

Код МРНТИ 52.13.25

\*С.К. Молдабаев<sup>1</sup>, Д.В. Бабец<sup>2</sup>, К.Б. Рысбеков<sup>1</sup>, А.Н. Нурманова<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),  
<sup>2</sup>НТУ «Днепропетровская политехника» (г. Днепр, Украина)

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В ДОННОЙ ЧАСТИ КАРЬЕРОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

**Аннотация.** В статье исследуется влияние тектонических нарушений на устойчивость донной части карьеров и безопасность извлечения запасов месторождения. Рассматриваются методы численного моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива в условиях наличия геологических нарушений. Основное внимание уделяется моделированию разломов и трещин, их влиянию на структуру и механическое поведение горных пород, а также разработке прогностических моделей с использованием программного обеспечения RS2 и RS3 от компании Rocscience. В статье представлены результаты моделирования, демонстрирующие снижение коэффициента запаса устойчивости борта карьера при наличии тектонического нарушения, и предложены рекомендации по совершенствованию методики учета геологических данных и параметров моделирования.

**Ключевые слова:** численное моделирование, метод конечных элементов, открытая разработка, геологическое нарушение, напряженно-деформированное состояние, коэффициент запаса устойчивости, прогноз устойчивости.

### Карьерлердің төменгі бөлігіндегі тектоникалық бұзылулардың кен орындарын өндіру қауіпсіздігіне әсерін бағалау

**Аңдатпа.** Мақалада тектоникалық бұзылулардың карьерлер түбінің тұрақтылығына және кен орындары қорларын өндіру қауіпсіздігіне әсері қарастырылған. Сандық модельдеу әдістері геологиялық бұзылулар болған кезде тау массасының кернеулі-деформациялық күйін бағалау үшін қарастырылады. Бұзылулар мен жарықшақтарды модельдеуге, олардың тау жыныстарының құрылымы мен механикалық сипаттамалық әсеріне және Rocscience фирмасының RS2 және RS3 бағдарламалық камтамасыз етуді пайдалана отырып болжамды модельдерін жасауға басты назар аударылады. Мақалада тектоникалық бұзылыс кезінде карьер жағының тұрақтылық коэффициентінің төмендеуін көрсететін модельдеу нәтижелері берілген және геологиялық мәліметтер мен модельдеу параметрлерін есепке алу әдістемесін жетілдіру бойынша ұсыныстар берілген.

**Түйінді сөздер:** сандық модельдеу, шекті элементтер әдісі, ашық әдіспен өндіру, геологиялық бұзылу, кернеу-деформациялық күй, орнықтылық қауіпсіздік коэффициенті, тұрақтылық болжамы.

### Assessment of the impact of tectonic disturbances in quarry floors on the safety of resource extraction

**Abstract.** The article investigates the impact of tectonic disruptions on the stability of open pit floor and the safety of resource extraction. Numerical modeling methods are examined to assess the stress-strain state of the rock mass in the presence of geological disturbances. The focus is on simulating faults and fractures, their influence on the structure and mechanical behavior of rock formations, and the development of predictive models using RS2 and RS3 software by Rocscience. The article presents modeling results that demonstrate a decrease in the stability factor of the quarry slope in the presence of tectonic disturbances and offers recommendations for improving the methodology for incorporating geological data and modeling parameters.

**Key words:** numerical modeling, finite element method, open pit mining, geological disturbance, stress-strain state, stability factor, stability prediction.

### Введение

Минеральные ресурсы являются основой выживания и развития человечества. С непрерывным развитием отрасли добывается все больше и больше полезных ископаемых, среди которых значительная доля приходится на добычу металлов открытым способом [1]. Добыча открытым способом стала тенденцией развития горной отрасли в мире. Однако, с увеличением глубины разработки и возрастанием угла откоса бортов карьеров, усложнилась задача обеспечения устойчивости бортов, а, следовательно, и безопасности труда рабочих. Особо остро проблема устойчивого состояния крутонаклонных откосов в открытых горных выработках проявляется при наличии в донной части глубокого карьера геологических нарушений, формирование которых связано с тектоническими процессами в горном массиве.

Тектонические нарушения в массиве горных пород могут проявляться в виде разломов, трещин, складок и других деформаций в породах. Влияние этих нарушений на устойчивость горных выработок может быть следующим:

- тектонические разломы и трещины могут ослаблять структуру горных пород, делая их более подверженными обрушениям. Они могут стать путями для перемещения воды, что может увеличить вероятность образования скальных обвалов;

- тектонические нарушения могут приводить к образованию складок в горных породах и это также может

изменить напряженно-деформированное состояние пород, что влияет на их устойчивость и способность сопротивляться деформации.

- там, где тектонические нарушения активны, может быть повышенный уровень сейсмической активности. Это увеличивает риск возникновения сильных землетрясений, что может негативно повлиять на устойчивость горных выработок и способность их поддерживать безопасные условия для работы.

Наиболее безопасным и эффективным методом прогностической оценки влияния нарушений на устойчивость бортов является математическое (численное) моделирование. Результаты моделирования нарушений являются основой для принятия технических решений, они играют важную роль в проектировании и планировании горных работ, так как это помогает предсказать возможные риски и разработать меры для их снижения.

### Методы исследования

Математическое моделирование тектонических нарушений следует начинать с изучения геологических данных. Оценка и анализ геологических данных, включая данные о структуре горных пород, разломах, трещинах, складках и других тектонических нарушениях, позволяет понять, какие именно нарушения присутствуют в районе исследования.

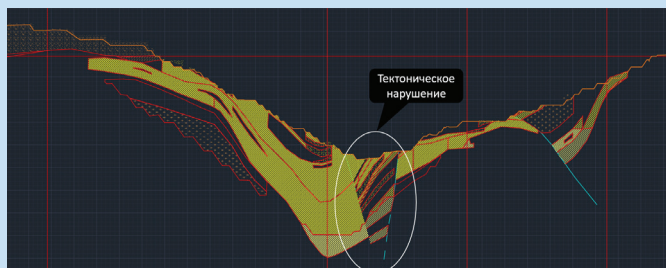
Далее возможны два подхода к моделированию:

1. Учет геологических нарушений путем введения различных коэффициентов, снижающих прочность породного массива, например, коэффициент структурного ослабления [2, 3] или использование Геологического индекса прочности (GSI) совместно с эмпирическим критерием прочности Хока-Брауна [4].

2. Создание имитационной геологической модели. На основе геологических данных строят геологическую модель, отображающую структуру горных пород и тектонические нарушения в них [5-8]. После чего модель интегрируется в численные, например, конечно-элементные модели с использованием программного обеспечения для численного моделирования, которое позволяет учитывать различные типы нарушений и их влияние на механическое поведение горных пород. Таким программным обеспечением является RS3 компании Rocscience. При этом важно учесть влияние тектонических нарушений на граничные условия модели. Например, перераспределение напряжений, возникающих из-за нарушений, могут существенно влиять на поведение горных пород. После построения модели необходимо провести ее валидацию на основе имеющихся наблюдений и данных о реальных условиях горных выработок. Это позволяет убедиться в точности моделирования и корректности учета нарушений.

#### Учет тектонических нарушений при геомеханическом моделировании

В качестве примера приведена цифровая геологическая модель сложно-структурного грунтово-породного массива, включающего глубокую открытую (540 м) выработку. В донной части карьера имеется разрывное нарушение, обнаруженное на стадии разведки месторождения. Цифровая геологическая модель создана в программе SURPAC, а затем через файлы AutoCad интегрирована в расчетный модуль RS2 от компании Rocscience для конечно-элементного анализа, позволяющего симулировать различные типы нарушений и их влияние на механическое поведение горных пород.

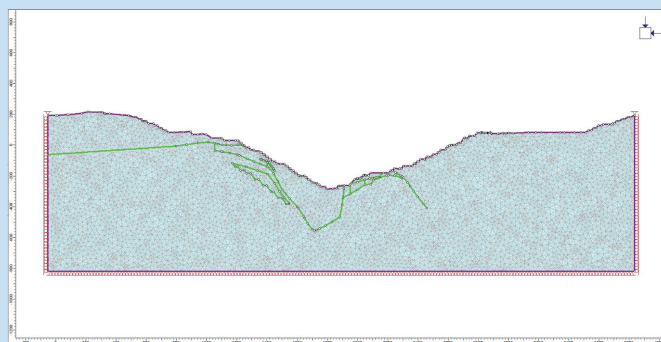


**Рис. 1. Цифровая модель карьера массива горных пород в окрестности открытой горной выработки.**

**Сурет 1. Ашық тау кен өндірісінің маңындағы тау жыныстары массивінің сандық моделі.**

**Figure 1. Digital model of the rock mass quarry in the vicinity of an open pit mine.**

Для чистоты вычислительного эксперимента (исключения влияния слоистости) на первом этапе моделирования рассмотрена однородная модель (без нарушения) с усредненными реальными физико-механическими свойствами породных слоев (рис. 2).

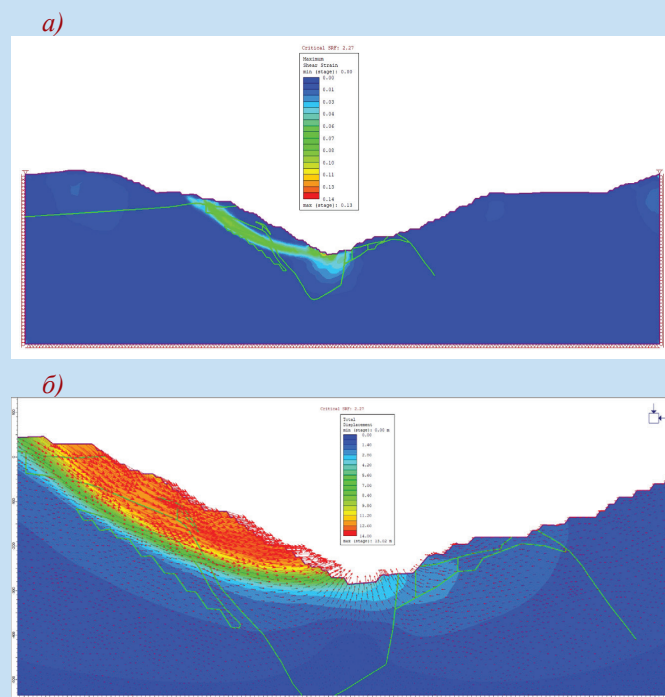


**Рис. 2. Конечно-элементная сетка и расчетная схема для анализа однородной модели.**

**Сурет 2. Ақырлы элементтер торы және біртекті модельді талдау үшін есептеу сұлбасы.**

**Figure 2. Finite element mesh and computational scheme for analyzing a homogeneous model.**

Результаты конечно-элементного моделирования на основе процедуры пошагового снижения прочности (SSR) с использованием прочностной модели Кулона-Мора приведены на рис. 3, где показана зона наибольших сдвигающих деформаций, определяющих потенциальную поверхность скольжения (левый борт выработки). Коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) при этом равен 2,27. Эти данные хорошо коррелируют с результатами, полученными в работах [9, 10].



*а – максимальные сдвиговые деформации; б – максимальные общие смещения с указанием направления потенциальных смещений*

**Рис. 3. Результаты конечно-элементного моделирования.**

**Сурет 3. Ақырлы элементтік модельдеу нәтижелері.**

**Figure 3. Results of finite element modeling.**



Для моделирования тектонического нарушения воспользуемся инструментом Structural Interface из программного комплекса RS2, который позволяет моделировать контакт между элементами с учетом структуры разлома и допускающий скольжение между границами разлома и основным массивом (рис. 4) Как известно, тектонические нарушения сопровождаются повышенной оперяющей трещиноватостью, которая моделируется инструментом Joint Network (система трещин). Берега разлома характеризуются раскрытостью, типом наполнителя, шероховатостью, что при моделировании с помощью инструмента Structural Interface оценивается двумя параметрами: нормальной и сдвиговой жесткостью трещины.

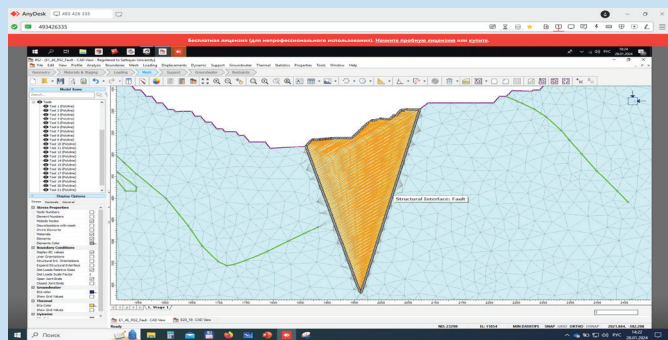


Рис. 4. Расчетная схема для моделирования тектонического нарушения.

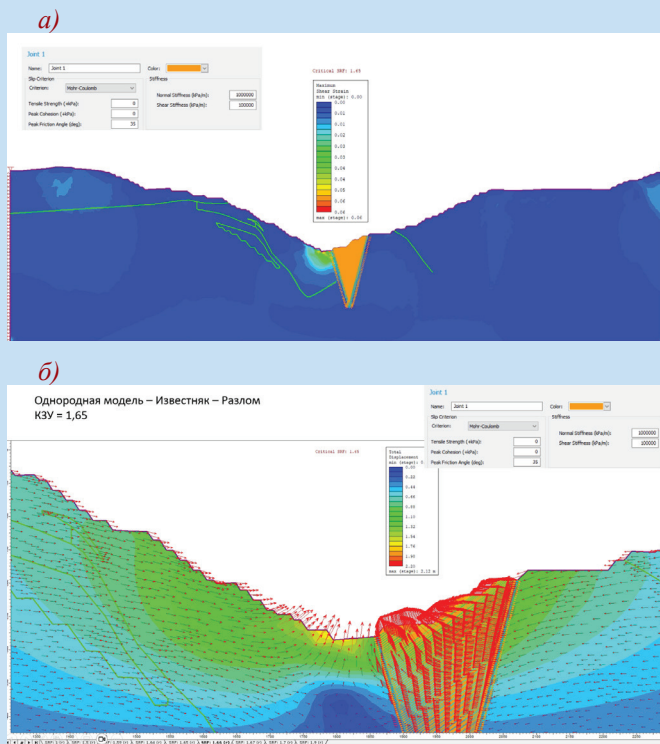
Сурет 4. Тектоникалық бұзылысты модельдеуге арналған есептеу сұлбасы.

Figure 4. Calculation scheme for modeling of tectonic disturbance.

Включение в модель тектонического нарушения при значениях нормальной жесткости  $kn = 1\,000\,000$  КПа/м, а сдвиговой жесткости  $ks = 100\,000$  КПа/м привело к тому, что максимальные сдвиговые деформации локализуются в зоне выхода тектонического нарушения на поверхность (рис. 5), а также к снижению КЗУ до уровня 1,65.

**3D моделирование тектонических нарушений с использованием программного комплекса RS3**

Целью 3D моделирования является анализ состояния прибортового массива по всему контуру карьера, в том числе с учетом тектонических нарушений. Методика моделирования предполагает, что имеются цифровые контуры карьера (файлы AutoCad), которые легко имплементируются в расчетный модуль программы конечно-элементного анализа RS3 от компании Rocscience. Для непосредственного моделирования тектонического разлома в конечно-элементную модель добавлена плоскость, которая совпадает с простираем разлома (рис. 6). Для создания соответствующего объема, который будет заполнен системой трещин, выполняем операцию «Выдавить» (Extrude) с параметром  $w = 30$  м для плоскости, добавленной в геометрию модели (рис. 6-б). Параметр  $w$  определяется в соответствии с данными геологии о реальной ширине зоны разлома.

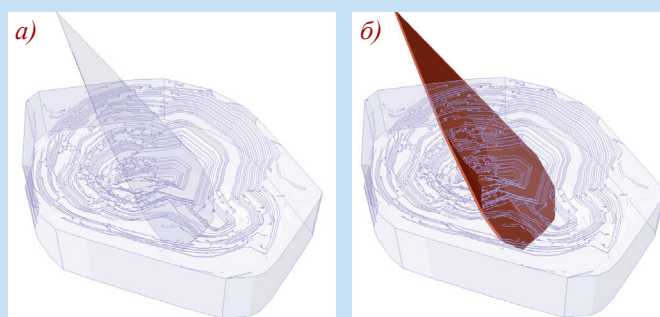


а – максимальные сдвиговые деформации; б – максимальные общие смещения с указанием направления потенциальных смещений

Рис. 5. Результаты конечно-элементного моделирования тектонического разлома.

Сурет 5. Тектоникалық жарылысты соңғы элементтерді модельдеу нәтижелері.

Figure 5. Results of finite element modeling of a tectonic fault.



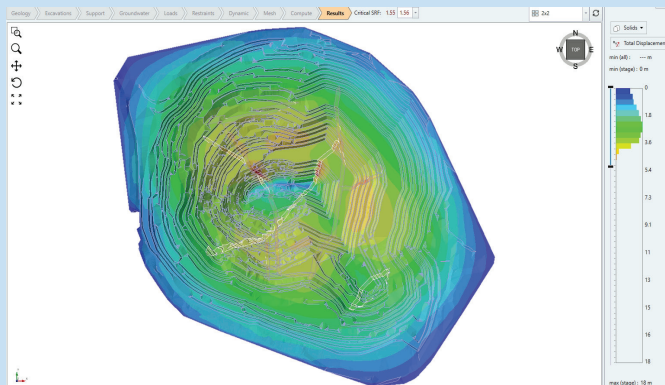
а – добавление в модель плоскости разлома; б – «выдавливание» плоскости на ширину 30 м для получения зоны оперяющей трещиноватости

Рис. 6. Создание объема для заполнения системой трещин.

Сурет 6. Жарықтар жүйесімен толтыру үшін көлем құру.

Figure 6. Creating volume to fill cracks in the system.

Моделирование объема, заполненного трещиноватой дезинтегрированной горной массой, привело к росту потенциальных перемещений бортов по всему периметру (рис. 7).



**Рис. 7. Перемещения пород, слагающих борта карьера, при наличии тектонического разлома в донной части карьера.**

**Сурет 7. Карьердің төменгі бөлігінде тектоникалық бұзылыс болған кездегі карьердің қабырғаларын құрайтын тау жыныстарының қозғалысы.**

**Figure 7. Displacements of rocks composing the quarry sides in the presence of a tectonic fault in the bottom part of the quarry.**

Наличие тектонического нарушения привело к снижению КЗУ борта по всему периметру карьера до значения 1,56, то есть на 29,4%.

### Результаты

1. Разработана методика имитационного моделирования влияния тектонических нарушений на напряженно-деформированное состояние породного массива. Технически при реализации моделирования используются инструменты *Structural Interface* и *Joint Network*, которые

позволяют моделировать контакт между элементами с учетом структуры разлома и допускающий скольжение между границами разлома и основным массивом.

2. Наличие тектонического нарушения в структуре породного массива привело к снижению коэффициента запаса устойчивости на 29,4% для параметров жесткости моделируемых контактов:  $k_n = 1\ 000\ 000$  КПа/м,  $k_s = 100\ 000$  КПа/м.

### Выводы

Учет характеристик геологических нарушений, таких как раскрытость, тип наполнителя контакта, шероховатость является сложной задачей геомеханики и на данном этапе осуществляется за счет подбора нормальной и сдвиговой жесткости контакта, моделирующего взаимодействие трещины-разлома и основного массива. Алгоритм подбора параметров контакта следует совершенствовать, принимая во внимание данные маркшейдерских наблюдений за состоянием разлома при выходе его на поверхность.

Важным элементом моделирования является выбор теории разрушения и критерия прочности. Несмотря на то, что авторы использовали критерий прочности Кулона-Мора, методика моделирования может включать проверку устойчивости борта с привлечением других критериев, в частности Хока-Брауна. Кроме того, калибровка модели за счет вариации таких прочностных параметров как сцепление и угол внутреннего трения, позволит повысить достоверность расчетов.

*Работа выполнена по мегагранту программно-целевого финансирования №BR21881939 «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационного инженерингового центра».*

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аль Хейб М. Анализ влияния разломов на устойчивость открытых участков добычи бурого угля с помощью метода отдельных элементов. / Аль Хейб М., И.Е. Зевголис, А.И. Теохарис. *Инженерная геотехника и геология*. 2022. С. 1307-1321 (на английском языке)
2. Бабец Д. Оценка прочности массива горных пород с использованием структурного фактора на основе статистической теории прочности. // *Явления твердого тела*. 2018. Вып. 277. С. 111-122 (на английском языке)
3. Бабец Д. Реализация вероятностного подхода к оценке прочности горной массы при проходке разломных зон. / Бабец Д., Сдвижкова О., Шашенко О., Кравченко К., Кабана Е.К. // *Разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 13 (4). С. 72-83 (на английском языке)
4. Эберхардт Э. Критерий разрушения Хока-Брауна. // *Механика горных пород и горное дело*. 2012. Т. 45 (6). С. 981-988 (на английском языке)
5. Чжао С. Трехмерное конечно-элементное моделирование деформаций и напряжений, связанных с разломами: влияние неоднородных структур коры. / С. Чжао, Р.Д. Мюллер, Й. Такахаша, Й. Канада. // *Geophysical Journal International*. 2004. Т. 157(2). С. 629-644 (на английском языке)
6. Чжэн Ю. Анализ устойчивости склона карьера, содержащего разлом, с использованием UDEC. / Ю. Чжэн, К. Чен, Х. Чжу, Х. Лю, Г. Чен. // *Прикладная механика и материалы*. 2013. № 444-445. С. 1204-1210. (на английском языке)
7. Ли Ю. Трехмерный анализ устойчивости сложных горных склонов, подверженных влиянию разлома и слабого слоя, основанный на FESRM. / Ли Ю., Ю Л., Сонг У., Янг Т. // *Достижения в области гражданского строительства*. 2019. С. 1-14. (на английском языке)
8. Цао Х. Многофакторный анализ устойчивости высоких откосов в открытых горных выработках. / Х. Цао., Г. Ма, П. Лю, Х. Цинь, К. Ву, Дж. Лу. // *Прикладные науки*. 2023. № 13(10). С. 5940. (на английском языке)

9. Молдабаев С.К. Численное моделирование устойчивости карьера на основе вероятностного подхода. / С.К. Молдабаев, О.О. Сдвижкова, Д.В. Бабец, О.С. Ковров, Т.К. Адиль. // Научный вестник Национального хирничого університету. 2021. Т. 6. С. 29-34. (на английском языке)
10. Сдвижкова О. Вероятностная оценка устойчивости откосов при разработке руд с крутыми пластами в глубоких карьерах. / О. Сдвижкова, С. Молдабаев, А. Басцетин, Д. Бабец, Е. Кульдеев, Ж. Султанбекова, М. Аманкулов, Б. Исаков. // Разработка месторождений полезных ископаемых. 2022. Т. 16 (4). С. 11-18 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Аль Хейб М. Ашық қоңыр көмір өндіру орындарының тұрақтылығына ақаулардың әсерін жеке элемент әдісімен талдау. / Аль Хейб М., И.Е. Зевголис, А.И. Теохарис. // Геотехникалық инженерия және геология. 2022. Б. 1307-1321. (ағылшын тілінде)
2. Бабец Д. Беріктіліктің статистикалық теориясына негізделген құрылымдық факторды пайдалана отырып, тау массасының беріктігін бағалау. // Қатты заттардың құбылыстары. 2018. Т. 277. Б. 111-122 (ағылшын тілінде)
3. Бабец Д. Жарық аймақтарын қазу кезінде тау-кен массасының беріктігін бағалаудың ықтималдық тәсілін жүзеге асыру. / Д. Бабец, О. Сдвижкова, О. Шашенко, К. Кравченко, Е.К. Кабана. // Пайдалы қазбалар кен орындарын игеру. 2019. Т. 13 (4). Б. 72-83 (ағылшын тілінде)
4. Эберхардт Э. Хок-Браунның бұзылу критеріі. // Тау механикасы және тау-кен ісі, 2012. Т. 45 (6). Б. 981-988 (ағылшын тілінде)
5. Чжао С. Үш өлшемді ақырлы элементтердің бұзылулармен байланысты деформациялар мен кернеулерді модельдеу: гетерогенді жер қыртысының құрылымдарының әсері. / С. Чжао, Р.Д. Мюллер, Ю. Такахаши, Ю. Канада. // Geophysical Journal International. 2004. Т. 157 (2). Б. 629-644 (ағылшын тілінде)
6. Чжэн Ю. UDEC көмегімен бұзылған карьер еңісінің орнықтылығын талдау. / Чжэн Ю., Чен К., Чжу Х., Лю Х., Чен Г. // Қолданбалы механика және материалдар. 2013. № 444-445. Б. 1204-1210. (ағылшын тілінде)
7. Ли Ю. FESRM негізіндегі тау беткейлеріне әсер еткен күрделі бұзылыстар мен әлсіз қабаттардың тұрақтылығын 3D талдауы. / Ли Ю., Ю Л., Сон В., Янг Т. // Азаматтық құрылыс жетістіктері. 2019. Б. 1-14 (ағылшын тілінде)
8. Цао Х. Ашық тау-кен қазбаларындағы биік беткейлердің тұрақтылығын көп факторлы талдау. / Х. Цао, Г. Ма, П. Лю, Х. Цин, К. Ву, Дж. Лу. // Қолданбалы ғылымдар. 2023. № 13(10). Б. 5940. (ағылшын тілінде)
9. Молдабаев С.Қ. Ықтималдық тәсілге негізделген карьер тұрақтылығын сандық модельдеу. / Молдабаев С.Қ., Сдвижкова О.О., Бабец Д.В., Ковров О.С., Әділ Т.Қ. // Ұлттық химия университетінің ғылыми хабаршысы. 2021. Т. 6. Б. 29-34 (ағылшын тілінде)
10. Сдвижкова О. Терең карьерлерде тік қабаттары бар кендерді өндіру кезіндегі еңіс тұрақтылығын ықтималдық бағалау. / О. Сдвижкова, С. Молдабаев, А. Басцетин, Д. Бабец, Е. Көлдеев, Ж. Сұлтанбекова, М. Аманқұлов, Б. Исаков. // Минералды өңдеу депозиттер. 2022. Т. 16 (4). Б. 11-18 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Al Heib M. Analysis of Faults' Effect on the Stability of Surface Lignite Mining Areas Using the Distinct Element Method. / Al Heib M., Zevgolis I.E. , Theocharis A.I. // Geotechnical and Geological Engineering. 2022. P. 1307–1321 (in English)
2. Babets D. Rock Mass Strength Estimation Using Structural Factor Based on Statistical Strength Theory. // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 277. P. 111-122 (in English)
3. Babets D. Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation while excavating through fault zones. / Babets D., Sdvyzhkova O., Shashenko O., Kravchenko K., Cabana E.C. // Mining of Mineral Deposits. 2019. Vol. 13 (4). P. 72-83 (in English)
4. Eberhardt E. The Hoek-Brown failure criterion. // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. Vol. 45 (6). P. 981-988 (in English)
5. Zhao S. 3-D finite-element modelling of deformation and stress associated with faulting: effect of inhomogeneous crustal structures. / Zhao S., Müller R.D., Takahashi Y., Kaneda Y. // Geophysical Journal International. 2004. Vol. 157 (2). P. 629-644 (in English)
6. Zheng Y. Stability Analysis of Open-Pit Slope Containing a Fault Utilizing UDEC. / Zheng Y., Chen C., Zhu X., Liu X., Cheng G. // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 444-445. P. 1204–1210 (in English)



7. *Li Y. Three-Dimensional Analysis of Complex Rock Slope Stability Affected by Fault and Weak Layer Based on FESRM. / Li Y., Yu L., Song W., Yang T. // Advances in Civil Engineering. 2019. P. 1-14 (in English)*
8. *Cao H. Multi-Factor Analysis on the Stability of High Slopes in Open-Pit Mines. / Cao H., Ma G., Liu P., Qin X., Wu C., Lu J. // Applied Sciences. 2023. Vol. 13(10). 5940 (in English)*
9. *Moldabayev S.K. Numerical simulation of the open pit stability based on probabilistic approach. / Moldabayev S.K., Sdvyzhkova O.O., Babets D.V., Kovrov O.S., Adil T.K. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2021. Vol. 6. P. 29-34 (in English)*
10. *Sdvyzhkova O. Probabilistic assessment of slope stability at ore mining with steep layers in deep open pits. / Sdvyzhkova O., Moldabayev S., Bascetin A., Babets D., Kuldeyev E., Sultanbekova Zh., Amankulov M., Issakov B. // Mining of Mineral Deposits. 2022. Vol. 16 (4). P. 11-18 (in English)*

#### Сведения об авторах:

**Молдабаев С.К.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Горное дело», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [s.moldabayev@satbayev.university](mailto:s.moldabayev@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0001-8913-9014>

**Бабец Д.В.**, доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной математики в НТУ «Днепровская политехника» (г. Днепр, Украина), [Babets.d.v@ntu.one](mailto:Babets.d.v@ntu.one); <https://orcid.org/0000-0002-5486-9268>

**Рысбеков К.Б.**, кандидат технических наук, профессор, директор Горно-металлургического института имени О.А. Байконурова, Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [k.rysbekov@satbayev.university](mailto:k.rysbekov@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0003-3959-550X>

**Нурманова А.Н.**, магистр технических наук, ассистент кафедры «Металлургия и обогащение полезных ископаемых», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), [a.nurmanova@satbayev.university](mailto:a.nurmanova@satbayev.university); <https://orcid.org/0000-0002-1761-7539>

#### Авторлар туралы мәліметтер:

**Молдабаев С.К.**, техника ғылымдарының докторы, профессор, Тау-кен ісі кафедрасының меңгерушісі, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Бабец Д.В.**, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Днепровск политехникалық» ҰТУ қолданбалы математика кафедрасы (Днепр қ., Украина),

**Рысбеков К.Б.**, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, О.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институтының директоры, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

**Нурманова А.Н.**, техника ғылымдарының магистрі, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасының ассистенті, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

#### Information about the authors:

**Moldabayev S.K.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department «Mining Engineering», Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Babets D.V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Applied Mathematics at the NTU «Dniprovsk Polytechnika» (Dnipro, Ukraine)

**Rysbekov K.B.**, PhD (technical sciences), professor, director, O.A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

**Nurmanova A.N.**, Master of Technical Sciences, assistant of department «Metallurgy and mineral processing», Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)