

Код МРНТИ 52.01.05

Г. С. Мадимарова¹, *Д. Н. Сулейменова², Т. Б. Нурпеисова¹, А. Е. Ормамбекова¹¹Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан),²Казахский национальный университет им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГОРНОГО МАССИВА В ПРИБОРТОВОЙ ЗОНЕ КАРЬЕРА

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного геодезического и геомеханического исследования устойчивости бортов карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» фосфоритноносного бассейна Каратау. Исследование основано на интеграции ГНСС-наблюдений, аэрогеодезической съемки БПЛА, лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния массива. Сформирован цифровой геомеханический двойник карьера, включающий облако точек, цифровую модель рельефа и конечно-элементную модель по критерию Кулона – Мора. Коэффициент устойчивости борта, определенный методом касательных сил, составил $K_y = 1,333$, что превышает нормативное значение 1,25. Выявлен потенциально опасный юго-западный участок и сформирован его геодинамический риск-профиль. Результаты исследования могут быть использованы при организации геодезического мониторинга и прогнозирования деформационных процессов при открытой разработке месторождений.

Ключевые слова: геомеханическое моделирование, цифровой геомеханический двойник, интегральный индекс устойчивости, морфодинамическая сегментация, ГНСС-мониторинг, метод касательных сил, напряженно-деформированное состояние.

Карьердің борт маңы аймағындағы тау жыныстары массивінің тұрақтылығын геомеханикалық модельдеу және басқару

Аңдатпа. Мақалада Каратау фосфорит бассейніндегі «Каратау-1» және «Каратау-2» карьерлері борттарының тұрақтылығын кешенді геодезиялық және геомеханикалық зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеу ГНСС бақылауларын, БПЛА арқылы аэрогеодезиялық түсірілімді, лазерлік сканерлеуді және тау жыныстары массивінің кернеу-деформациялық күйін шектеулі элементтер әдісімен модельдеуді біріктіруге негізделген. Карьердің нүктелер бұлттын, сандық рельеф моделін және Кулон – Мор критерийі бойынша құрылған шектеулі элементтер моделін қамтитын цифрлық геомеханикалық егізі жасалды. Жанама күштер әдісімен анықталған борт тұрақтылығы коэффициенті $K_y = 1,333$ болып, нормативтік 1,25 мәнінен жоғары екені анықталды. Потенциалды қауіпті оңтүстік-батыс учаске анықдалып, оның геодинамикалық тәуекел профілі қалыптастырылды. Зерттеу нәтижелері ашық кен өндіру жағдайында геодезиялық мониторингті ұйымдастыру мен деформациялық процестерді болжауда қолданылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: геомеханикалық модельдеу, сандық геомеханикалық егіз, интегралды тұрақтылық индексі, морфодинамикалық сегментация, ГНСС мониторинг, тангенциалдық күш әдісі, кернеу-деформациялық күй.

Geomechanical modelling and management of rock mass stability in the peripheral zone of an open-pit mine

Abstract. The article presents the results of a comprehensive geodetic and geomechanical study of slope stability at the Karatau-1 and Karatau-2 open-pit mines of the Karatau phosphorite basin. The study is based on the integration of GNSS observations, UAV aerial surveying, laser scanning, and finite element modeling of the stress-strain state of the rock mass. A digital geomechanical twin of the quarry was created, including a point cloud, a digital terrain model, and a finite element model based on the Coulomb – Mohr criterion. The slope stability factor determined by the tangential force method was $K_y = 1.333$, exceeding the standard value of 1.25. A potentially hazardous southwestern section was identified, and its geodynamic risk profile was developed. The obtained results can be used for organizing geodetic monitoring and forecasting deformation processes during open-pit mining operations.

Key words: geomechanical modeling, digital geomechanical twin, integral stability index, morphodynamic segmentation, GNSS monitoring, tangential force method, stress-strain state.

Введение

Освоение фосфоритоносных месторождений Каратау-ского бассейна сопровождается формированием сложной геомеханической обстановки, обусловленной моноклиналильным залеганием рудных тел, выраженной расчлененностью рельефа и неоднородностью физико-механических характеристик массива. В условиях интенсивной открытой разработки возрастает необходимость перехода от локальных расчетов устойчивости к созданию интегрированной пространственно-аналитической модели массива.

Современная концепция геомеханического сопровождения горных работ предполагает формирование цифрового геомеханического двойника объекта – динамической трехмерной модели, объединяющей данные инструментальных измерений, дистанционного зондирования и численного анализа. Такой подход позволяет перейти от статической оценки коэффициента запаса устойчивости к формированию геодинамического риск-профиля борта карьера.

Цель исследования – разработка комплексной методики оценки устойчивости карьерных откосов на основе синтеза ГНСС-позиционирования, аэролазерного сканирования и конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния массива с введением интегральных показателей устойчивости.

Методы и материалы

Объект исследования

Объектом исследования являются горные выработки открытого типа, расположенные в юго-восточной части фосфоритоносного бассейна Каратау на территории Таласского района Жамбылской области Республики Казахстан, разрабатываемые карьерами «Каратау-1» (Шиилибулак) и «Каратау-2» (Аксай) (рис. 1).

Основными полезными ископаемыми являются фосфатные и кремнистые руды, использующиеся для производства желтого фосфора и концентрированных удобрений [1].

Мощность рудных тел (при нормальном залегании) колеблется от 5,74 м до 21,2 м, суммарная мощность фосфоритных слоев достигает 45 м. Четкой закономерности в изменчивости мощности по падению и простиранию не наблюдается. Рудные тела представляют собой моноклиналино падающий пласт фосфоритов с опрокинутым залеганием на юго-запад под углами 60° – 80° .

В пределах месторождения широко развиты наносы, представленные элювиальными, пролювиальными и аллювиальными образованиями, перекрывающими чехлом породы малокарской и чулактауской свиты. Наносы развиты в пределах долинной части месторождения и их мощность изменяется от 1,5 до 40 м.



Рис. 1. Пространственная 3D-визуализация карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» с размещением опорных геодезических пунктов.

Сурет 1. Каратау-1 және Каратау-2 карьерлерінің кеңістіктік 3D визуализациясы, эталондық геодезиялық нүктелердің орналасқан жерімен.

Figure 1. Spatial 3D visualization of the Karatau-1 and Karatau-2 quarries with the location of reference geodetic points.

В настоящее время на месторождении Каратау 1 ведутся горнопроходческие и добычные работы открытым способом, а на месторождении Каратау 2 – как открытым, так и подземным способом.

Фосфоритовые рудные тела приурочены к моноклинально падающим пластам с опрокинутым залеганием в юго-западном направлении и углами падения 60° – 80° . Значительная крутизна залегания определяет специфику формирования карьерного контура, параметры уступов и объемы вскрышных работ, оказывая существенное влияние на проектирование системы разработки.

Мощность отдельных рудных пластов при условно нормальном залегании изменяется в пределах от 5,74 до 21,2 м, при этом суммарная мощность фосфоритных горизонтов достигает 45 м. Пространственная изменчивость мощности по простиранию и падению носит неупорядоченный характер, что указывает на структурную и литологическую неоднородность массива.

Карьер «Каратау-1» (открытый способ разработки)

Глубина вскрытия рудных тел относительно дневной поверхности составляет 10–25 м в пределах склоновых участков. В долинных зонах, где развиты элювиально-пролювиальные отложения, глубина залегания увеличивается и может достигать 40 м.

Максимальная текущая глубина горных работ по рельефу составляет порядка 180–200 м. Средняя глубина расположения промышленного горизонта в пределах действующей выемки варьирует в диапазоне 35–60 м относительно условной отметки верхней бровки.

Карьер «Каратау-2» (комбинированная схема разработки)

Начальное залегание рудных тел фиксируется на глубинах 15–30 м. В центральной части карьера глубина промышленного горизонта увеличивается до 70–90 м, а в зонах перехода к подземной отработке превышает 100 м.

С учетом совмещенной открыто-подземной схемы разработки максимальная глубина горных работ достигает 220–240 м.

Перекрывающие наносные образования характеризуются значительной изменчивостью мощности: от 1,5 м на

склоновых участках до 40 м в пределах долинных понижений. Данная вариабельность оказывает влияние на глубину вскрытия руд и формирование локальных геомеханических условий.

На рис. 2 показано изменение глубины залегания по простиранию.

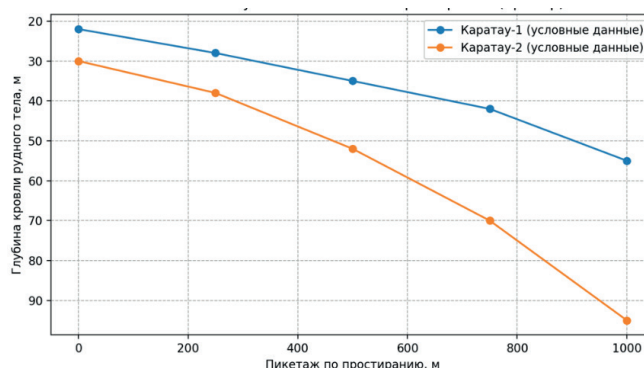


Рис. 2. Изменение глубины залегания по простиранию.

Сурет 2. Жатпа бағыты бойымен тереңдіктің өзгеруі.

Figure 2. Change in depth along strike.

Пространственные параметры залегания представлены в таблице 1.

Значительные углы падения рудных пластов (60° – 80°) в сочетании с большой глубиной горных работ обуславливают рост горного давления и интенсификацию напряженного состояния массива. В нижних частях бортов карьера формируются зоны концентрации главных сжимающих напряжений σ_1 , что повышает вероятность развития глубинных поверхностей скольжения.

Увеличение глубины разработки существенно влияет на характер перераспределения напряженно-деформированного состояния массива, отражаясь на устойчивости уступов и способствуя формированию потенциальных оползневых клиньев в пределах ослабленных структурных зон.

Таблица 1
Пространственные параметры залегания

Таралудың кеңістіктік параметрлері

Spatial parameters of occurrence

Показатель	Каратау-1	Каратау-2
Угол падения пласта	60°–80°	60°–80°
Мощность рудного тела	5,74–21,2 м	6–22 м
Суммарная мощность горизонтов	до 45 м	до 45 м
Глубина промышленного горизонта	35–60 м	50–90 м
Максимальная глубина разработки	200 м	220–240 м
Мощность наносов	1,5–40 м	2–35 м

Методы исследования

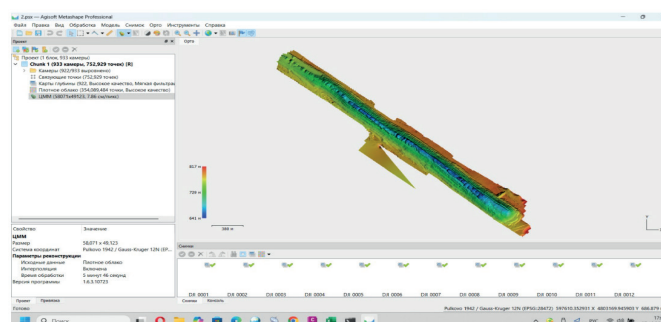
Измерения выполнялись ГНСС оборудованием в режиме Статика, методом сетевого позиционирования. В процессе работы соблюдены следующие необходимые условия наблюдений: максимальное расстояние между приемниками 5,0 км; минимальное количество наблюдаемых спутников для обработки 8; интервал записи 5 сек; маска по углу возвышения 10 градусов; точность получения координат: в плане 0,002 м; по высоте 0,002 м; GDOP (геометрия спутников) менее 5; длительность наблюдений на точке 80 минут. Параметры трансформации с WGS-84 в местную систему координат и высот приведены на рисунке 3 м [2].

Съемка БПЛА была обработана в Agisoft Metashape. Съемка со сканера обработана в Reconstructor. Обе съемки соединены в одно ПО Cloud Compare. Облако точек и 3D модель созданы на основе двух средств измерений (сканер + БПЛА) и представлены на рис. 3.

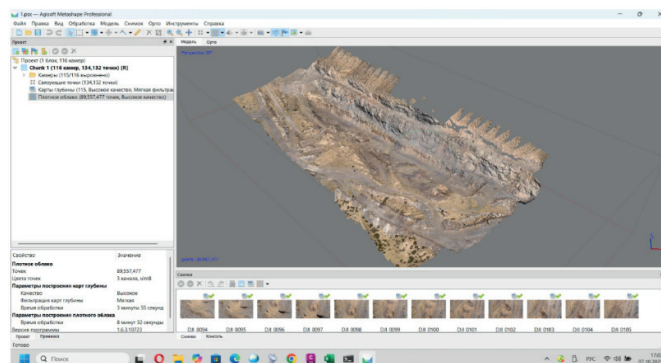
Построена цифровая модель рельефа (ЦМР / DEM) с градиентной цветовой кодировкой абсолютных высот, позволяющая наглядно отразить форму выработки и бортов карьера, а также выполнить количественный анализ перепадов высот, уклонов и потенциально опасных зон деформаций (рис. 3а, 3б). Красно-оранжевые тона соответствуют наибольшим отметкам верхней бровки борта, желто-зеленые – промежуточным уровням уступов, синие и голубые – пониженным участкам откосов и зонам возможной концентрации деформаций [3, 4].

Для построения геомеханической модели использованы оцифрованные контуры карьеров «Каратау-1» (Шилибулак) и «Каратау-2» (Аксай) месторождения фосфоритоносного бассейна Каратау. Путем их совмещения в единой системе координат сформирована трехмерная конечно-элементная модель массива. Граничные условия заданы следующим образом: плоскость XY закреплена по осям X , Y и Z ; плоскость YZ – по осям X и Y ; плоскость XZ – по оси Y .

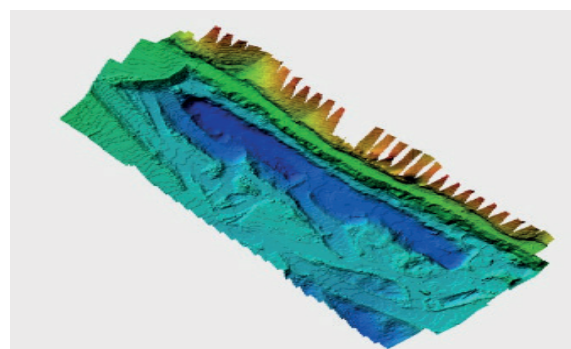
Определение напряженно-деформированного состояния массива и коэффициента запаса устойчивости бортов карьера выполнено методом конечных элементов в упруго-пластической постановке с использованием критерия



а



б



в

Рис. 3. 3D модель месторождения фосфоритоносного бассейна Каратау.

Сурет 3. Каратау фосфориттік бассейнінің кен орнының 3D моделі.

Figure 3. 3D model of the Karatau phosphate-bearing basin deposit.

прочности Кулона – Мора, реализованного в программном комплексе Geostab.

В ходе визуального обследования карьерных откосов карьера «Каратау-1» выявлены ослабленные участки. Физико-механические характеристики ослабленного участка откоса высотой 15 м по данным геологоразведочных работ приведены в таблице 2.

По результатам расчета установлено, что поверхность скольжения имеет кругло-цилиндрический характер с координатами центра $X_c = 43,80$ м и $Y_c = 109,19$ м при радиусе $R = 7,89$ м. Расчет устойчивости борта выполнен методом касательных сил. Полученный коэффициент устойчивости составляет 1,333, что превышает допустимое нормативное значение 1,25, вследствие

чего рассматриваемый участок откоса можно считать устойчивым.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтов

Кесте 2

Топырақтың физикалық және механикалық қасиеттері

Table 2

Physical and mechanical characteristics of soils

№ ИГЭ	Наименование грунта	ρ , г/см ³ плотность грунта	c , кПа удельное сцепление грунта	φ , град угол внутреннего трения
	Суглинок	2.65	25.0	23.0
	Известняк	2.70	500.0	38.0
	Доломит	2.89	420.0	35.0
	Песчаник	2.78	70.0	33.0

Площадь призмы возможного сдвижения составляет 33,52 м², при этом расчетная схема включает 30 элементарных призм, что обеспечивает достаточную детальность анализа. Направление возможного сдвига породного массива характеризуется движением слева направо, что соответствует геометрии откоса и ориентации поверхности скольжения [5, 6].

В целом результаты расчета подтверждают наличие достаточного запаса устойчивости откоса и позволяют использовать полученные параметры для дальнейшей инженерно-геомеханической интерпретации и мониторинга.

Результаты

На основе интеграции данных ГНСС-наблюдений, БПЛА и лазерного сканирования сформирована высокоточная цифровая модель рельефа (DEM) с плотностью облака точек, обеспечивающей детальность анализа уступов и бортов карьера [7–9].

По результатам выполненного морфометрического анализа установлено, что разность абсолютных отметок между верхней бровкой и подошвой откоса достигает 200 м. Средние значения углов наклона бортов изменяются в пределах 32–41°, при этом на юго-западном участке выявлены локальные зоны увеличения крутизны до 44°, что свидетельствует о формировании морфодинамически напряженных сегментов откоса.

Выполненное конечно-элементное моделирование в упруго-пластической постановке позволило выявить характер перераспределения главных напряжений в пределах исследуемого откоса.

Анализ полученных результатов показал, что максимальные касательные напряжения локализуются в средней части откоса, тогда как концентрация главных сжимающих напряжений σ_1 формируется преимущественно в основании борта. В зоне контакта рыхлых наносов с коренными породами фиксируется область пониженной прочности, характеризующаяся снижением сопротивления сдвигу и повышенной деформационной восприимчивостью.

Установлен эффект геомеханической анизотропии массива, обусловленный различием физико-механических свойств фосфоритов, известняков и доломитов. Литологическая неоднородность и контраст прочностных параметров способствуют формированию потенциальной поверхности скольжения кругло-цилиндрического типа.

Расчетная поверхность скольжения характеризуется следующими параметрами: координаты центра $X_c = 43,80$ м и $Y_c = 109,19$ м, радиус $R = 7,89$ м. Площадь призмы возможного сдвижения составляет 33,52 м², а ее ориентировочный объем – 168–185 м³ с учетом средней мощности вовлеченного массива.

Для выявления потенциально опасной поверхности скольжения выполнено сечение 3D модели по наиболее опасному участку. Потенциальная поверхность скольжения представлена на рис. 4.

Для оценки устойчивости откоса использована методика предельного равновесия с разбиением призмы возможного сдвижения на элементарные отсеки. Каждый отсек рассматривается как самостоятельный расчетный элемент с осредненными геометрическими и физико-механическими характеристиками грунта (таблица 3).

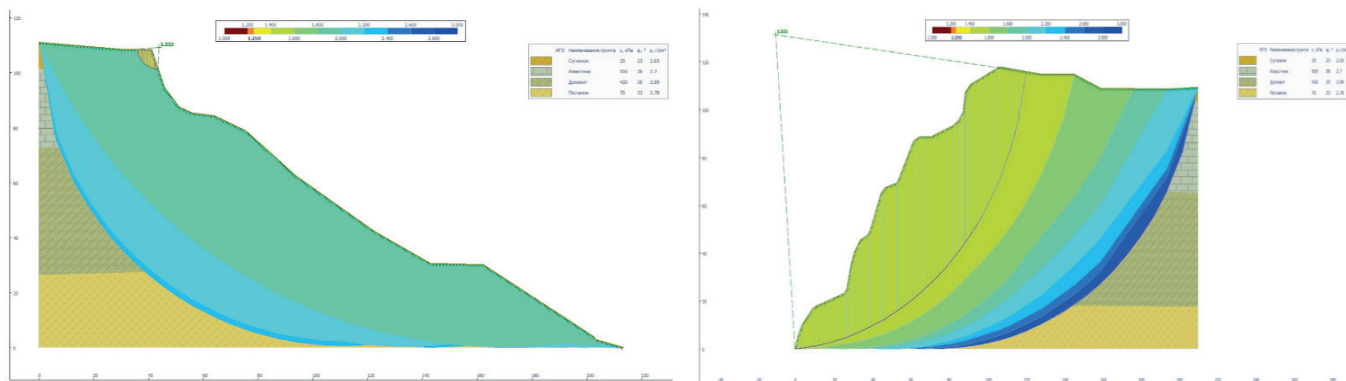


Рис. 4. Поверхность скольжения.

Сурет 4. Беттік жылжыма.

Figure 4. Sliding surface.

Таблица 3

Таблица расчета коэффициента устойчивости. Метод касательных сил

Кесте 3

Тұрақтылық коэффициентін есептеу кестесі. Жанама күш әдісі

Table 3

Stability coefficient calculation table. Tangential force method

Порядковый номер отсека	$T_{акт\ i}$ кН/м касательная проекция к основанию i-го отсека равнодействующей внешних сил	$T_{реакт\ i\ тр/сцепл.}$ кН/м касательная проекция равнодействующей сил трения и сцепления i-го отсека	$T_{реакт\ i\ арм.}$ кН/м касательная проекция равнодействующей сил от армирующих элементов i-го отсека	$T_{реакт\ i}$ кН/м касательная проекция всех реактивных сил i-го отсека	$\Delta E_{оп\ i}$ кН/м изменение оползневое давления в пределах i-го отсека $\Delta E_{оп\ i} = K_{акт} * T_{акт\ i} - T_{реакт\ i}$	$E_{оп\ i}$ кН/м оползневое давление i-го отсека. $E_{оп\ i} = \sum \Delta E_{оп\ i}$
1–20	441.9	588.9	0.0	588.9	0.0	

На основании комплексного анализа введен показатель – геодинамический риск-профиль участка, учитывающий: коэффициент запаса устойчивости, градиент высот, концентрацию касательных напряжений и наличие ослабленных зон.

Юго-западный участок отнесен к категории потенциально активных сегментов второго уровня риска, что не требует немедленного укрепления, но предполагает усиленный инструментальный мониторинг.

Таблица 4

Обобщенный количественный итог

Кесте 4

Қорытынды сандық нәтижелер

Table 4

Summary quantitative results

Показатель	Значение
Коэффициент устойчивости K_y	1,333
Нормативное значение	1,25
Резерв устойчивости	6,64%
Радиус поверхности скольжения	7,89 м
Площадь призмы сдвига	33,52 м ²
Количество отсеков	30
Максимальный угол откоса	до 44°

Получен коэффициент устойчивости:

$$K_y = \Sigma T_{реакт\ i} / \Sigma T_{акт\ i}$$

$$K_y = 588.9 / 441.9 = 1.333$$

Результаты расчета методом касательных сил: призма возможного сдвига разбита на 30 элементарных отсеков, что обеспечило высокий уровень дискретизации расчетной схемы.

Суммарные значения: $\Sigma T_{акт} = 441,9$ кН/м; $\Sigma T_{реакт} = 588,9$ кН/м; $K_y = 1,333$.

Полученный коэффициент превышает нормативное значение 1,25, что соответствует категории «устойчивое состояние с допустимым геодинамическим резервом» [10–12].

Дополнительно рассчитан:

коэффициент структурного резерва устойчивости (K_{sr})

$$K_{sr} = \frac{K_y - K_{norm}}{K_{norm}} = 0,0664,$$

что соответствует резерву устойчивости 6,64%.

Комплексный анализ геометрических, геомеханических и расчетных параметров позволил сформировать интегрированную количественную характеристику устойчивости бортов карьеров Бассейна Каратау в таблице 4.

Обсуждение результатов

Полученное значение коэффициента устойчивости свидетельствует о наличии достаточного запаса прочности, однако морфодинамический анализ указывает на локальные зоны перераспределения напряжений.

Интеграция данных БПЛА и лазерного сканирования позволила повысить точность построения геометрии откоса и минимизировать аппроксимационные погрешности конечно-элементной модели.

Применение цифрового геомеханического двойника обеспечивает переход от дискретной оценки устойчивости к динамическому мониторингу. Выявленный юго-западный участок характеризуется повышенной концентрацией касательных напряжений и требует включения в приоритетный контур наблюдений.

Предложенный интегральный индекс устойчивости позволяет учитывать не только коэффициент запаса, но и пространственные характеристики массива, что расширяет аналитический инструментарий геомеханической интерпретации.

Выводы

Выполненное исследование, представленное в работе «Геомеханическое моделирование и управление устойчивостью горного массива в приборотовой зоне карьера», позволило сформировать научно обоснованную мето-

дическую основу оценки устойчивости бортов карьеров «Каратау-1» и «Каратау-2» фосфоритоносного бассейна Каратау.

Установлено, что сложные геолого-структурные условия месторождения – крутое моноклинальное залегание рудных пластов (60–80°), значительная глубина разработки (до 240 м), изменчивая мощность рудных тел и наносных образований – формируют напряженное и пространственно неоднородное состояние массива. Численное моделирование в упруго-пластической постановке по критерию Кулона – Мора выявило зоны концентрации главных напряжений в нижних частях бортов и подтвердило возможность формирования кругло-цилиндрической поверхности скольжения.

Расчет устойчивости методом касательных сил показал коэффициент запаса устойчивости $K_u = 1,333$, что превышает нормативное значение 1,25 и соответствует категории устойчивого состояния с допустимым геодинамическим резервом (6,64%). При этом морфометрический и геомеханический анализ позволил выделить юго-западный участок как сегмент повышенной геодинамической чувствительности второго уровня риска, требующий усиленного инструментального контроля.

Интеграция ГНСС-наблюдений, БПЛА, лазерного сканирования и конечно-элементного моделирования позволила сформировать цифровой геомеханический двойник карьера, обеспечивающий переход от статической оценки устойчивости к адаптивному мониторингу и прогнозированию деформационных процессов.

Таким образом, предложенный комплексный подход к геомеханическому моделированию и управлению устойчивостью горного массива обеспечивает повышение надежности инженерных решений, позволяет своевременно выявлять потенциально опасные зоны и может быть рекомендован для внедрения в практику геомеханического сопровождения открытых горных работ в условиях Каратауского фосфоритоносного бассейна.

Благодарность

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета Науки Министерства науки и высшего образования РК в рамках грантового финансирования ИРН №АР23489372 «Исследование геотехнического состояния горного массива и разработка методики геомеханического комплексного мониторинга для прогноза деформационных процессов при освоении недр».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Передовые методы топографической и геодезической съемки и GNSS в городском планировании / G. Madimarova [и др.] // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – С. 1–14 (на английском языке)
2. Проверка точек государственной геодезической сети и ГНСС-мониторинг в Казахстане / G. Madimarova [и др.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Т. 1. – С. 179–189 (на английском языке)
3. Исследование изменений окислительно-восстановительного потенциала при обогащении окисленных полиметаллических руд / A. Mambetaliyeva [и др.] // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Т. 15. – С. 1–12 (на английском языке)
4. Мадимарова Г. С. Инновационные подходы к геомеханическому мониторингу при разработке минеральных ресурсов : монография. – Алматы: Изд-во Казахский технологический университет имени К. И. Сатпаева, 2024. – 157 с. (на казахском языке)
5. Нурпеисова М. Б. [и др.] Экологическая и промышленная безопасность освоения недр. – Алматы: Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, 2016. – 456 с. (на русском языке)
6. Трубецкой К. Н. Состояние и основные направления комплексного освоения и сохранения ресурсов земных недр // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: IV Междунар. науч. конф. ИПКОН РАН*. – М., 2020. – С. 5–11 (на русском языке)
7. Нурланқызы Т., Сулейменова Д. Н., Жантуева Ш. А. Изучение физико-механических свойств пород месторождения бассейна Каратау // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2024. – № 2. – С. 46–50 (на русском языке)
8. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Э. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений // *ФТПРПИ*. – 2018. – № 5. – С. 33–44 (на русском языке)
9. Проект № АР23489372 «Исследование геотехнического состояния горного массива и разработка методики геомеханического комплексного мониторинга для прогноза деформационных процессов при освоении недр» (2024–2026 гг.) (на русском языке)
10. Использование индекса NDVI при мониторинге земель фосфоритовых месторождений / Г. С. Мадимарова [и др.] // *Вестник ВКТУ им. Д. Серикбаева*. – 2023. – № 3. – С. 88–96 (на русском языке)
11. Исследование влияния оставления пустой породы в выработанном пространстве на геомеханическое состояние горной массы, окружающей забой длинной стены / A. Smoliński [и др.] // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – С. 2–17 (на английском языке)

12. Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Обоснование рациональных параметров крепления кровли // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 1. – С. 19–26 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Қалалық жоспарлау саласындағы жетілдірілген топографиялық-геодезиялық түсірулер және FHCЖ әдістемелері / G. Madimarova [және т. б.] // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – Б. 1–14 (ағылшын тілінде)
2. Қазақстанда мемлекеттік геодезиялық желінің нүктелерін тексеру және GNSS мониторингін жүргізу / G. Madimarova [және т. б.] // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Б. 179–189 (ағылшын тілінде)
3. Тотықтырылған полиметалл рудаларын байыту кезіндегі тотықтыру–тотықсыздану потенциалының өзгерістерін зерттеу / Mambetaliyeva A. [және т. б.] // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Т. 15. – Б. 1–12 (ағылшын тілінде)
4. Мадимарова Г. С. Пайдалы қазбаларды игерудің геомеханикалық мониторинг жүргізудегі инновациялық тәсілдер : монография. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 2024. – 157 б. (қазақ тілінде)
5. Нұрпейісова М. Б. жалпы редакциясын басқарған. Жер қойнауын игерудің экологиялық және өнеркәсіптік қауіпсіздігі. – Алматы: Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, 2016. – 456 б. (орыс тілінде)
6. Трубецкой К. Н. Жер асты ресурстарын кешенді игеру мен сақтаудың жағдайы және негізгі бағыттары // Жер асты ресурстарын кешенді игеру мен сақтау мәселелері мен перспективалары: Ресей Ғылым академиясының академигі К. Н. Трубецкой атындағы IV Халықаралық ғылыми мектеп конференциясының материалдары. – Мәскеу: PFA IPKON, 2020. – Б. 5–11 (орыс тілінде)
7. Нұрланқызы Т., Сүлейменова Д. Н., Жантөева Ш. А. Қаратау бассейнінің кен орнындағы жыныстардың физикалық-механикалық қасиеттерін зерттеу // *Маркшейдерия және жер қойнауын пайдалану*. – 2024. – № 2. – Б. 46–50 (орыс тілінде)
8. Козырев А. А., Панин В. И., Семенова И. Е. Хибини апотит кен орындарының мысалында соққы қауіп бар жағдайларда тау-кен жұмыстарының геодинамикалық қауіпсіздігі туралы // *FTPRI*. – 2018. – № 5. – Б. 33–44 (орыс тілінде)
9. AR23489372 нөмірлі жоба «Тасты массаның геотехникалық жағдайын зерттеу және жер асты пайдалы қазбаларды өндіру кезінде деформациялық процестерді болжауға арналған кешенді геомеханикалық мониторинг әдістемесін әзірлеу» (2024–2026 жж.) (орыс тілінде)
10. Фосфат кен орындарындағы жерді мониторингтеуде NDVI индексін қолдану / Г. С. Мадимарова [және т. б.] // Д. Серікбаев Батыс Қазақстан техникалық университетінің хабаршысы. – 2023. – № 3. – Б. 88–96 (орыс тілінде)
11. Ұзақ қабырғалы бетті қоршаған тау жынысы массасының геомеханикалық күйіне қазып алынған кеңістікте қалған қалдық жыныстардың әсерін зерттеу / A. Smoliński [және т. б.] // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – Б. 2–17 (ағылшын тілінде)
12. Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Шатырдың болттық қосылыстарының ұтымды параметрлерін негіздеу // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 1. – Б. 19–26 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Advanced topographic-geodetic surveys and GNSS methodologies in urban planning / G. Madimarova et al. // *Journal of Applied Geodesy*. – 2024. – P. 1–14 (in English)
2. Inspection and carrying out GNSS monitoring of points of the state geodetic network in the territory of Kazakhstan / G. Madimarova et al. // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan Series of Geology and Technical Sciences*. – 2024. – Vol. 1. – P. 179–189 (in English)
3. Study of Oxidative–Reductive Potential Changes in the Enrichment of Oxidized Polymetallic Ores / A. Mambetaliyeva et al. // *Applied Sciences Switzerland*. – 2025. – Vol. 15. – P. 1–11 (in English)
4. Madimarova G. S. Innovative approaches to geomechanical monitoring in mineral resource development: monograph. – Almaty : Kazakh Technological University named after K. I. Satpayev, 2024. – 157 p. (in Kazakh)
5. Nurpeisova M. B. et al. *Jekologicheskaja i promyshlennaja bezopasnost' osvoenija nedr [Environmental and industrial safety of subsoil development]*. – Almaty: Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, 2016. – 456 p. (in Russian)
6. Trubeckoj K. N. *Sostojanie i osnovnye napravlenija kompleksnogo osvoenija i sohranenija resursov zemnyh nedr [Status and main directions of comprehensive development and conservation of subsoil]*

- resources]. In: *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya zemnyh neдр: materialy IV konferencii Mezhdunar. nauch. shkoly akad. RAN K. N. Trubeckogo [Problems and Prospects of Integrated Development and Conservation of Mineral Resources: IV International Scientific Conference of IPKON RAS]*. – Moscow: IPKON RAN, 2020. – P. 5–11 (in Russian)
7. Nurlanқызы Т., Sulejmenova D.N., Zhantueva Sh.A. *Izuchenie fiziko-mekhanicheskikh svojstv porod mestorozhdeniya bassejna Karatau [Study of the physical and mechanical properties of rocks in the Karatau basin deposit]. Marksheideriya i nedropol'zovanie [Mine Surveying and Subsoil Use]*. – 2024. – No. 2. – P. 46–50 (in Russian)
 8. Kozyrev A. A., Panin V. I., Semenova I. Je. *O geodinamicheskoy bezopasnosti gornyh rabot v udaroopasnyh usloviyah na primere Hibinskih apatitovyh mestorozhdenij [On the geodynamic safety of mining operations in shock-hazardous conditions, using the example of the Khibiny apatite deposits]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh [Physical and Technical Problems of Mineral Development]*. – 2018. – No. 5. – P. 33–44 (in Russian)
 9. *Proekt №AR23489372 «Issledovanie geotekhnicheskogo srostojanija gornogo massiva i razrabotki metodiki geomehanicheskogo kompleksnogo monitoringa dlja prognoza deformacionnyh processov pri osvoenii neдр» (2024–2026 gg.) [Research into the geotechnical stability of rock masses and development of a comprehensive geomechanical monitoring methodology for predicting deformation processes during subsoil development (2024–2026 gg.)]* (in Russian)
 10. *Ispol'zovanie indeksa NDVI pri monitoringe zemel' fosforitovyh mestorozhdenij [Use of the NDVI index in monitoring land with phosphate deposits]* G. S. Madimarova et al. // *Vestnik VKTU im. D. Serikbaeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University]*. – 2023. – No. 3. – P. 88–96 (in Russian)
 11. *Research into impact of leaving waste rocks in the mined-out space on the geomechanical state of the rock mass surrounding the longwall face* / A. Smoliński et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 2–17 (in English)
 12. *Tereshchuk R. M., Khoziaikina N. V., Babets D. V. Substantiation of rational roof-bolting parameters* // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – No. 1. – P. 19–26 (in English)

Сведения об авторах:

Мадимарова Г. С., к. т. н., ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), madimarovagulmira69@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9155-6332>

Сулейменова Д. Н., Ph.D, ст. преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, факультет географии и природопользования, кафедра «Картография и геоинформатика» (г. Алматы, Казахстан), suleymenovad81@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1880-0615>

Нурпеисова Т. Б., к. т. н., доцент, профессор, Горно-металлургический институт им. О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), t.nurpeissova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-8162-6053>

Ормамбекова А. Е., Ph.D, магистр техн. наук, ассоциированный профессор, Горно-металлургический институт имени О. А. Байконурова, КазННТУ им. К. И. Сатпаева (г. Алматы, Казахстан), a.ormambekova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-2735-0257>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мадимарова Г. С., т. ғ. к., қауымдастырылған профессор, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

Сулейменова Д. Н., Ph.D, аға оқытушы, Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби, география және табиғатты пайдалану факультеті, «Картография және геоинформатика» кафедрасы (Алматы қ., Қазақстан)

Нұрпеисова Т. Б., т. ғ. к., доцент, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институтының профессоры, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

Ормамбекова А. Е., Ph.D, техн. ғылымдарының магистрі, қауымдастырылған профессор, О. А. Байқоңыров атындағы тау-кен металлургия институты, ҚазҰТЗУ Қ. И. Сәтбаев (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Madimarova G. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, O. A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K. I. Satpayev KazNITU (Almaty, Kazakhstan)

Suleimenova D. N., Ph.D, Senior Lecturer, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Geography and Natural Sciences, Department of Cartography and Geoinformatics (Almaty, Kazakhstan)

Nurpeisova T. B., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor O.A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K.I. Satpayev KazNITU (Almaty, Kazakhstan)

Ormambekova A. E., Ph.D, Master of Technical Sciences, Associate Professor, O. A. Baikonurov Mining and Metallurgical Institute, K. I. Satpayev KazNTU (Almaty, Kazakhstan)