vdocuments.site/low-cost-monitoring-system-in-the-open-pit-lignite-low-cost-monitoring-system-in.html?page=1>
7. Romanko E.A., Kovyrzin K.L. Organization of instrumental observations of deformations at the Yubileynoe deposit of the Bashkirkaya Med' LLC. *Mine Surveying Bulletin*. 2014;(4):22–24. (In Russ.)
8. Spirin V.I. Principles of organizing instrumental observation of deformation processes in the near-wall rock masses of the Vostochny open pit mine of the Olimpiadinsky mining and processing plant. In: Glebov A.V., Zhuravlev A.G. (eds) *Issues of subsoil use: Proceedings of the 6th All-Russian Youth Scientific and Practical Conference (with participation of foreign researchers), Ekaterinburg, February 8–10, 2012*. Ekaterinburg: Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012, pp. 529–540. (In Russ.)
9. Rozanov I.Iu., Dostovalov R.N., Kuznetsov M.A. The experience of GNSS and optical distance observations application to study the rock mass deformation in the open pit of the “Zhelezny” mine, JSC “Kovdorsky GOK”. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(S56):183–191. (In Russ.) Available at: <https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/12487/p30.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
10. Dyke G.P. Best practice and new technology in open pit mining geotechnics: Geita gold mine, Mali—a case study. In: *World Gold Conference 2009*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009, pp. 169–176.
11. Severin J., Eberhardt E., Ngidi S., Stewart A. Importance of understanding 3-D kinematic controls in the review of displacement monitoring of deep open pits above underground mass mining operations. In: Diederichs M., Grasselli G. (eds) *ROCKEN09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009*. Available at: <https://geogroup.utoronto.ca/wp-content/uploads/RockEng09/PDF/Session17/3914%20PAPER.pdf>



12. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Y. A multilevel approach to pitwall stability monitoring. *Journal of Mining Science*. 2021;57(5):805–811. <https://doi.org/10.1134/S1062739121050100>
13. 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. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(7):40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-7-0-40-46>
14. Kalashnik A.I., Diakov A.Iu. Georadar research of geological-structural configuration of open pit working bench. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015;(6):73–78. (In Russ.)
15. Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. *Methodological bases of GPR investigations of mining facilities*. Apatity: Federal Research Center Kola Scientific Center of the RAS; 2021. 110 p. (In Russ.) Available at: https://rio.ksc.ru/data/documents/2_d-jakov_kalashnik_2021.pdf
16. Wesseloo J., Sweby G.J. Microseismic monitoring of hard rock mine slopes. In: Potvin Y., Carter J., Dyskin A., Jeffrey R. (eds) *SHIRMS 2008: Proceedings of the first southern hemisphere international rock mechanics symposium*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2008, pp. 433–450. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/808_179
17. Lynch R.A., Wuite R., Smith B.S., Cichowicz A. Microseismic monitoring of open pit slopes. In: Potvin Y., Hudyma M. (eds) *RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in mines proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2005, pp. 581–592. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/574_65
18. Kozyrev A.A., Kagan M.M., Chernobrov D.S. Results related Pit wall Microseismic Monitoring (“Zhelezny” mine, Kovdorsky GOK, JSC). In: *Proceedings of 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in mines*. Perm. Mining Institute of RAS; 2013, pp. 501–505.
19. Rybin V.V., Panin V.I., Kagan M.M., Konstantinov K.N. Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits. In: Litvinenko V.S. (ed.) *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium, St. Petersburg, May 22–26, 2018*. London, UK: Taylor & Francis Group; 2018. Vol. 1, pp. 551–556.
20. Kasparian E.V., Rybin V.V., Startsev Yu.A. Application of seismographic investigations for geomechanical monitoring of open pit wall selection. *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2011;(3):30–33. (In Russ.)
21. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kalyuzhny A.S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines. *Eurasian Mining*. 2019;(2):23–26. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.05>
22. Rybin V.V., Kaluzhniy A.S., Konstantinov K.N., Startsev Yu.A., Potapov D.A., Panin V.I. Results on detection of open-pit wall destruction parameters by complex of geophysical methods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(4):113–118. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2015/04/15_113-118_Ribin.pdf?ysclid=ldwxek6wh8108364395

Информация об авторах

Розанов Иван Юрьевич – научный сотрудник лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: i.rozanov@ksc.ru

Рыбин Вадим Вячеславович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: v.rybin@ksc.ru

Константинов Константин Николаевич – научный сотрудник лаборатории геомониторинга и устойчивости бортов карьеров, отдел геомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Information about the authors

Ivan Yu. Rozanov – Researcher, Laboratory of Geomonitoring and sustainability of pit walls, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: i.rozanov@ksc.ru

Vadim V. Rybin – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Chief of Laboratory of Geomonitoring and Sustainability of Pit Walls, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: v.rybin@ksc.ru

Konstantin N. Konstantinov – Researcher, Laboratory of Geomonitoring and Sustainability of Pit Walls, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: k.konstantinov@ksc.ru

Article info

Received: 21.01.2023

Revised: 07.02.2023

Accepted: 09.02.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.01.2023

Поступила после рецензирования: 07.02.2023

Принята к публикации: 09.02.2023