

PREDICTION OF ROCK MOVEMENTS USING A FINITE-DISCRETE ELEMENT METHOD

Pyasov Bulat, TERETAU LLC, CEO. PhD. 453800 Russia, Bashkortostan Republic, Khaibulla district, Akyar, 3 Veteranov lane. +7 (982) 635 6310. info@teretau.com

Makarov Alexander, SRK Consulting (Russia), Principal Geotechnical Consultant. PhD, Dr. Sc., Prof., ISRM. Russia 125009, Moscow, 4/3 Kuznetsky Most St. +7 (916) 612 44 93. abm51@mail.ru

Biryuchiov Ivan, SRK Consulting (Russia), Geotechnical Consultant. Russia 125009, Moscow, 4/3 Kuznetsky Most St. +7 (985) 338 73 81. ibiryuchiov@srk.ru.com

Keywords: fractured rock failure, disintegration and displacement, finite-discrete element method

Аннотация

Цель описанного в статье исследования – оценить возможность метода конечно-дискретных элементов для прогнозирования сдвижения горных пород при подземной разработке месторождений полезных ископаемых системами с обрушением. Выполнено сравнение измеренных и полученных моделированием характеристик деформационных процессов, происходивших при добыче полезных ископаемых на различных месторождениях. Описаны разработанные алгоритмы симуляции подэтажного и блокового самообрушения.

1. Введение

Прогнозирование сдвижения массива и земной поверхности при отработке системами с обрушением обычно основано на эмпирических методах (Brady, Brown, 2004), которыми невозможно учесть все геологические условия. Для этого необходимо моделировать процессы разрушения трещиноватого массива и дальнейшего поведения дезинтегрированной толщи: перемещения породных блоков в выработанном пространстве и зоне обрушения. Методы дискретных элементов обладают значительными потенциалом для решения задач с разрушением. Метод конечно-дискретных элементов является одним из наиболее продвинутых численных методов механики дискретной среды (Munjiza, 2004). Для выполнения геомеханических расчетов данным методом компанией Teretau разрабатывается программный комплекс Prorock. В его процессоре реализован алгоритм принудительной стабилизации с критерием прочности Кулона. В расчетах моделируется запредельное деформирование с дилатансией, изменчивость прочностных характеристик, тектонические нарушения и анизотропия прочностных свойств, пластическое деформирование конечных элементов. Для скорости вычисления выполняются на графических процессорах общего назначения (Pyasov, 2016). С помощью программы Prorock смоделировано сдвижение массива и земной поверхности при добыче системами с обрушением на рудниках Дегтярский (Россия), Риддер-Сокольный (Казахстан), Палабора (ЮАР).

2. Схема моделирования подэтажного и блокового самообрушения

Моделирование добычи с обрушением начинается только после наступления состояния покоя в модели при работе алгоритма принудительной стабилизации (Pyasov, 2016). Этим обеспечивается значительное снижение влияния инерционных колебаний системы, происходящих после запуска симуляции. После запуска моделирования экскавации происходит постепенное снижение модуля упругости, коэффициента Пуассона и сцепления пород обрабатываемого участка массива до величин, соответствующих разрушенному состоянию массива. Это необходимо для снижения вызываемых исключением элементов из расчетов нереалистичных динамических эффектов, заключающихся в высокоамплитудных колебаниях системы, которые вызывают обширные

разрушения вокруг области с исключенными элементами. Также одним из последствий исключения элементов из расчетов является значительное ускорение близлежащих не исключенных конечных элементов и, следовательно, неестественное увеличение объема разрушений в районе экскавации. Для снижения подобных эффектов разработан и внедрен в код программы алгоритм пластического деформирования конечных элементов (Pyasov, 2016), а также добавлена модель диссипативного удара (dissipative impact model) (Mahabadi, 2012). Снижение модуля упругости, коэффициента Пуассона и сцепления выполняется до выполнения любого из двух условий:

$$S_c/S_0 < 0.18 \quad n_{ts} > 7000$$

где S_c – текущая площадь элемента, S_0 – начальная площадь элемента, n_{ts} – количество шагов времени, пройденное с начала моделирования экскавации текущего участка. После выполнения условия хотя бы одним из элементов, все элементы исключаются из расчетов.

Для блокового самообрушения на первом этапе моделируется горизонт подрезки (undercut level) по той же схеме, что и при экскавации с подэтажным самообрушением. Далее для моделирования выпуска руды по мере ее обрушения производится изменение упругих свойств элементов, причем скорость изменения зависит от приведенного расстояния l_i/L_0 , где l_i – расстояние от центра элемента до основания горизонта подрезки. Величина L_0 рассчитывается в зависимости от среднего размера элемента в модели. При достижении модулем упругости величины 18% от начальной элемент исключается из расчетов. Данный предел найден опытным путем. На рисунке 1 приведена схема, поясняющая моделирование выпуска руды.

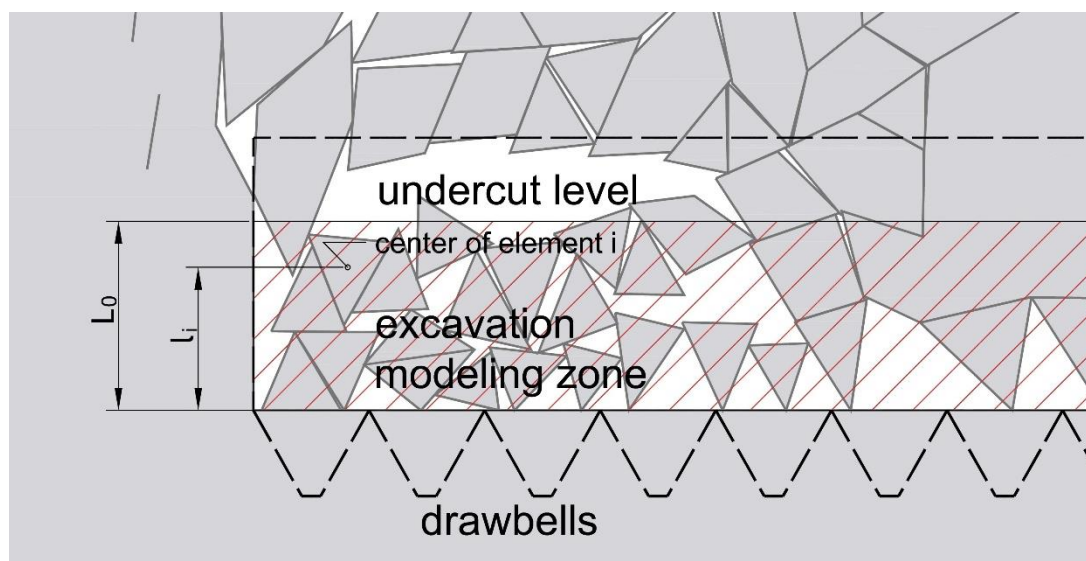


Рисунок 1 – Схема моделирования выпуска

Приведенная схема моделирования обеспечивает реалистичное моделирование отработки руды блоковым самообрушением и стабильную работу процессора. Следует однако добавить, что даже при такой схеме расчетов для минимизации происходящих из-за исключения элементов из расчетов неестественных разрушений элементов горизонта выпуска (production level) приходится в несколько раз завышать их прочностные свойства.

3. Case Study: Дегтярский рудник

Дегтярское месторождение меди (Россия, регион Урал) представляет собой крутопадающую пластообразную залежь мощностью 6÷25 м, отработано системой подэтажного обрушения. В ходе отработки выполнялись маркшейдерские наблюдения за сдвижением поверхности (Kuznetsov, 1971). Обрушение поверхности впервые произошло при отработке верхнего горизонта (выделен на

рисунке 2а). Этот факт использован для обратного расчета прочностных свойств массива. Принятые свойства массива представлены в таблице 1. На рисунках 2а, 2б представлены результаты моделирования по стадиям отработки.

Таблица 1 Свойства массивов Дегтярского месторождения

Породы	Объемный вес, т/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Прочность на разрыв, КПа
Сланцы	2.8	12	0.29	0.2	38	5
Руда	3.6	12	0.29	0.2	38	5

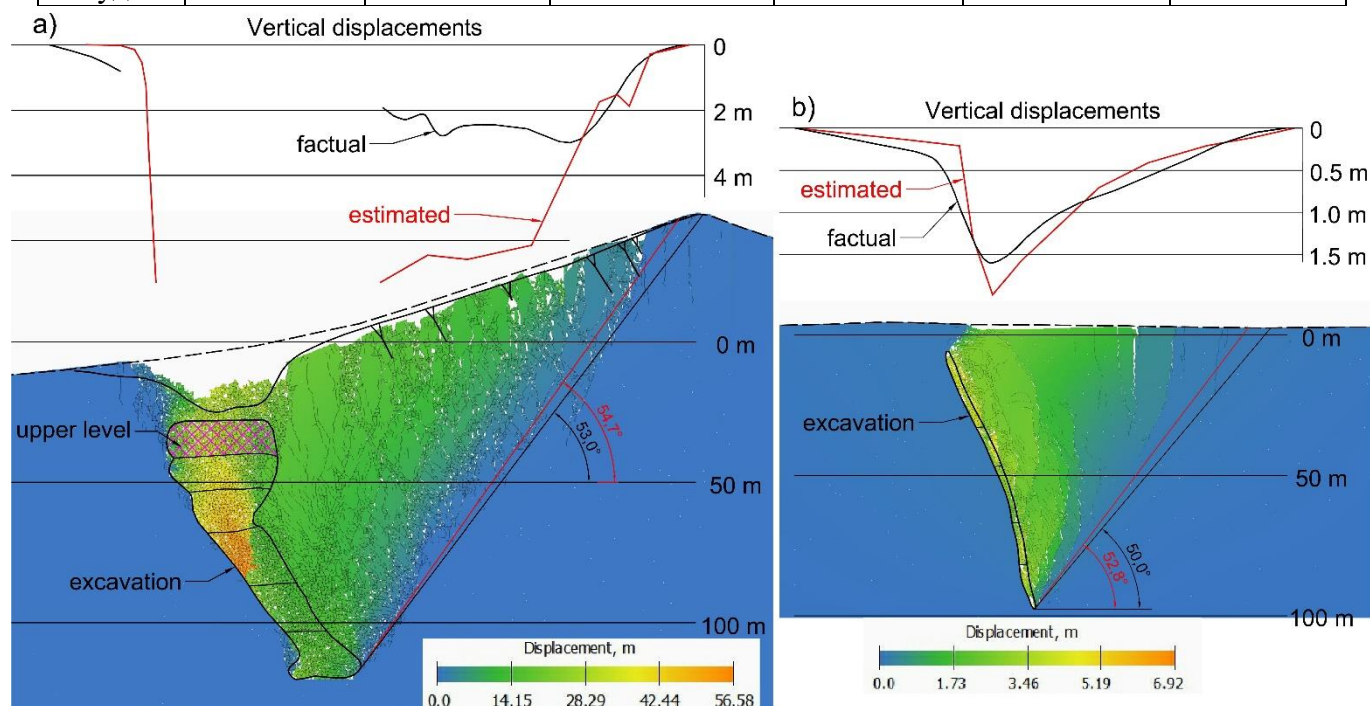


Рисунок 2 – Сдвигение пород на руднике Дегтярский : а) разрез 7, б) разрез 9.

Сдвигение земной поверхности по результатам моделирования близко к измеренному. Рассчитанные величины вертикальных смещений висячем боку местами больше измеренных на величину до 100%. По данным наблюдений горизонтальные смещения поверхности в 1,5-1,8 раз превышали вертикальные. По результатам моделирования их отношение изменяется в интервале от 1,3 до 1,9. Значительные отличия между рассчитанными и фактическими смещениями земной поверхности в лежащем боку объясняется наличием у поверхности разрушенных пород (Kuznetsov, 1971), которые не учтены при моделировании из-за их неизученности. По данным моделирования построены углы опасного влияния β , характеризующие границу зоны на земной поверхности с горизонтальными деформациями более 2 мм/м. Ошибка расчета по сравнению с фактом составила 1,7° и 2,8°.

По мнению Кузнецова М.А. (Kuznetsov, 1971) при большой мощности отработанной залежи сдвигение висячего бока происходило в виде расслоения и прогиба слоев сланцев с последующим обрушением блоками размерами 40÷60 м. Аналогичные характеристики процесса сдвигения получены в результате моделирования методом конечно-дискретных элементов с помощью программы Prorock.

4. Case Study: Риддер-Сокольный рудник

Риддер-Сокольное полиметаллическое месторождение (Казахстан) состоит из 10 тыс. отдельных рудных тел линзообразной формы. Обработка месторождения ведется системами обрушением. В таблице 2 представлены свойства массива по геомеханическим доменам, выделенным с применением статистического анализа. Величины сцепления получены обратным расчетом по факту образования провала на разрезе 5 (Рисунок 3а).

Таблица 2 Свойства массивов Риддер-Сокольного месторождения

Породы	Объемный вес, т/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Прочность на разрыв, КПа
алевропелиты, туфы	2.71	28.2	0.19	0.69	34	5
микрокварциты	2.72	39.6	0.2	1.14	34	5
сланцы	2.72	19.0	0.19	0.75	36	5
кварцевые породы	2.68	27.6	0.15	0.60	31	5
четвертичные грунты	2.00	0.05	0.3	0.20	20	1

SRK Consulting проанализировала факты провалов земной поверхности, которые произошли в результате обработки отдельных рудных тел системами с обрушением (Makarov, 2017). Рудные тела во всех проанализированных случаях имеют изометричную в плане форму.

На рисунках 3 а-с показаны результаты моделирования образования провалов. При расчетах учтены трещиноватость и тектонические нарушения, а также использован алгоритм учета горизонтальных тектонических напряжений.

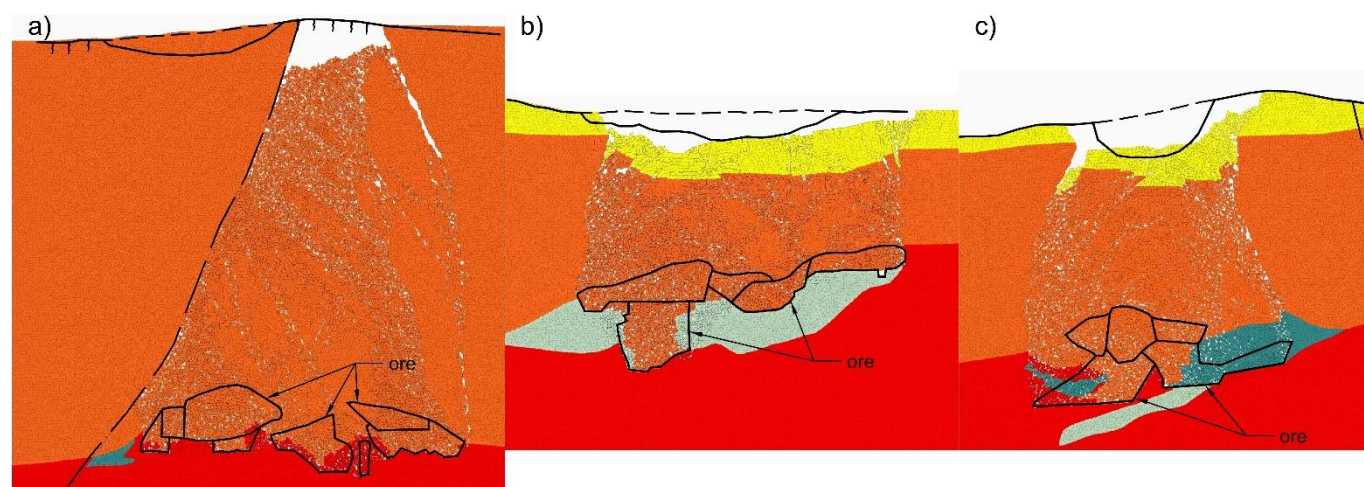


Рисунок 3 – Рассчитанные и фактические контуры провалов земной поверхности на Риддер-Сокольном руднике: а) разрез 5, б) разрез 3, с) разрез 5а.

Выполнено также моделирование зоны обрушения над одним из обработанных рудных тел. Фактические контуры зоны обрушения изучены бурением контрольных скважин. На рисунке 4 показаны контуры отработки и зоны разрушения по данным измерений в контрольных скважинах и по итогам симуляции. Кроме трещиноватости, учтено также влияние вышележащих выработок.

По итогам расчетов сделаны выводы, что при 2D моделировании отработки рудных тел изометричной формы размеры провалов определяются с достаточно большой погрешностью. Однако сам факт образования провала спрогнозировано верно во всех 6 моделях. Размеры зоны разрушений над протяженной очистной выемкой определены с ошибкой менее 40%.

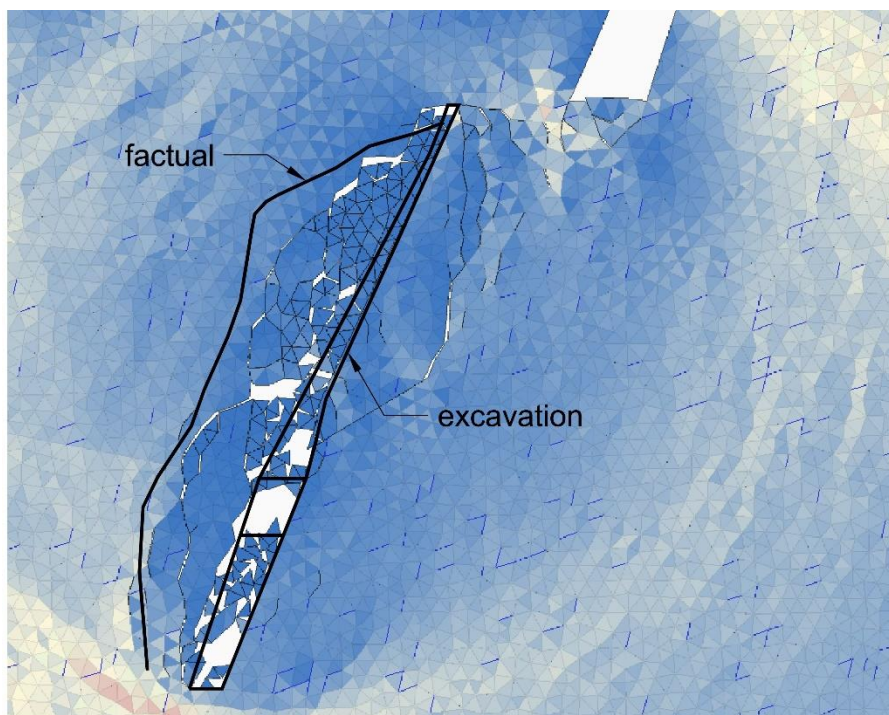


Рисунок 4 – Контуры зоны обрушения над очистной выработкой на Риддер-Сокольном руднике.

5. Case Study: рудник Палабора

Месторождение меди Палабора (ЮАР), отработано карьером до глубины 800 м, далее отработка месторождения ведется системой блокового самообрушения. Горизонт подсечки расположен на 400 м ниже дна карьера. В ходе подземной отработки месторождения в конце 2004 года произошло обрушение борта карьера. Известна динамика развития зоны разрушений над горизонтом выпуска (Severin, 2017). Также по открытым источникам восстановлено развитие разрушений борта карьера по годам. С использованием косвенных сведений о производительности рудника восстановлены примерные объемы добычи руды по годам, что позволило сопоставить объемы добычи и развитие разрушений под дном и в борту карьера. Свойства пород месторождения (таблица 3) приняты по данным (Sainsbury, 2016). Величины сцепления определены обратным расчетом, чтобы расчетный контур зоны разрушений на апрель 2003 года совпадал с фактическим. При расчетах учтены трещиноватость массива и тектонические нарушения по данным (Sainsbury, 2016).

Таблица 3 Свойства пород на месторождении Палабора

Породы	Объемный вес, т/м ³	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Прочность на разрыв, КПа
Carbonotite	2.88	39.7	0.21	2.18	45	58
Foskorite	3.53	38.4	0.21	2.00	43	43
Micoeous Pyroxenite	3.04	39.5	0.20	1.81	39	41
Feldspothic Pyroxenite	3.10	11.0	0.24	1.30	37	40
Fenite	3.10	44.7	0.23	2.69	48	50

На рисунке 5 показаны результаты моделирования развития разрушений в сравнении с фактическими данными. Из рисунков можно заметить, что развитие разрушений в процессе добычи по результатам моделирования в целом согласуется с данными наблюдений.

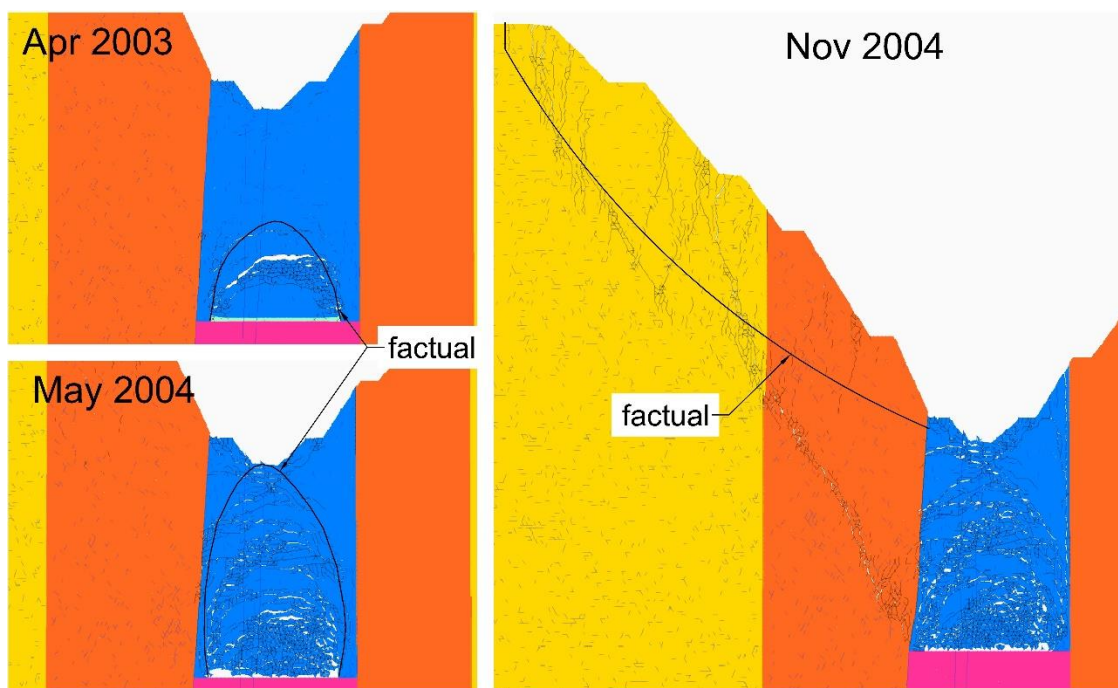


Рисунок 5 – Зоны разрушений: рассчитанные и фактические

6. Выводы

Методом конечно-дискретных элементов, реализованном в коде ProGocK, можно решать практические задачи прогноза сдвижения массива при добыче системами с обрушением: прогнозировать зоны разрушений в массиве и на поверхности с развитием горных работ, в том числе в бортах карьера. При отработке протяженных залежей 2D прогноз сдвижений может быть выполнен с точностью до метров. Для изометричных в плане рудных тел ошибки расчета могут быть значительно больше. Прогноз возможен при наличии данных для обратного расчета сцепления с учетом влияния масштабного эффекта в аналогичном масштабе (например, развитие зон обрушений на ранних этапах отработки месторождения).

Источники

1. Brady, B.H.G. and Brown, E.T. (2004). Rock Mechanics for Underground Mining, 3rd edition. Springer Science + Business Media, Inc. P. 571.
2. Пыасов В.Т. (2016). Study of the kinetics of deformation of rock mass using a finite-discrete element method. PhD Thesis. Ekaterinburg. P. 138.
3. Ivanov S.N., Merkulov M.I. (1937). Degtyarskoe pyrite deposit. Moscow. P. 124.
4. Kuznetsov M.A., Akimov A.G., Kuzmin V.I. et al. (1971). Movement of rocks on ore deposits. Nedra, Moscow. P. 224.
5. Mahabadi, O.K., Lisjak, A., Munjiza, A., and Grasselli, G. (2012). Y-Geo: a new combined finite-discrete element numerical code for geomechanical applications. International Journal of Geomechanics, 12, pp. 676-688.
6. Makarov A.B., Ananin A.I., Mosyakin D.V. (2017). Weakening of failed rocks and sinking conditions. Gornyi Zhurnal, 3, pp. 32-36.
7. Munjiza A. (2004). The combined finite-discrete element method. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, UK. P. 350.
8. Sainsbury D.P., Sainsbury B.L., Paetzold H-D., Lourens P., Vakili A. (2016). Caving-induced subsidence behaviour of lift 1 at the Palabora block cave mine. Proceedings Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining. Sydney, 9–11 may 2016. pp. 415-426.

9. Severin J.M. (2017). Impact of faults and fault damage zones on large open pit slopes. PhD Thesis. Vancouver. P. 168.