

Код МРНТИ 52.13.17:52.13.04

*С.К. Молдабаев, Г.Н. Асылханова, А.С. Молдабаев, С.А. Асылханова
 НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет
 им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан)

СЕКТОРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В ПРОГРАММЕ RS3 КОМПАНИИ ROCSCIENCE

Аннотация. В статье приведена методология секторального моделирования по периметру открытой горной выработки в программе RS3 компании Rocscience. Макромодель разбивается на секторальные модели меньшего масштаба радиально ориентированными плоскостями так, чтобы охватить потенциально неустойчивые области борта. Упругопластическая модель среды и критерий прочности Кулона-Мора реализованы в кодах программы RS3. Впервые на основе двухуровневого моделирования показано различие в определении коэффициента запаса устойчивости в зависимости от масштаба модели и степени отражения структуры грунтово-породного массива. Установлено распределение показателя устойчивости борта по периметру карьера и локализованы потенциальные поверхности скольжения в каждом из выделенных секторов карьера на основе процедуры «снижения сдвиговой прочности» (Shear Strength Reduction).

Ключевые слова: рудный карьер, массив горных пород, устойчивость борта, деформация, метод конечных элементов, численное 3D моделирование геомеханических процессов, поле напряжений, сдвиг, трещиноватость.

Rocscience компаниясының RS3 бағдарламасында ашық тау-кен қазбасын секторлық модельдеу

Андатпа. Мақалада Rocscience компаниясының RS3 бағдарламасында ашық кеніштің периметрі бойынша секторлық модельдеу әдістемесі берілген. Макромодель тақтаның ықтимал тұрақсыз аймақтарын қамту үшін радиалды бағытталған жазықтықтар бойынша кішірек масштабтағы салалық модельдерге бөлінген. Ортаның эластопластикалық моделі және Кулон-Мор беріктік критерийі RS3 бағдарлама кодтарында жүзеге асырылады. Алғаш рет екі деңгейлі модельдеу негізінде модельдің масштабы мен топырақ-тау жынысы массивінің құрылымының шағылысу дәрежесіне байланысты тұрақтылық коэффициентін анықтаудағы айырмашылық көрсетілген. Карьердің периметрі бойынша карьер беткейі тұрақтылығының таралу көрсеткіштері белгіленді және «сығу беріктігін төмендету» процедурасы негізінде карьердің әрбір таңдалған секторында потенциалды сырғанау беттері анықталды.

Түйінді сөздер: кен карьері, тау-кен жыныстарының сілемі, карьер беткейінің орнықтылығы, деформация, соңғы элементтер әдісі, геомеханикалық процестерді 3D сандық модельдеу, кернеу өрісі, ығысу, жарықшақтық.

Sectoral modeling of open mining in RS3 program by Rocscience

Abstract. The article presents the methodology of sector modeling along the perimeter of an open-pit mine in the RS3 program from Rocscience. The finite element 3D analysis of the stress-strain state (SSS) of the soil and rock mass is determined based on models of different scales. The macro-level model includes the entire quarry bowl and allows for a primary stability assessment due to changes in the general slope angle of the side along the quarry perimeter. The macro-model is then broken down into smaller-scale sector models by radially oriented planes so as to cover potentially unstable areas of the side. Sector models allow for a more detailed display of a complex line of benches, as well as simulating the layered structure of the massif. The elastic-plastic model of the medium and the Coulomb-Mohr strength criterion are implemented in the RS3 program codes. The distribution of the edge stability index along the quarry perimeter was determined and potential sliding surfaces were localized in each of the selected quarry sectors based on the «Shear Strength Reduction» procedure.

Key words: iron ore quarry, rock mass, side stability, deformation, finite element method, numerical 3D modeling of geomechanical processes, stress field, shear, fracturing.

Введение

При компьютерной реализации конечно-элементного моделирования на макроуровне в данных исследованиях используется рабочая станция, оснащенная 128 ГБ оперативной памяти. При этом максимально допустимое количество конечных элементов составляет 1–1,5 млн шт., а диаметр каждого конечного элемента – порядка 50 м, что приводит к значительной потере точности вычислений и не позволяет детально оценить распределение напряжений и деформаций для каждого уступа исследуемой области. Для детального моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива в области, представляющей повышенный интерес с точки зрения потенциальной потери устойчивости, необходим переход к секторальным моделям, в которых за счет уменьшения размеров объекта исследования можно реализовать разбиение модели на конечные элементы меньшего диаметра (10–15 м) [1].

Расчет НДС прибортового породного массива сверхглубокого карьера выполняется методом конечных элементов. При современном развитии вычислительной техники предпочтение следует отдать 3D численным моделям для учета полного тензора напряжений и деформаций, определяющих устойчивость откосов [2]. Это тем более актуально для карьеров округлой формы. Авторы [3], используя алгоритм конечных разностей, реализованный в программе FLACK 3D, также показывают преимущества

пространственного определения НДС породного массива при оценке устойчивости бортов карьера. Поэтому для создания конечно-элементной модели использован лицензионный программный комплекс RS3 Rocscience, в который экспортированы цифровые 3D контуры карьера.

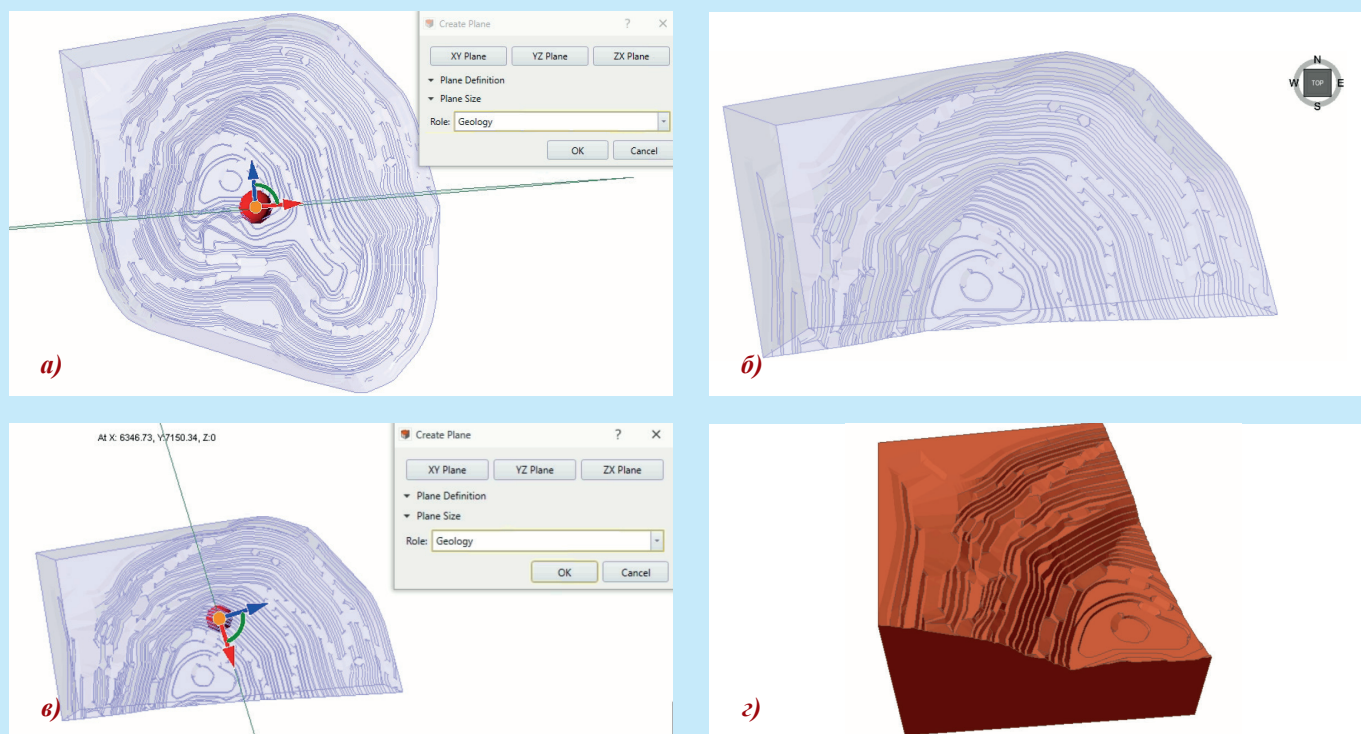
Создание секторальных моделей из моделей макроуровня

При создании секторальной модели будем следовать двум принципам:

- значимости – модель должна охватывать всю область, представляющую практически-весомый интерес с точки зрения повышенной потенциальной потери устойчивости;
- экономичности – физические размеры модели должны быть минимальными (при соблюдении первого принципа), что позволит использовать детальную конечно-элементную сетку, состоящую из элементов малого диаметра.

Для практической реализации этих принципов разобьем модель макроуровня двумя вертикальными плоскостями так, чтобы выделяемый сектор полностью включал в себя потенциальную зону потери устойчивости, которая визуальным образом определяется на внешнем контуре модели измененной цветовой гаммой, плюс 5% ширины этой области по обеим сторонам сектора (рис. 1).

Модель, представленная на рисунке 1 (з), разбивается на конечные элементы тетраэдрной формы, диаметр элементов 10–15 м (рис. 2).



*а – сечение 1-й плоскостью; б – результат вычитания множеств;
в – сечение 2-й плоскостью; г – секторальная модель*

Рис. 1. Создание секторальной модели.

Сурет 1. Салалық модельді құру.

Figure 1. Creation of a sectoral model.

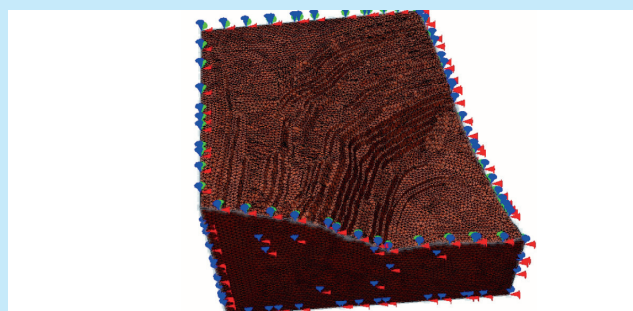


Рис. 2. Расчетная схема секторальной модели.

Сурет 2. Салалық модельдің есептеу диаграммасы.

Figure 2. Calculation scheme of the sectoral model.

Конечно-элементный анализ НДС породно-грунтового массива выполняется в упругопластической постановке на основе критерия прочности Кулона-Мора [4], который широко используется в задачах геомеханики наряду с критерием Хока-Брауна [5, 6].

Устойчивость борта карьера оценивается с помощью процедуры Shear Strength Reduction (снижение сдвиговой прочности), подробно описанной в [7].

Основным ключевым отличием данной работы от известных в мировой практике с использованием программ Rocscience является разработка метода секторального исследования напряженно-деформированного состояния обобщенной 3D модели на основе создания квазистатической последовательности моделей, имитирующих поэтапное развитие горных работ до предельного контура

карьера. Базируется на пространственно-временном подходе исследования численной (конечно-элементной) геомеханической модели глубокой открытой горной выработки.

Методология построения геомеханических моделей предполагает выполнение трех крупных этапов:

- подготовка в цифровом формате исходных данных – контуров карьера и геологического строения массива с использованием интегрированного горно-геологического комплекса Surpac;
- экспорт данных в модуль построения конечно-элементных пространственно-секторальных моделей (лицензионный программный комплекс RS3 Rocscience);
- исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) массива в окрестности открытой горной выработки.

В свою очередь создание конечно-элементных 3D моделей и анализ на их основе НДС породно-грунтового массива предполагает вовлечение разных уровней построения моделей. Алгоритм разноуровневого моделирования предполагает следующие этапы:

- создание обобщенной численной модели всей чаши карьера (модель макроуровня), конечно-элементная сетка которой состоит из крупных элементов-тетраэдров с линейным размером 40–50 м (допустимое количество конечных элементов составляет 1–1,5 млн шт.), что, однако, позволяет отразить общую геометрию контуров карьера. На этой стадии для сокращения количества внутренних границ моделируется однородный массив. Экономичность этой модели (в отношении времени расчетов и занимаемой памяти компьютера) – дать первичную

оценку устойчивости бортов по всему периметру карьера и сразу выделить опасные участки, обусловленные генеральным углом наклона борта;

- совмещение контуров карьера с границами рудного тела и наложение контуров пород вскрыши на геометрию модели на макроуровне в привязке к системе координат. Этот этап усложняет модель, добавляя внутренние границы, что сопровождается увеличением густоты сетки. Вводятся физико-механические свойства руды и пород вскрыши. НДС массива и коэффициент запаса устойчивости пересчитывается с учетом перераспределения напряжений за счет различной жесткости слоев. Определяются участки с потенциальным снижением запаса устойчивости;

- выполняется секторальное разбиение всей чаши карьера по принципу охвата потенциально опасных участков. Секторы выделяются вертикальными плоскостями, веерообразно исходящими из центра карьера. Таким образом, создаются модели меньшего масштабного уровня. Выделяемый сектор должен полностью включать в себя потенциальную зону потери устойчивости, которая визуальнo определяется на внешнем контуре модели измененной цветовой гаммой, плюс 5% ширины этой области по обеим сторонам сектора. Уменьшение масштаба модели позволяет снизить размер конечных элементов-тетраэдров до 10–15 м. На этом этапе вводится вся доступная геологическая информация о слабых прослойках, разрывных нарушениях, зон опережающей трещиноватости. Выполняется наиболее детальный анализ деформационных процессов в слоистом массиве, в окрестности геологических нарушений. Выявляются зоны возможного формирования поверхностей скольжения, не выявленные на макромоделли всей чаши карьера.

Метод предполагает, что после построения модели прочность на сдвиг всех материальных компонентов итеративно увеличиваются или уменьшаются в SRF раз до тех пор, пока не произойдет коллапс модели, который проявляется в резком изменении смещений в контрольной точке и расхождении итерационного процесса при решении основной системы уравнений, составляющей основу МКЭ. Таким образом, величина SRF показывает, во сколько раз нужно изменить прочность породно-грунтового массива, чтобы произошло обрушение откоса, то есть представляет собой аналог коэффициента запаса устойчивости (КЗУ). Именно коэффициент SRF анализируется в дальнейшем как основная величина, характеризующая устойчивость борта карьера.

Общая картина распределения перемещений по всему периметру карьера и локализация поверхности скольжения на конечной глубине карьера показывает, что наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости SRF (КЗУ) по всему периметру составляет 1.53, и имеет место в Южной части карьера (S). В соответствии с нормами проектирования, КЗУ не должен превышать значение 1.3. Поэтому при $KZU = 1.53$ можно полагать, борт карьера в среднем по периметру достаточно устойчив. Однако, в соответствии с разработанной методикой, для более точного моделирования геометрии уступов и учета влияния различной жесткости породных слоев выполнено разбиение модели на секторы и наполнение каждой секторальной модели дополнительной информацией о границах слоев и их физико-механических свойствах. Это позволило для каждого выделенного секто-

ра оценить устойчивость борта (рис. 3). Как и для первых этапов, детализация контуров и структуры породного массива обусловила различия в наименьшем КЗУ для макромоделли и КЗУ для каждой секторальной модели.

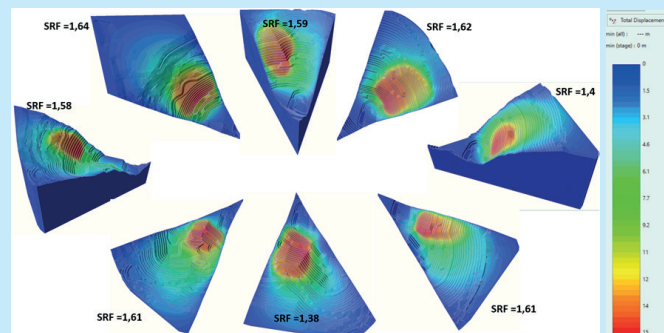


Рис. 3. Распределение смещений, локализация поверхностей скольжения и определение КЗУ для секторальных моделей на конечной глубине карьера.

Сурет 3. Карьердің соңғы тереңдігінде орын ауыстырудың бөлу, сырғу беттерін локализациялау және салалық модельдер үшін ТКҚ анықтау.

Figure 3. Distribution of displacements, localization of sliding surfaces and determination of the KZU for sector models at the final depth of the quarry.

Так, для секторов Южный (S) и Восточный (E) КЗУ в соответствующих моделях снизился до значения 1.47 и 1.49 против значения 1.53 для обобщенной модели конечного контура карьера. То есть, КЗУ снизился на 2.5–3.9% только за счет более точного представления линии уступов. Включение в модели слоев с различными физико-механическими свойствами обусловило снижение КЗУ в секторе Южный (S) до значения 1.38, то есть на 9.6%, в секторе «Восточный» (E) – до 1.4, то есть на 8.5%.

Полученные результаты показывают, что конечные контуры карьера удовлетворяют нормам проектирования по геомеханическому фактору. Угол откоса бортов, обеспечивающий их устойчивое состояние, находится в пределах 29–30°.

Несмотря на то, что КЗУ = 1.38 не ниже нормативного $KZU_n = 1.3$, ситуация с обеспечением устойчивости борта на нижних горизонтах должна постоянно контролироваться маркшейдерской службой с привлечением геофизических методов. Значение КЗУ = 1.38 получено на основе детерминистического подхода, где вариация физико-механических свойств не учитывается. При этом множество авторов сфокусированы на вероятностной оценке потери устойчивости [8, 9], которая показывает, что за счет стохастического разброса свойств показатель устойчивости также варьирует в диапазоне, который функционально связан с диапазоном вариации свойства пород. Поэтому оптимизация карьерных контуров не предполагает выполнение борта карьера как из соображений безопасности (снижение запаса устойчивости ниже нормативного) и экономических (ограничение коэффициента вскрыши), так и экологических (ограничение разноса бортов и горного отвода).

Следует отметить успешность геомеханических прогнозов, которые не только строятся на апробированных алгорит-

мах (в частности, МКЭ) и программном обеспечении, но и верифицируются полным комплексом изыскательских работ с применением аэрофотосъемки [10], расшифровки космических снимков с привлечением методов искусственного интеллекта, сейсмоакустического прогноза.

Выводы

Для условий сверхглубокого карьера, имеющего округлую форму, показана целесообразность двухуровневого математического моделирования на основе численных методов, в частности МКЭ. Последнее означает создание макромодели всей чаши карьера и определение на ее основе участков борта, где потенциальное формирование поверхности скольжения наиболее вероятно. Более точная оценка устойчивости бортов по всему периметру карьера требует разделения макромодели на отдельные секторы с детальным моделированием линии уступов и слоистой структуры породно-грунтового массива. Уменьшение

масштаба секторальных моделей, то есть более детальное отображение геометрии борта, привело к снижению показателя устойчивости борта в пределах 2.5–3.8% по сравнению с тем минимальным КЗУ, который получен для макромодели. Моделирование в секторальных моделях слоистой структуры массива обусловило снижение КЗУ на 12–13% по сравнению с макромоделью в тех секторах, где структура массива включала более слабые породы, в частности песчаник.

Благодарность

Работа выполнена по проекту грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP26198535 «Обеспечение безопасного подземного извлечения драгоценных металлов на основе цифрового моделирования сети пересекающихся выработок и анализа большого массива данных».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Численное моделирование устойчивости карьера на основе вероятностного подхода / Молдабаев С.К. [и др.] // Научный вестник Национального горного университета. 2021. Т. 6. С. 29–34 (на английском языке)
2. Калибровка трехмерной оценки устойчивости склона в бразильском железном карьере / Торрес В.Ф.Н. [и др.] // Геотехническая и геологическая инженерия. 2023. Т. 41 (6). С. 3829–3846 (на английском языке)
3. Ван С., Чжан Ц., Ван С. Прогнозирование коэффициента устойчивости откосов карьера на основе алгоритма глубокого обучения искусственного интеллекта // Sci Rep. 2023. Т. 13. С. 1201 (на английском языке)
4. Влияние всасывания почвенной матрицы на устойчивость склона под различными типами растительности / Ван С. [и др.] // J Soils Sediments. 2024. Т. 24. С. 575–588 (на английском языке)
5. 3D предельный анализ скальных склонов на основе эквивалентного линейного критерия разрушения с отсечкой по напряжению / Чжибин Сан [и др.] // Журнал механики горных пород и геотехнической инженерии. 2023. Т. 15 (12). С. 3118–3130 (на английском языке)
6. Демирдоген С., Йилдирим С. Фактор возмущения критерия разрушения Хука-Брауна в основаниях плотин // Geotech Geol Eng. 2024. Т. 42. С. 817–882 (на английском языке)
7. Дехган А.Н., Язди А. Геомеханическое исследование для оптимизации окончательного дизайна откоса карьера Шадан, Иран // Indian Geotech. 2023. Т. 53. С. 859–887 (на английском языке)
8. Установка параметров прочности при анализе устойчивости откоса открытого карьера с использованием метода случайного набора на шахте по добыче лигнита Белхатув, Центральная Польша / Пилецка Е. [и др.] // Energies. 2021. Т. 14 (15). С. 46090 (на английском языке)
9. Абдулаи М., Шарифзаде М. Вероятностные методы проектирования устойчивости откосов карьеров: обзор // Geosciences (Швейцария). 2021. Т. 11 (8). С. 319 (на английском языке)
10. Анализ временных рядов с помощью инфракрасной съемки для мониторинга устойчивости склонов с использованием Sentinel-1 при открытой разработке месторождений / Хаупт С. [и др.] // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2023. Т. XLVIII-1/W2-2023. С. 945–951 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Ықтималдық тәсілге негізделген карьер тұрақтылығын сандық модельдеу / Молдабаев С.Қ. [және т. б.] // Тау-кен ісі ұлттық университетінің ғылыми хабаршысы. 2021. Т. (6). Б. 29–34 (ағылшын тілінде)
2. Бразилиялық темір карьеріндегі еңіс тұрақтылығын үш өлшемді бағалауды калибрлеу / Торрес В.Ф.Н. [және т. б.] // Геотехникалық және геологиялық инженерия. 2023. Т. 41 (6). Б. 3829–3846 (ағылшын тілінде)
3. Ван С., Чжан З., Ван С. Жасанды интеллект терең оқыту алгоритмі негізінде карьер еңісінің тұрақтылық коэффициентін болжау // Sci Rep. 2023. Т. 13. Б. 1201 (ағылшын тілінде)
4. Топырақ матрицасының соруының өсімдіктердің әртүрлі түрлері кезіндегі еңіс тұрақтылығына әсері / Ван С. [және т. б.] // J Soils Sediments. 2024. Т. 24. Б. 575–588 (ағылшын тілінде)
5. Кернеу кесіндісі бар эквивалентті сызықтық бұзылу критерийіне негізделген тау жыныстарының беткейлерінің 3D шекті талдауы / Жибин Сун [және т. б.] // Тау жыныстары механикасы және геотехникалық инженерия журналы. 2023. Т. 12 (15). Б. 3118–3130 (ағылшын тілінде)

6. Демирдоген С., Йылдырым С. Бөгет негіздеріндегі Хук-Браун бұзылу критериясының бұзылу факторы // *Geotech Geol Eng.* 2024. Т. 42. Б. 817–882 (ағылшын тілінде)
7. Дехган А.Н., Йазди А. Шадан карьері еңісінің түпкілікті жобасын оңтайландыру үшін геомеханикалық зерттеу, Иран // *Indian Geotech.* 2023. Т. 53. Б. 859–887 (ағылшын тілінде)
8. Белхатув қоңыр көмір кенішінде кездейсоқ орнату әдісін қолдана отырып, ашық карьердегі еңіс тұрақтылығын талдау кезінде беріктік параметрлерін орнату, Орталық Польша / Пилецка Е. [және т. б.] // *Energies.* 2021. Т. 14 (15). Б. 46090 (ағылшын тілінде)
9. Абдулай М., Шарифзаде М. Карьер беткейлерінің тұрақтылығын жобалаудың ықтималдық әдістері: шолу // *Geosciences (Швейцария).* 2021. Т. 11 (8). Б. 319 (ағылшын тілінде)
10. Ашық тау-кен өндірісінде Sentinel-1 көмегімен көлбеу тұрақтылығын бақылау үшін инфрақызыл уақыт серияларын талдау / Хаунт С. [және т. б.] // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2023. Т. XLVIII-1/W2-2023. Б. 945–951 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Numerical simulation of the open pit stability based on probabilistic approach / Moldabayev S.K. [et al.] // *Scientific Bulletin of the National Mining University.* 2020. V. 6. 29–34 pp. (in English)
2. Calibration of a Three-dimensional Slope Stability Evaluation in Brazilian iron Open Pit Mine / Torres V.F.N. [et al.] // *Geotechnical and Geological Engineering.* 2023. V. 41 (6). 3829–3846 pp. (in English)
3. Wang S., Zhang Q., Wang S. Prediction of quarry slope stability coefficient based on deep learning algorithm of artificial intelligence // *Sci Rep.* 2023. V. 13. 1201 p. (in English)
4. Contribution of soil matric suction on slope stability under different vegetation types / Wang X. [et al.] // *J Soils Sediments.* 2024. V. 24. 575–588 pp. (in English)
5. 3D limit analysis of rock slopes based on equivalent linear failure criterion with tension cut-off / Zhibin Sun [et al.] // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2023. V. No. 15 (12). 3118–3130 pp. (in English)
6. Demirdogen S., Yildirim S. The Disturbance Factor of Hoek-Brown Failure Criterion in Dam Foundations // *Geotech Geol Eng.* 2024. V. 42. 817–882 pp. (in English)
7. Dehghan A.N., Yazdi A. A Geomechanical Investigation for Optimizing the Ultimate Slope Design of Shadan Open Pit Mine, Iran // *Indian Geotech.* 2023. V. 53. 859–887 pp. (in English)
8. Setting strength parameters in open pit slope stability analysis using random sampling method at Belchatow lignite mine, Central Poland / Pilecka E. [et al.] // *Energies.* 2021. V. 14 (15). 46090 p. (in English)
9. Abdulai M., Sharifzadeh M. Probability methods for stability design of open pit rock slopes: An overview // *Geosciences (Switzerland).* 2021. V. 11 (8). 319 p. (in English)
10. Time series insar analysis for slope stability monitoring using sentinel-1 in open pit mining / Haupt S. [et al.] // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2023. V. XLVIII-1/W2-2023. 945–951 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Молдабаев С.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), s.moldabayev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8913-9014>

Асылханова Г.Н., магистр технических наук, докторант кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), g.assylkhanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-9533-7148>

Молдабаев А.С., магистр технических наук, докторант кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), Moldabayev.A@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0005-1997-263X>

Асылханова С.А., магистр технических наук, докторант кафедры «Горное дело» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), s.assylkhanova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-2385-161X>

Авторлар туралы мәліметтер:

Молдабаев С.К., т.ғ.д., профессор, Satbayev University тау-кен инженериясы кафедрасының меңгерушісі (Алматы қ., Қазақстан)

Асылханова Г.Н., техника ғылымдарының магистрі, тау-кен ісі кафедрасының докторанты Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Молдабаев А.С., техника ғылымдарының магистрі, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Асылханова С.А., техника ғылымдарының магистрі, тау-кен ісі кафедрасының докторанты Satbayev University тау-кен ісі кафедрасының докторанты (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Moldabayev S.K., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Mining Department, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Assylkhanova G.N., Master of Engineering Sciences, Doctoral Student, Mining Department, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Moldabayev A.S., Master of Engineering Sciences, Doctoral Student, Mining Department, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Assylkhanova S.A., Master of Engineering Sciences, PhD student, Department of Mining, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)