

УДК 622.272

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕЛИКОВ ПОДЗЕМНОЙ ШАХТЫ
ПО ДОБЫЧЕ ИЗВЕСТНЯКА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

Ким Донхой¹, Ким Гюнман², Бак Хванчо³

¹*Институт промышленных технологий, Кангвонский национальный университет,
24341, г. Чхунчхон, пров. Кангвондо, Республика Корея*

²*Институт минеральных и энергетических запасов, г. Тэджон, Республика Корея*

³*Кангвонский национальный университет,*

E-mail: hwanjo@kangwon.ac.kr, 24341, г. Чхунчхон, пров. Кангвондо, Республика Корея

С помощью лазерного сканера получено облако точек подземной шахты по добыче известняка. На основе дискретной и непрерывной моделей выполнен численный анализ устойчивости двух целиков, расположенных в подземной выработке. Рассчитан коэффициент запаса прочности, превышающий единицу, и значения смещения целиков, которые незначительны по сравнению с их размерами. В дискретной модели коэффициент запаса прочности ниже на ~30 % по отношению к непрерывной модели, значения смещения выше на ~40 %. Изменение коэффициента запаса прочности установлено с использованием минимальных, средних и максимальных значений механических свойств рассматриваемого породного массива и составляет ~50 %.

Лазерный сканер, облако точек, численный анализ, коэффициент запаса прочности, смещение

DOI: 10.15372/FTPRPI20240310

EDN: KGTVNO

Ввиду сложных геологических условий подземных шахт по добыче известняка в Корее требуются точные изыскания. В рамках полевых исследований в плановом порядке выполняется геологическое моделирование на основе данных лазерного сканирования. Устойчивость подземных выработок обеспечивается соблюдением специальных и системных рекомендаций по проектированию. Высокопроизводительные лазерные сканеры применяются на шахтах для получения точной геопространственной информации, которая повышает безопасность и эффективность горных работ. Однако сведения о геологической структуре подземных шахт часто собираются и обрабатываются с применением двухмерных (2D) изображений. Это приводит к техногенным авариям и катастрофам; проблемы безопасности и охраны экологической среды остаются нерешенными.

Настоящее исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований от Национального исследовательского фонда Кореи (NRF), финансируемого Министерством образования (2021R1I1A3A0403710311).

Лазерные сканеры обычно применяются для оценки шероховатости стенок трещин [1]. Ряд научных работ посвящен анализу устойчивости открытых и подземных выработок [2, 3], сбору геопространственной информации для управления и планирования [4, 5], применению лазерного сканирования для диагностики массива и построения дискретной сети трещин (ДСТ) в подземных шахтах [6, 7], мониторингу сдвижений пород [8, 9] и геоинформационному моделированию бортов карьеров на основе геологического строения составляющих блоков [10]. В будущем следует ожидать увеличения использования лазерных сканеров на подземных месторождениях.

В настоящей работе с помощью лазерного сканера получены точечные данные о подземной шахте по добыче известняка. Облако точек позволило построить трехмерные (3D) модели целиков и участков добычи. Определена дискретная сеть трещин путем статистической обработки информации по ориентации, длине и интенсивности образования трещин вокруг целиков. Выполнена оценка устойчивости целиков в большой выработке и рассчитан коэффициент запаса прочности исходя из механических свойств породного массива.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОРУДОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Рассматриваемая шахта расположена в уезде Чонсон (пров. Кангвондо, Южная Корея). В шахте осуществляется добыча высококачественного известняка в верхней части формации Панчон, которая контактирует с гранитными слоями и состоит в основном из белого известняка. Также наблюдается проникновение в формацию большого количества жил кислотных пород [11]. Месторождение осваивается тремя выработками с шириной 9–12 м и высотой 6 м. В выработке № 3 расположено два целика *A* и *B* (рис. 1), для которых проводилась оценка устойчивости.

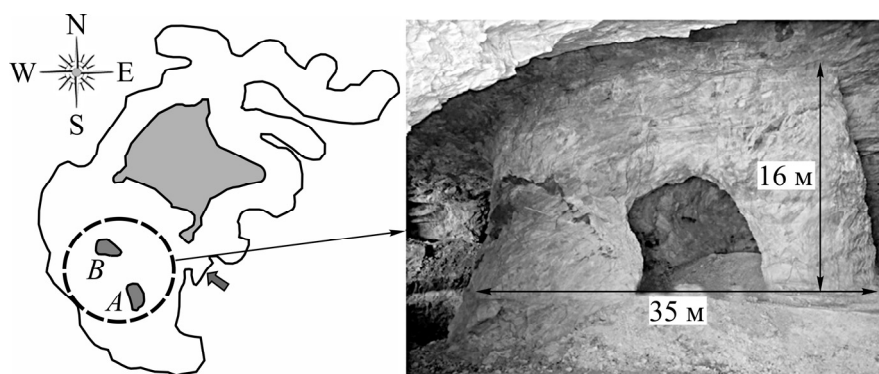


Рис. 1. Внешний вид двух целиков в выработке № 3

В работе использован лазерный сканер Trimble X7 — портативная система с автоматической калибровкой для повышения эффективности и надежности сканирования в полевых условиях [12]. Основные характеристики устройства представлены ниже:

Диапазон, м	0.6 ÷ 80.0
Шумовой диапазон (на расстоянии 30 м), мм	< 2.5
Длина волны лазера, нм	1550
Скорость сканирования, точек/с	500 000
Максимальный угол обзора (горизонталь / вертикаль), град	360 / 282
Температура эксплуатации, °C	–20 ÷ 50
Вес, кг	5.8

Измерения выполнялись с временным интервалом ~ 2 мин. Облако точек на каждом измерительном участке содержало примерно 11 млн элементов. После лазерного сканирования данные обрабатывались в ПО RealWorks (Trimble Inc.), ненужная информация удалялась (рис. 2).

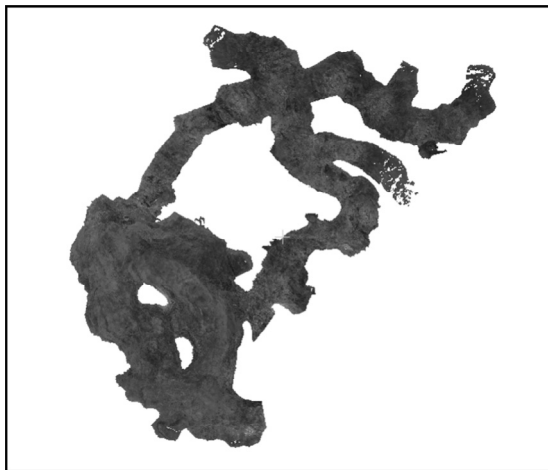


Рис. 2. Трехмерная визуализация рассматриваемой шахты, полученная с помощью облаков точек

Дискретная сеть трещин представляет собой применение метода статического моделирования фактических дефектов массива на основе данных, полученных в полевых условиях, — ориентация, длина и интенсивность трещин. Задача моделирования — как можно ближе приблизиться к фактическому состоянию массива [13]. Анализ дефектов рассматриваемых выработок на основе облаков точек выполнен в ПО CloudCompare.

Ориентация трещин — основной параметр моделирования дефектов породы по падению и простиранию месторождения [14]. Согласно распределению Фишера, падение имеет постоянное значение в периферийном направлении, простирание — случайное [15, 16]. Ориентация трещин изучалась с помощью плагина Facets ПО CloudCompare, который использует алгоритм аппроксимации по методу наименьших квадратов и производит автоматическое измерение ориентации трещин. Сначала плагин создает базовую плоскость, соединяющую соседние точки, которые составляют модель. Затем базовая плоскость группируется с окружающими плоскостями, и параллельные друг другу плоскости относятся в одну группу [17]. Плагин взаимодействует с несуществующими дефектами, поэтому требуется корректировка, которая осуществляется на основе измеренных параметров ориентации трещин в полевых условиях с помощью клинометра.

Длина трещины зачастую подчиняется экспоненциальному, логарифмически нормальному или гауссовому распределению [18]. Функция распределения длины трещин в ПО CloudCompare определялась вручную путем измерения 184 и 397 дефектов в наборах данных 1 и 2 соответственно. Испытания нормальности выполнялись в ПО SPSS. Функция распределения считается подходящей, если асимметрия меньше абсолютного значения трех, а эксцесс распределения не превышает абсолютное значение восьми [19]. Исходя из результатов анализа выявлено, что набор данных 1 подчиняется логарифмически нормальному распределению со значениями асимметрии 1.6 и эксцесса 3.2; набор данных 2 — гауссовому распределению с асимметрией 0.7 и эксцессом 0.6 (рис. 3).

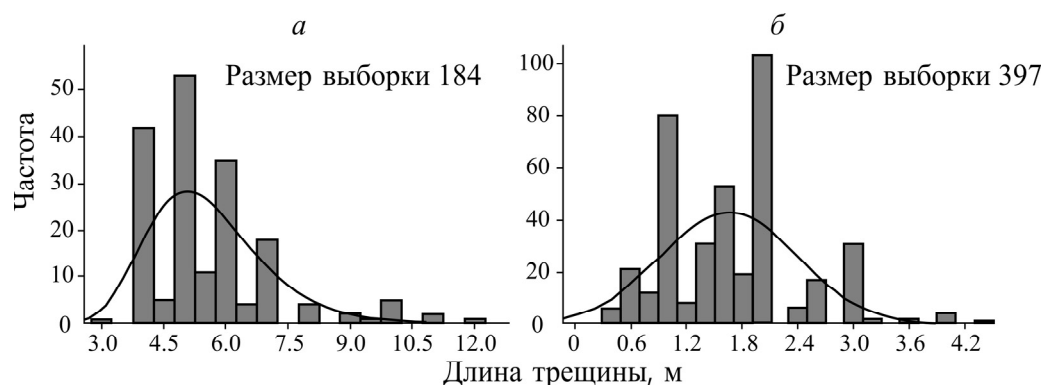


Рис. 3. Распределение значений длины трещин для наборов данных 1 (а) и 2 (б)

Интенсивность трещин отражает количество трещин в определенном объеме породного массива. В обозначении P_{AB} индекс A указывает на размерность рассматриваемой области (1D-линия, 2D-плоскость, 3D-объем), а индекс B — измеренные дефекты (1D-линия, 2D-плоскость, 3D-объем) [20]. С помощью функции *Compass* в ПО *CloudCompare* выполнено деление суммы измеренных значений длины трещины на площадь рассматриваемой области и получено значение интенсивности P_{21} . Характеристики трещин рассматриваемых выработок представлены ниже:

	Набор данных 1	Набор данных 2
Ориентация:		
направление падения/значение падения	290 / 80	70 / 73
постоянная Фишера K	73.93	30.39
Длина:		
функция распределения	Логарифмически нормальное	Гауссово
среднее значение	5.57	1.66
среднеквадратическое отклонение	1.56	0.73
Интенсивность P_{21} , m^{-1}	0.20	0.15

С помощью ПО *3DEC* выполнено трехмерное численное моделирование дискретной сети трещин (ДСТ). Для моделирования ДСТ использованы следующие параметры: ориентация трещин, их длина и интенсивность. На основе обработанных данных построена трехмерная модель ДСТ с размерными параметрами $100 \times 150 \times 100$ м (рис. 4). Трещины имели круговую форму, их ориентация соответствовала распределению Фишера. В качестве интенсивности использован параметр P_{21} . Длина трещин подчинялась логарифмически нормальному и гауссовому распределению для наборов данных 1 и 2 соответственно. Всего смоделировано 20524 трещины со случайным распределением в диапазоне среднего квадратического отклонения.

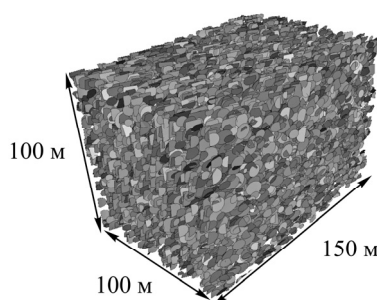


Рис. 4. Трехмерная модель дискретной сети трещин

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕЛИКОВ

Для оценки устойчивости целиков выполнен численный анализ в ПО 3DEC (дискретная модель) и ПО FLAC3D (непрерывная модель). Породный массив исследовался с помощью непрерывной модели Мора–Кулона, а дефекты — с помощью кулоновской модели со скольжением фаз. В качестве исходных данных для численного анализа использованы результаты предыдущих исследований [21]. Анализ устойчивости выполнен на основе коэффициента запаса прочности и величин смещения целиков. Если коэффициент запаса прочности менее 1.0, то риск разрушения целика оценивается как высокий. В этом случае требуется укрепление целика до значений в диапазоне 1.0–1.5. Если коэффициент запаса прочности превышает 1.5, то целик считается устойчивым. В отличие от коэффициента запаса прочности, смещения позволяют оценить тенденции развития деформационных процессов, не показывая абсолютные значения. Механические свойства породного массива и дефектов, использованные в численном анализе, приведены ниже.

Породный массив	
Плотность, кг/м ³	2590
Модуль объемной упругости, ГПа	7.6
Модуль сдвига, ГПа	4.8
Угол трения, град	39
Когезионная прочность, МПа	8.0
Прочность на растяжение, МПа	1.2
Дефекты	
Нормальная жесткость, ГПа/м	3.13
Жесткость на сдвиг, ГПа/м	8.13
Угол трения, град	38
Когезионная прочность, МПа	0.04

Модели расчета целиков в подземной выработке представлены на рис. 5.

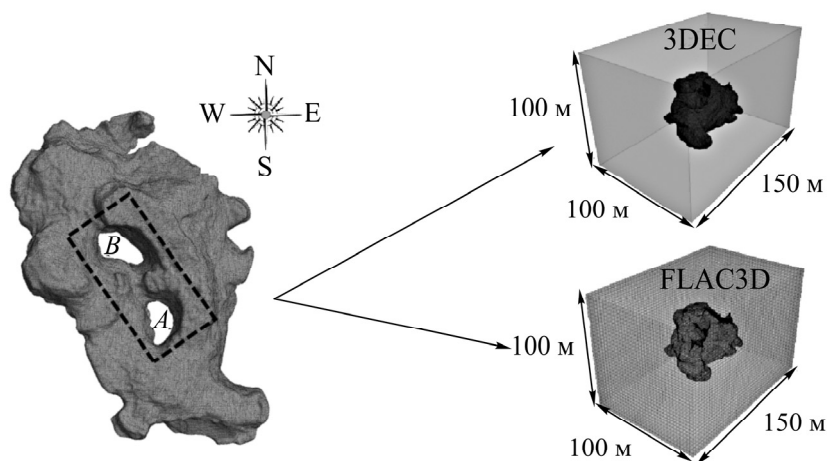


Рис. 5. Численные модели большой подземной выработки: 3DEC — дискретная, FLAC3D — непрерывная

Модель 3DEC разработана на основе ранее построенной модели ДСТ с верхней границей расчетной области на глубине 50 м от дневной поверхности. Исходя из среднего удельного веса налегающих пород 2590 кг/м³, к границе приложено вертикальное напряжение 1.3 МПа. Бо-

ковые стороны модели имеют нулевые смещения в горизонтальном направлении, нижняя граница закреплена в горизонтальном и вертикальном направлениях. Модель должна учитывать коэффициент бокового распора, однако его крайне сложно измерить в реальных условиях, поэтому он принят равным 1.0. В результате численного анализа получены значения коэффициента запаса прочности и смещений для двух рассматриваемых целиков.

Коэффициент запаса прочности проанализирован на 12 точках по центру целиков. В модели 3DEC он оказался на 30 % меньше, чем в модели FLAC 3D (рис. 6). Тем не менее в обеих моделях данный коэффициент превышает значение 1.0, что характеризует целики как умеренно устойчивые.

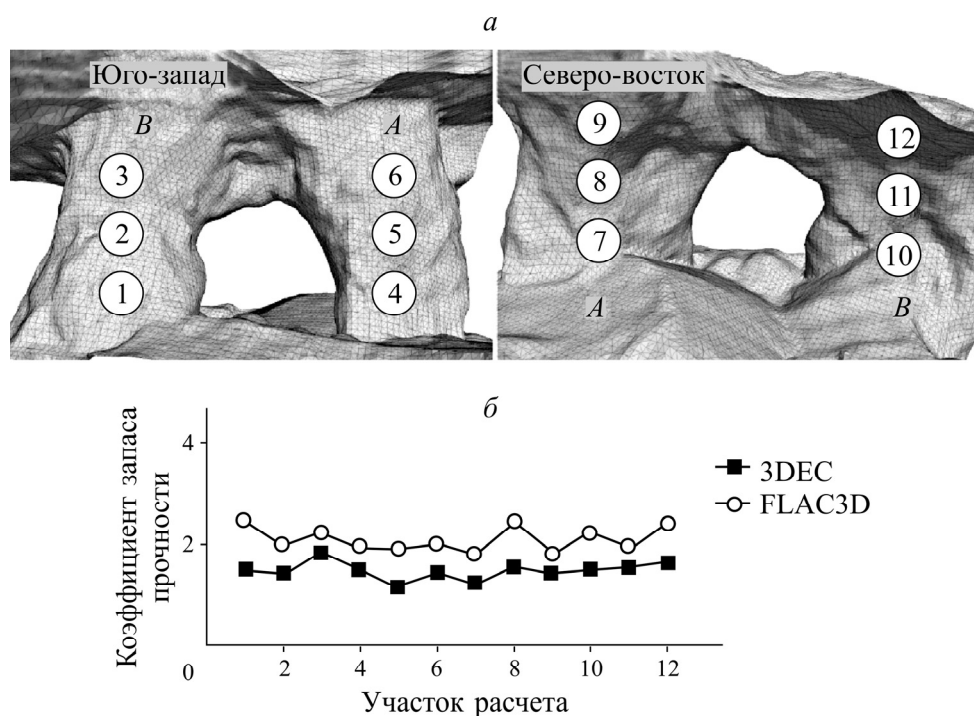


Рис. 6. Участки расчета (а) и результаты численного анализа устойчивости целиков А и В (б)

На рис. 7 показано распределение смещений в целиках. Согласно анализу в ПО 3DEC, максимальное смещение 9 мм произошло в боковой стенке целика В в юго-западном направлении (рис. 7а). Учитывая размер целика, такое смещение не оказало влияние на его устойчивость. В ПО FLAC3D зафиксированы значения смещений в диапазоне 1.5–5 мм, что примерно на 40 % меньше, чем в ПО 3DEC. Следовательно, численный анализ подтвердил устойчивость целиков в текущих геологических условиях.

На устойчивость в значительной степени влияют форма целика и характер развития дефектов [22]. В случае с подземными выработанными пространствами результаты исследования дефектов отражали фактическое состояние месторождения [23–27]. Численный анализ, выполненный в настоящей работе, с высокой точностью отражает состояние рассматриваемой шахты. Результаты расчетов зависели от изменения формы целиков и выработки, механических свойств породного массива, коэффициента бокового распора и наличия дефектов. Таким образом, для оценки устойчивости шахты на основе полевых параметров необходимо выполнить как дискретный, так и непрерывный анализ. Непрерывный анализ позволяет рассмотреть устойчивость шахты в целом, а не отдельной ее части. Также

он весьма эффективен при изменении исходных данных. При помощи дискретного анализа оценивается влияние некоторой части шахты на устойчивость целиков в ходе развития дефектов.

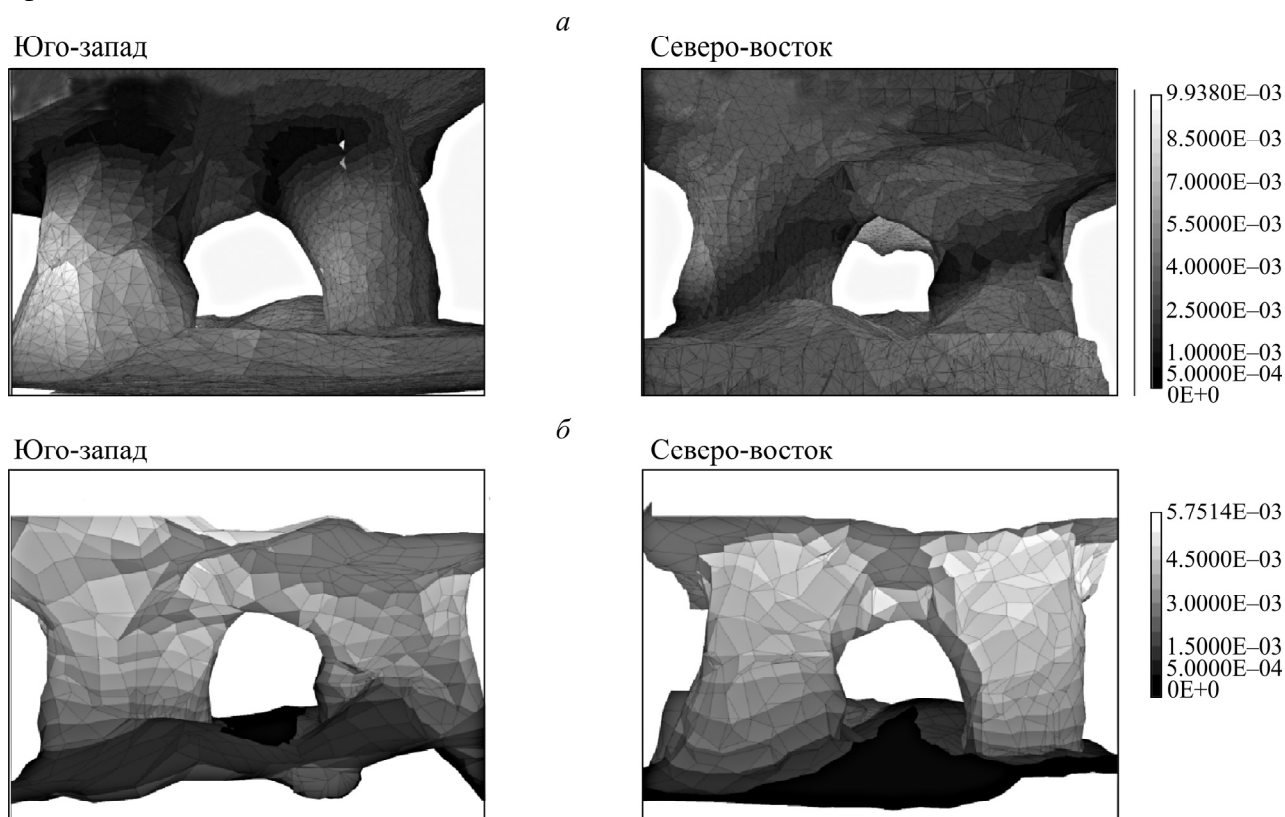


Рис. 7. Распределение смещений целиков *A* и *B*, полученных в ПО 3DEC (*a*) и в ПО FLAC3D (*б*)

В общем случае механические свойства массива представляет собой переменные величины из-за характеристической неопределенности. В [28, 29] исследованы изменения механических свойств породных массивов. В настоящей работе выполнен анализ коэффициента запаса прочности при изменении механических свойств и коэффициента бокового распора для рассматриваемой шахты. Изменение механических свойств выражено минимальными, средними и максимальными значениями (табл. 1). Коэффициент бокового распора имел следующие значения: 0.5; 1.0; 1.5 и 2.0. Для численного анализа использовано ПО FLAC3D.

ТАБЛИЦА 1. Механические свойства исследуемого породного массива

Значение механических свойств	Плотность, кг/м ³	Модуль объемной упругости, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Угол трения, град	Когезионная прочность, МПа	Прочность на растяжение, МПа
Минимальные	2590	7.6	4.8	39	8	1.2
Средние	2704	15.65	11.3	46	15	6.1
Максимальные	2810	23.7	17.8	53	22	11

На рис. 8 представлены результаты изменения коэффициента запаса прочности в зависимости от механических свойств массива и коэффициента бокового распора. Несмотря на очевидную зависимость от коэффициента бокового распора, коэффициент запаса прочности изменяется на ~ 50 % при сравнении результатов применения минимальных и максимальных механических свойств массива.

ческих свойств массива горных пород. При увеличении коэффициента бокового распора коэффициент запаса прочности уменьшается. Результаты, полученные в условиях рассматриваемой шахты, подтверждают, что механические свойства массива и коэффициент бокового распора значительным образом влияют на коэффициент запаса прочности опорных целиков. Для точного определения устойчивости подземных опорных элементов необходимо установить механические свойства породного массива и коэффициент бокового распора, которые изменяются в зависимости от геологических условий.

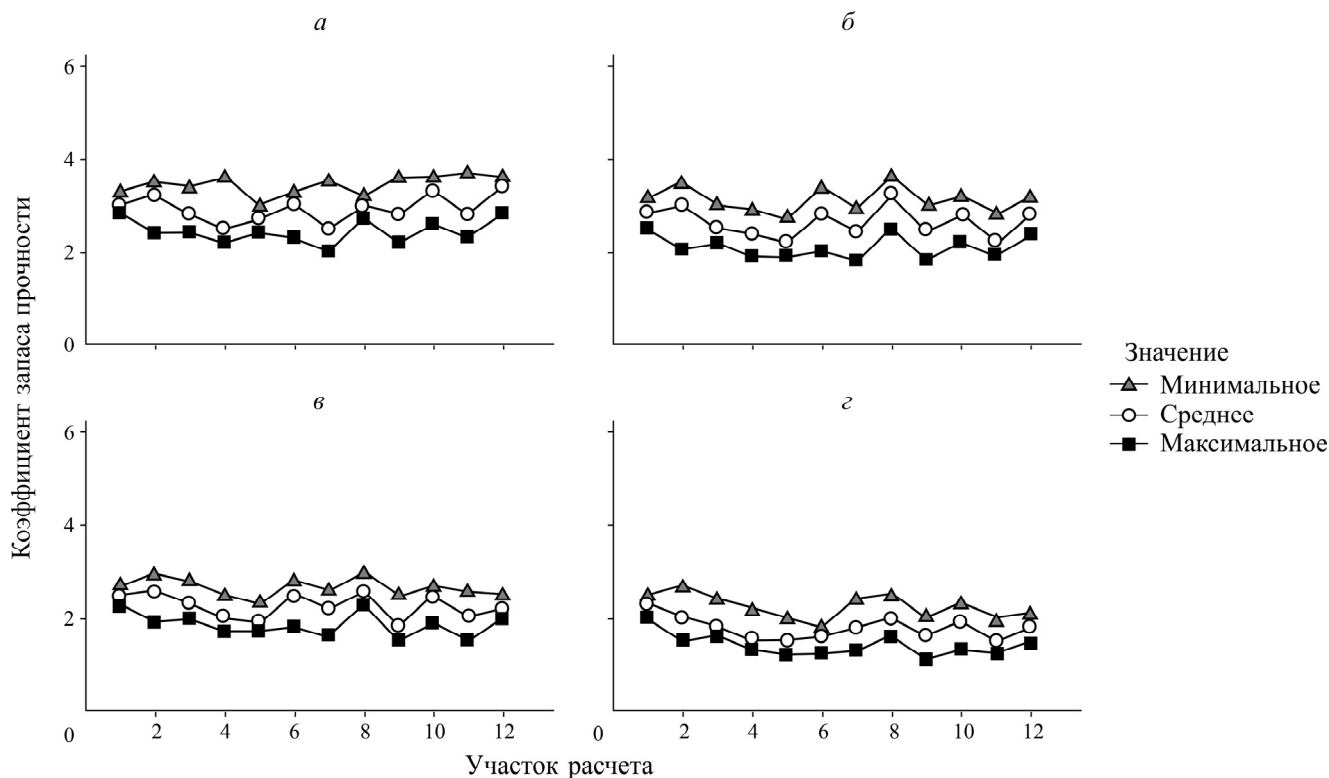


Рис. 8. Коэффициент запаса прочности в зависимости от изменения механических свойств и коэффициента бокового распора 0.5 (а), 1.0 (б), 1.5 (в) и 2.0 (г)

ВЫВОДЫ

Показано, что технология лазерного сканирования позволяет получить форму выработки и целиков с высокой точностью. Устойчивость целиков проанализирована с помощью дискретной и непрерывной моделей. В обеих моделях коэффициент запаса прочности превысил 1.0. Смещение целиков оказалось незначительным по сравнению с их размером. Коэффициент запаса прочности, полученный в ПО 3DEC (дискретная модель), на ~30 % меньше, чем в ПО FLAC3D (непрерывная модель), а смещение целиков на ~40 % больше.

Коэффициент запаса прочности целиков составляет ~50 % при сравнении результатов с изменением механических свойств массива горных пород. Коэффициент бокового распора и механические свойства породного массива получены исходя из локальных измерений и представлены в зависимости от геологических условий. Это подтверждает важность использования численного анализа для учета механических свойств массива и определения устойчивости подземных целиков.

Таким образом, сочетание результатов лазерного сканирования с численным анализом позволяет сделать вывод об устойчивости подземных элементов рассматриваемой шахты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mah J., Samson C., Mckinnon S. D., and Thibodeau D.** 3D Laser imaging for surface roughness analysis, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2013, Vol. 58. — P. 111–117.
2. **Jia H. and Xue J.** The stability study of goaf based on C-ALS data point cloud and FLAC3D Coupled Modeling, *E3S Web of Conference*, 2021, Vol. 261. — P. 03053.
3. **Riquelme A. J., Tomás R., and Abellán A.** Characterization of rock slope through slope mass rating using 3D point clouds, *J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2016, Vol. 84. — P. 165–176.
4. **Kajzar V., Kukutsch R., and Heroldova N.** Verifying the possibilities of using a 3D laser scanner in the mining underground, *Acta Geodyn. Geomater.*, 2015, Vol. 12, No. 1. — P. 51–58.
5. **Huber D. F. and Vandapel N.** Automatic three-dimensional underground mine mapping, *Int. J. Robot. Res.*, 2006, Vol. 25, No. 1. — P. 7–17.
6. **Monsalve J. J., Baggett J., Bishop R., and Ripepi N.** Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2019, Vol. 29, No.1. — P. 131–137.
7. **Chen S., Walske M. L., and Davies I. J.** Rapid mapping and analysing rock mass discontinuities with 3D terrestrial laser scanning in the underground excavation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2018, Vol. 110. — P. 28–35.
8. **Osasan K. S. and Afeni T. B.** Review of surface mine slope monitoring techniques, *J. Min. Sci.*, 2010, Vol. 46, No. 2. — P. 177–186.
9. **Lindenbergh R. and Pietrzyk P.** Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning, *Appl. Geomat.*, 2015, Vol. 7. — P. 65–74.
10. **Oparin V. N., Seredovich V. A., Yushkin V. F., Ivanov A. V., and Prokop'eva S. A.** Application of laser scanning for developing a 3D digital model of an open-pit side surface, *J. Min. Sci.*, 2007, Vol. 43, No. 5. — P. 545–554.
11. **Kim Y. H., Kim G. B., Choi S. G., and Kim C. S.** SWIR application for the identification of high-grade limestones from the upper pungchon formation, *Econ. Environ. Geol.*, 2016, Vol. 49, No. 5. — P. 335–347.
12. **TrimbleX7**, Official Web-site: <https://geospatial.trimble.com>. Accessed August 11, 2022.
13. **Par J., Kim J. S., Lee C., and Kwon S.** Hydraulic analysis of a discontinuous rock mass using smeared fracture model and DFN model, *Tunn. Undergr. Space*, 2019, Vol. 29, No. 5. — P. 318–331.
14. **Kim D., Kim B. J., and Baek H.** Analysis of factors affecting the stability of an underground mine, *J. Korean Soc. Miner. Energy Res. Eng.*, 2021, Vol. 58, No.1. — P. 75–84.
15. **Fisher R. A.** Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. of London, Edinburgh, Series A: Math. Phys. Sci.*, 1953, Vol. 217, No. 1130. — P. 295–305.
16. **Einstein H. H. and Baecher G. B.** Probabilistic and statistical methods in engineering geology: specific methods and examples part I: Exploration, *Rock Mech. Rock Eng.*, 1983, Vol. 16, No.1. — P. 39–72.
17. **Dewez T. J., Girardeau-Montant D., Allanic C., and Rohmer J.** Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds, *ISPRS Archives*, 2016, Vol. 41. — P. 799–804.
18. **Kline R. B.** Principles and practice of structural equation modeling, Guilford publications, 2015. — 494 p.
19. **3D EC User Manual Version 5.2**, Minneapolis, USA, 2014. <https://www.itascacg.com/software/3DEC>. Accessed July, 2022.
20. **Sunwoo C., Chung S. K., Choi S. O., Jung Y. B., Jeon Y. S., and Lee S. K.** AS tudyon the Safety and Environmental Control of Underground Opening in Limestone Quarries, KIGAM. Korea, 2005.
21. **Brown E. T. and E. Hoek** Underground Excavation in Rock, CRC Press, 1980. — 536 p.
22. **Jessu K. V. and Spearing A. J.** Performance of inclined pillars with a major discontinuity, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 2018, Vol. 29, No. 3. — P. 437–443.

23. **Bhasin R. and Hoeg K.** Parametric study for a large cavern in jointed rock using a distinct element model (UDEC – BB), *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1998, Vol. 35, No. 1. — P. 17 – 29.
24. **Lü Q. and Low B. K.**, Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM, *Comput. Geotech.*, 2011, Vol. 38, No. 8. — P. 1008 – 1021.
25. **Jiao Y. Y., Zhang X. L., Zhang H. Q., and Huang G. H.** A discontinuous numerical model to simulate rock failure process, *Geomech. Geoeng.*, 2014, Vol. 9, No. 2. — P. 133 – 141.
26. **Gui Y. L., Bui H. H., Kodikara J., Zhang Q. B., Zhao J., and Rabczuk T.** Modelling the dynamic failure of brittle rocks using a hybrid continuum-discrete element method with a mixed-mode cohesive fracture model, *Int. J. Impact Eng.*, 2016, Vol. 87. — P. 146 – 155.
27. **Usmani A., Pal S., and Nanda A.** Continuum and discontinuum analysis of rock caverns, *Indian Geotech. J.*, 2018, Vol. 48, No. 4. — P. 663 – 676.
28. **Castro-Filgueira U., Alejano L. R., Arzúa J., and Ivars D. M.** Sensitivity analysis of the micro-parameters used in a PFC analysis towards the mechanical properties of rocks, In: *ISRM European Rock Mechanics Symp. EUROCK 2017*.
29. **Torbica S., Lapčević V., Gang W., Đokić N., and Duranović M.** Sensitivity analysis of rock mass parameters estimate influence on decline support design using NATM, *Podzemini radovi*, 2019, Vol. 34. — P. 27 – 41.

Поступила в редакцию 21/VI 2023

После доработки 22/I 2024

Принята к публикации 17/V 2024