

Код МРНТИ 52.13.17

Д. Таханов^{1,2}, *А. Рымкулова^{1,2}, Б. Рахметов², М. Балпанова^{1,2}¹Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова (г. Караганда, Казахстан),²ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности» (г. Караганда, Казахстан)

КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ LEM И FEM ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РИСКОВ

Аннотация. В работе представлен анализ устойчивости откосов карьеров Жайремского месторождения с использованием методов предельного равновесия (LEM) и конечных элементов (FEM). Моделирование выполнено в Slide3 и RS3 с учетом выветрелых пород и воздействия подземных вод. Построены трехмерные модели бортов, рассчитаны коэффициенты устойчивости, определены зоны риска. FEM позволил точнее оценить напряженно-деформированное состояние массива. Интеграция LEM и FEM обеспечила более полную картину устойчивости склонов и применима при проектировании мер безопасности в горных работах. Материалы исследования могут быть полезны специалистам в области геомеханики, проектирования и эксплуатации карьеров, а также при подготовке инженерных кадров в области горного дела.

Ключевые слова: устойчивость откосов, LEM, FEM, выветрелые породы, подземные воды, моделирование, коэффициент запаса.

LEM және FEM әдістерін геомеханикалық тәуекелдерді бағалау үшін кешенді қолдану

Аннотация. Бұл жұмыста Жайрем кен орнының карьерлеріндегі еңістердің тұрақтылығы шекті тепе-теңдік әдісі (LEM) және шектік элементтер әдісі (FEM) арқылы талданған. Модельдеу Slide3 және RS3 бағдарламаларында, әлсіз жыныстар мен жер асты суларының әсерін ескере отырып жүргізілді. Үш өлшемді еңіс модельдері құрылып, тұрақтылық коэффициенттері есептелді және қауіп аймақтары анықталды. FEM әдісі жыныс массасының кернеулі-деформациялық күйін дәлірек бағалауға мүмкіндік берді. LEM және FEM әдістерін біріктіру еңістердің тұрақтылығы туралы толық көрініс алуға мүмкіндік беріп, тау-кен жұмыстарында қауіпсіздік шараларын жобалауда қолдануға болады. Зерттеу материалдары геомеханика, карьер жобалау және пайдалану саласындағы мамандарға, сондай-ақ тау-кен ісі бойынша инженерлік кадрларды даярлауға пайдалы болуы мүмкін.

Түйінді сөздер: еңістердің тұрақтылығы, шекті тепе-теңдік әдісі (LEM), шектік элементтер әдісі (FEM), үгілген жыныстар, жер асты сулары, модельдеу, қауіпсіздік коэффициенті.

Integrated application of LEM and FEM methods for geomechanical risk assessment

Abstract. The study presents an analysis of slope stability at the Zhairam deposit open pits using the Limit Equilibrium Method (LEM) and the Finite Element Method (FEM). Modeling was carried out in Slide3 and RS3, taking into account weathered rock and the influence of groundwater. Three-dimensional slope models were developed, stability factors calculated, and risk zones identified. FEM provided a more accurate assessment of the stress-strain state of the rock mass. The integration of LEM and FEM offered a more comprehensive view of slope stability and is applicable in designing safety measures for mining operations. The research findings may be useful for professionals in geomechanics, open-pit design and operation, as well as in the training of engineering personnel in the mining industry.

Key words: slope stability, LEM, FEM, weathered rocks, groundwater, modeling, safety factor.

Введение

В условиях интенсификации горнодобывающей деятельности и расширения географии эксплуатируемых месторождений возрастает значимость геотехнических исследований, направленных на обеспечение устойчивости откосов карьеров. Особую актуальность проблема приобретает для Жайремского месторождения, где выветрелые породы достигают 100 метров и усложняют обеспечение геотехнической безопасности.

Цель данного исследования – анализировать и сравнивать эффективность и точность методов предельного равновесия (LEM) и методов конечных элементов (FEM) в оценке устойчивости откосов на указанном месторождении. Эти методы были выбраны из-за их широкого применения в горной инженерии для решения подобного рода задач, однако их применимость и точность могут значительно различаться в зависимости от специфики геологических условий [1].

В данной работе особое внимание уделяется анализу геологической структуры Жайремского месторождения, оценке механических свойств выветрелых пород и влиянию подземных вод на устойчивость откосов. Исследование поддерживается анализом ряда кейсов, где данные методы применялись в аналогичных условиях, что позволяет обосновать выбор инструментария и подходов.

Результаты исследования помогут оптимизировать выбор методов анализа и проектные решения в сложных геологических условиях. Понимание потенциальных геотехнических рисков при ведении горных работ на ранее затопленных карьерах Дальнезападный 1 и 2, входящие

в Жайремский горно-обогатительный комбинат, является важным фактором для обеспечения безопасности горных работ. Выявление фактических и проектных геотехнических рисков способствует предотвращению обрушений или их контролю на ранних этапах отработки месторождения [2].

Материалы и методы

В области геотехнического инжиниринга, особенно при оценке устойчивости откосов, применяются различные методики, среди которых особое место занимают метод предельного равновесия (Limit Equilibrium Method, LEM) и метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM). Эти методы имеют как преимущества, так и ограничения, которые могут проявляться по-разному в зависимости от конкретных условий исследования, например, в ранее затопленных карьерах [3].

Метод предельного равновесия (LEM) традиционно используется для оценки устойчивости откосов за счет анализа равновесия сил и моментов вдоль предполагаемой поверхности скольжения. LEM делит массив на срезы и оценивает баланс между удерживающими и движущими силами. Этот метод отмечается своей простотой и эффективностью, что делает его популярным среди инженеров. Он хорошо подходит для различных типов склонов и обеспечивает быстрые оценки коэффициента запаса устойчивости [4]. Преимущества метода заключаются в его простоте и эффективности, так как он легко применим, требует минимальных вычислительных ресурсов и подходит для различных типов склонов и геологических условий,

предоставляя быстрые и точные оценки коэффициента запаса устойчивости [5].

Однако LEM требует предварительного задания формы поверхности скольжения, что может привести к неточностям, и не учитывает распределение напряжений и деформаций в массиве [6].

Метод конечных элементов (FEM), напротив, позволяет детально моделировать напряженно-деформированное состояние грунта, учитывая его дискретизацию на множество элементов и решение уравнений равновесия для каждого из них. FEM особенно эффективен для моделирования сложных геометрий и неоднородностей, что делает его идеальным для анализа условий в ранее затопленных карьерах, где условия могут быть весьма изменчивыми [7]. Однако FEM требует значительных вычислительных ресурсов и очень чувствителен к качеству входных данных [8], точность его результатов зависит от качества исходных данных.

Сравнение LEM и FEM в контексте различных геотехнических условий показывает, что оба метода могут давать схожие результаты для простых случаев. При сложных геологических условиях, например, наличии глубоких выветрелых пород или в ранее затопленных карьерах, FEM предоставляет более детальный и точный анализ [9]. Так, Zhang P. и соавторы обсуждают, как FEM позволяет более точно моделировать механизмы разрушения без предварительных предположений о форме поверхности скольжения, что может быть критично для ранее затопленных карьеров [10].

Заключение исследования утверждает, что выбор между LEM и FEM должен базироваться на конкретных требованиях проекта, доступности данных и желаемой точности анализа. В сложных условиях, как в ранее затопленных карьерах, применение FEM может быть предпочтительнее из-за его способности учитывать динамические изменения в геологическом и гидрогеологическом контексте. Тем не менее, LEM остается важным инструментом для предварительных оценок и простых случаев, где требуется скорость и экономичность анализа.

Методология

Для анализа устойчивости откосов на месторождении Жайрем использовались методы предельного равновесия (LEM) и конечных элементов (FEM). В качестве инструментов для анализа методом LEM выбрана программа Slide3 от Rocscience Inc, что позволяет эффективно работать с трехмерными геометриями и обеспечивает точные оценки коэффициентов запаса прочности склонов. Этот метод был использован для быстрой оценки потенциальных зон обрушения [11]. Для более детального и глубокого анализа напряженно-деформированного состояния пород применялся метод FEM с использованием программы RS3, также разработанной Rocscience Inc. Эта программа идеально подходит для моделирования сложных геологических процессов и взаимодействия различных типов пород, что особенно важно для условий Жайремского месторождения.

Моделирование включало сбор и анализ данных о геометрии карьера, типах пород, их механических свойствах и уровне грунтовых вод. Особое внимание уделялось

пьезометрическим данным для оценки порового давления воды. Трехмерное моделирование позволило учесть реальные условия и геометрические особенности месторождения, а также моделировать различные сценарии, включая изменения уровня грунтовых вод и их влияние на устойчивость откосов. В Slide3 и RS3 проводился расчет коэффициентов запаса прочности и анализ потенциальных зон обрушения, при этом в RS3 дополнительно анализировались напряжения и деформации в массиве.

В процессе моделирования проводилась валидация результатов с использованием данных наблюдений за состоянием откосов в реальных условиях карьера. По результатам валидации модели корректировались для повышения точности прогнозов. Этот подход позволил достичь высокой степени достоверности результатов исследования и разработать эффективные меры по обеспечению устойчивости откосов.

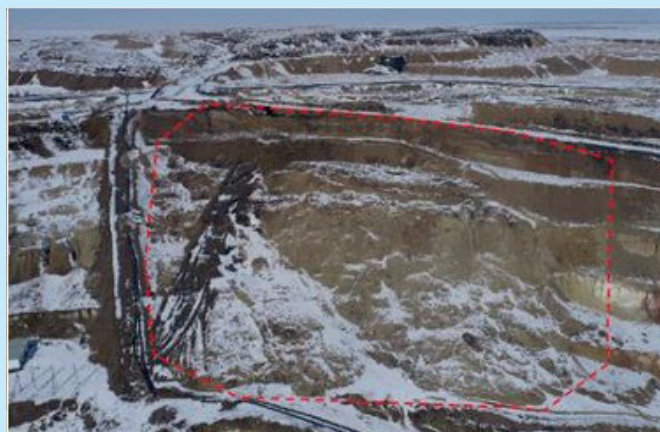
Трехмерное моделирование устойчивости проводилось в программах Slide3 (LEM) и RS3 (FEM), компании Rocscience Inc., для выявления зон потенциальных обрушений и оценки деформаций. На основе собранных данных были построены 3D модели откосов для всех стадий отработки. Был проведен анализ ожидаемого поведения грунта для оценки геотехнических рисков.

Геологически месторождение сложено из трех основных литологических толщ:

- *Clay* – глинисто-песчаного комплекса аральской свиты мощностью до 50 м;
- *Weathered rocks* – выветрелые породы;
- *Fresh rocks* – скальные породы.

Гидрогеологические условия участка являются сложными и по степени обводненности относятся к III группе. Грунтовые воды залегают на глубине до 7 м и следуют за рельефом водоупорного горизонта. Направление движения грунтовых вод определяется, в основном, рельефом кровли подстилающего водоупорного неогенового горизонта, который в общих чертах повторяет современный рельеф территории. Для моделирования порового давления воды был использован коэффициент u_0 . По накопленным данным пьезометрических скважин за период с 2022 по 2024 годы был проведен анализ порового давления воды рудного поля ДЗР-1 и ДЗР-2. Анализ 19 датчиков VWP показал, что средний коэффициент u_0 составил 0,56, для насыщенных пород и разломов условно принят $u_0 = 1.0$. Уровни воды в карьерных озерах ДЗР-1 и ДЗР-2 снизились на 35 м и 81 м соответственно по сравнению с естественным уровнем до откачных работ.

Паспортизация нарушений устойчивости откосов проводится для систематизации сведений об их характере и причинах. Эти сведения после обобщения и анализа используются для прогнозирования деформаций и разработки противооползневых мероприятий. С момента возобновления горных работ на карьере Дальнезападный 2 выявлена, согласно «Паспорту деформации №1», одна деформация в виде оползня (сползание массива горных пород) по северо-западному борту карьера между отм. +385 м и отм. +344 м. Впервые деформация отмечена 04.05.2023 г., угол откола деформации составлял 210 на 28.03.2024 г., деформация достигла угла откоса 170. Причины деформации: увлажнение грунтовыми водами (рис. 1).



**Рис. 1. Снимки Деформации № 1, северо-западный борт с гор. +384 м на гор. +344 м.
Сурет 1. № 1 деформацияның суреттері, +384 м гор. +344 м гор. солтүстік-батыс жағынан.
Figure 1. Images of Deformation No. 1, north-west side from hor. +384 m to hor. +344 m.**

Трехмерная (3D) модель устойчивости бортов была разработана в программе Slide3 компании Rocscience Inc. с использованием метода предельного равновесия (LEM).

Далее при расчетах различных оболочек карьера вышеупомянутая базовая модель была разделена на части с использованием геометрий карьера: контур фактического состояния карьера; проектный контур карьера Фаза 1; проектный контур карьера Фаза 2; конечный контур карьера ЛОМ.

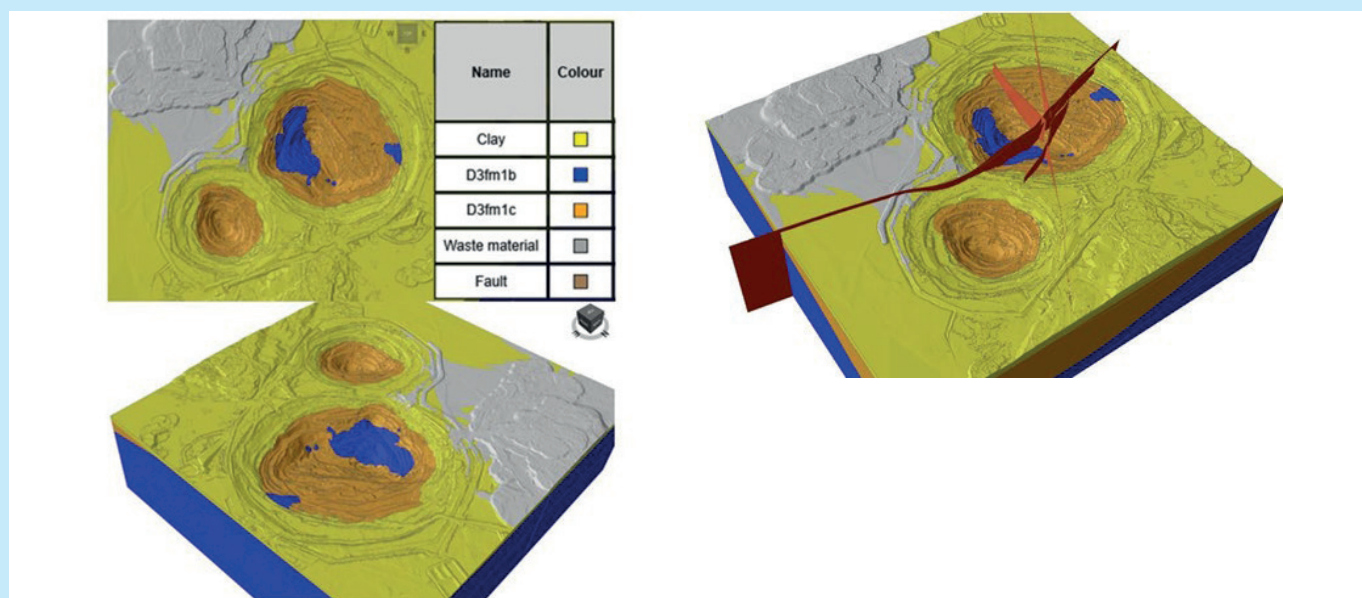
Модель подземных вод: уровень грунтовых вод повторяет топографическую поверхность, смещенную вертикально вниз на 10 м. Далее поровое давление, рассчитанное на основе полевых наблюдений, смоделировано с помощью коэффициентов U_v .

Традиционные методы и численное моделирование широко используются для моделирования устойчиво-

сти бортов. 3D методы анализа предельного равновесия включают метод колон GLE / Morgenstern-Price (полный) и метод колон Bishop (неполный). Для каждой поверхности скольжения по осям X и Y использовалось по 50 колон. Все поверхности скольжения были ограничены таким образом, чтобы минимальная глубина поверхности составляла 15 м ниже внешней границы, что позволило избежать анализа локальных нестабильностей уступа.

Эллипсоидальные поверхности скольжения рассчитывались с использованием алгоритмов оптимизации Particle Swarm и Cuckoo Search, что позволило определить глобальные минимумы коэффициента устойчивости в разных частях карьера.

Разломы моделировались как ослабленные зоны в откосах, чтобы отразить структурно-контролируемые сценарии обрушений (рис. 2).



**Рис. 2. 3D-модель устойчивости борта фактического состояния карьера.
Сурет 2. Нақты карьер күйінің борттық тұрақтылығының 3D моделі.
Figure 2. 3D model of the stability of the side of the actual state of the quarry.**

Обсуждение результатов

Наиболее вероятный случай состоит из литологической модели 2024 года и структурной модели 2020 года, включающие изотропные прочностные свойства пород по критерию разрушения Хука-Брауна для скальных и выветрелых пород и по критерию Мора-Кулона для перекрывающей толщи, как показано в таблице 1.

Коэффициент разрушения от взрыва $D = 1$ применяется по критерию разрушения Хука-Брауна на межсездовых и генеральных углах бортов карьера.

Для анализа прочностных свойств разломов используется критерий разрушения Мора-Кулона: $c' = 1$ кПа, $\varphi' = 25^\circ$. Эти параметры свидетельствуют о зеркалах скольжения (полированных), структурах со слабым глинистым или перемятым кварцитовым заполнителем. То есть, используемые значения прочности на сдвиг в разломах остаются очень консервативными, требующие дальнейшего подтверждения для дальнейшей оптимизации бортов.

Уровень грунтовых вод повторяет топографическую поверхность, смещенную вертикально вниз на 10 м. В случае с карьером Дальнезападный это дает консервативное или более высокое поровое давление, которое выше фактического гидростатического уровня грунтовых вод.

Структурно-контролируемые и сложные механизмы обрушения могут быть оценены только в трехмерном анализе из-за взаимодействия между различными геологическими структурами и геометрией борта карьера в трехмерном пространстве. Для устойчивости бортов карьера критерий приемлемости DAC требует минимальные статические КЗУ, такие как:

- $FoS_{min} = 1,20$ для межсездовых откосов;
- $FoS_{min} = 1,30$ для генерального борта карьера.

В связи с субвертикальной ориентацией всех разломов структурно контролируемые и сложные механизмы обрушения не определены на всех стадиях отработки карьера.

Механизмы обрушения по прочностным свойствам пород оценивались с помощью трехмерного анализа методом предельного равновесия.

- $FoS_{3D-GLE} > 1,20$ был определен для межсездовых откосов;

- $FoS_{3D-GLE} > 1,30$ был определен для генерального борта карьера.

Оболочка фактического положения карьера соответствует и превышает минимальные требования DAC для Сценария 1, за исключением 3 зон потенциальных обрушений. Для наиболее вероятного случая выявлены 3 локальных участка с минимальным КЗУ (GLE) $FoS_{3D} < 1,20$ на откосе выветрелых пород с объемами от 500 000 до 1 480 000 м³. В дальнейшем данная зона будет называться зоной риска 1–3. Анализ Бишопы выявил схожую зону потенциального обрушения с анализом GLE (рис. 3).

Оболочка проектного контура Фаза 1 соответствует и превышает минимальные требования DAC, за исключением 2 зон потенциального обрушения. Для наиболее вероятного случая выявлен 1 локальный участок с минимальным КЗУ (GLE) $FoS_{3D} < 1,20$ на откосах выветрелых пород с объемом около 1 124 000 м³. В дальнейшем данные участки будут называться зоной риска 1. Анализ Бишопы также выявил 1 локальный участок с минимальным КЗУ ($FoS_{3D} < 1,20$) на откосах выветрелых пород с объемом около 25 000 м³ (рис. 4).

Оболочка проектного контура Фаза 2 соответствует и превышает минимальные требования DAC, за исключением 1 зоны потенциального обрушения. Для наиболее вероятного случая выявлен 1 локальный участок с минимальным КЗУ (GLE) $FoS_{3D} < 1,20$ на откосах выветрелых пород с объемом около 200 000 м³. В дальнейшем данный участок будет называться зоной риска 1 (рис. 5). Анализ Бишопы выявил практически схожие зоны потенциального обрушения с анализом GLE.

Прочностные свойства материалов

Материалдардың беріктік қасиеттері

Strength properties of materials

Таблица 1

Кесте 1

Table 1

Наименование	Цвет	Удельный вес (кН/м ³)	Поверхность воды	Критерий разрушения	Сцепление (кПа)	Phi(0)	UCS неповрежденной породы (кПа)	GSI	mi	D
Глина		19	Уровень грунтовых вод	Mohr Coulomb	22	24				
Свежий		28		Generalized Hoek-Brown			75000	50	10	1
Водоносные породы		25		Generalized Hoek-Brown			45000	25	6	1
Водоносные материалы		20		Mohr Coulomb	0	32				
Разлом		22		Mohr Coulomb	1	25				

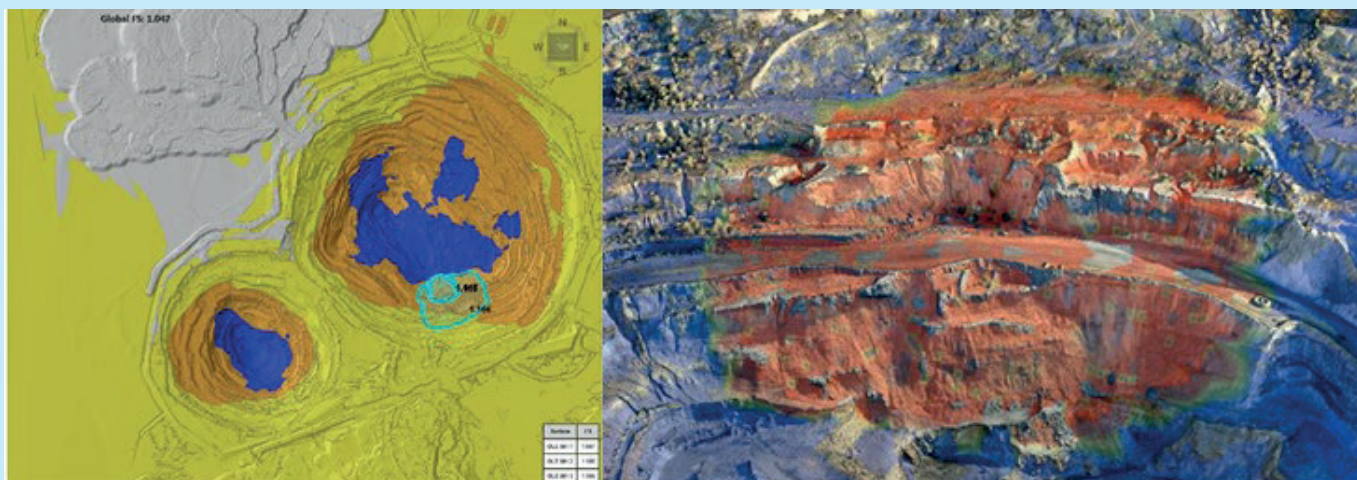


Рис. 3. Потенциальное обрушение (Зона риска 3, GLE).

Сурет 3. Ықтимал құлау (Қатерлі аймақ 3, GLE).

Figure 3. Potential collapse (Risk zone 3, GLE).

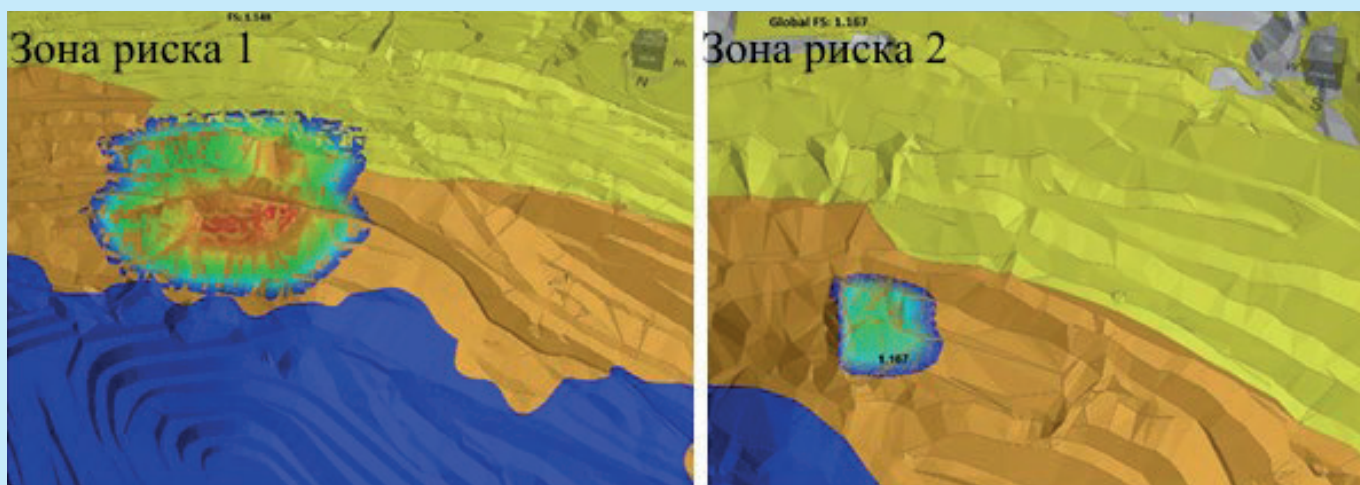


Рис. 4. Зоны риска на выветрелых откосах (Фаза 1).

Сурет 4. Тозған жыныстардың беткейлеріндегі ықтимал құлау аймақтары (Фаза 1).

Figure 4. Potential collapse zones on weathered rock slopes (Phase 1).

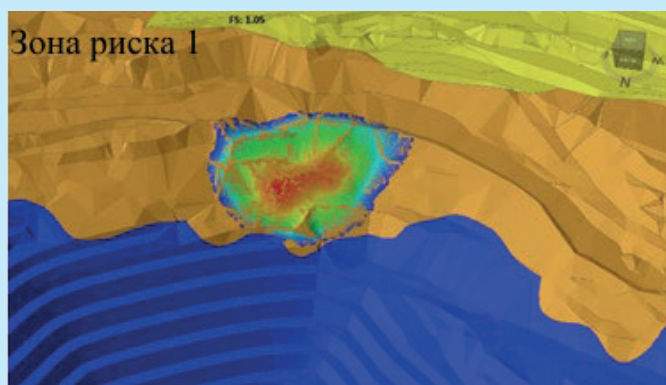


Рис. 5. Потенциальные обрушения на откосах выветрелых пород (Фаза 2, GLE).

Сурет 5. Тозған тау жыныстарының беткейлеріндегі ықтимал құлау (Фаза 2, GLE).

Figure 5. Potential collapses on weathered rock slopes (Phase 2, GLE).

Оболочка конечного контура (LOM) соответствует и превышает минимальные требования DAC, за исключением 4 зон потенциального обрушения. Для наиболее вероятного случая выявлены 4 локальных участка с минимальным КЗУ (GLE) FoS3D < 1,20 на откосах выветрелых пород с объемом от 330 000 до 1 500 000 м³. В дальнейшем данные участки будут называться зонами рисков 1–4. Анализ Бишопы выявил практически схожие зоны потенциального обрушения с анализом GLE. Ниже в таблице 2 приведены результаты анализа устойчивости бортов.

Анализ устойчивости склонов карьера показал, что в целом проектные контуры соответствуют нормативам DAC, однако на всех стадиях разработки (фактическое положение, Фазы 1 и 2, конечный контур) выявлены локальные зоны риска с FoS3D < 1,20 на выветрелых породах (рис. 6). Объемы потенциальных обрушений варьируются от 200 000 до 1 500 000 м³. Наиболее крупные зоны риска зафиксированы в фактическом контуре и в LOM. Результаты GLE подтверждены анализом Бишопы. Необходим

Таблица 2

Результаты анализа устойчивости конечного контура

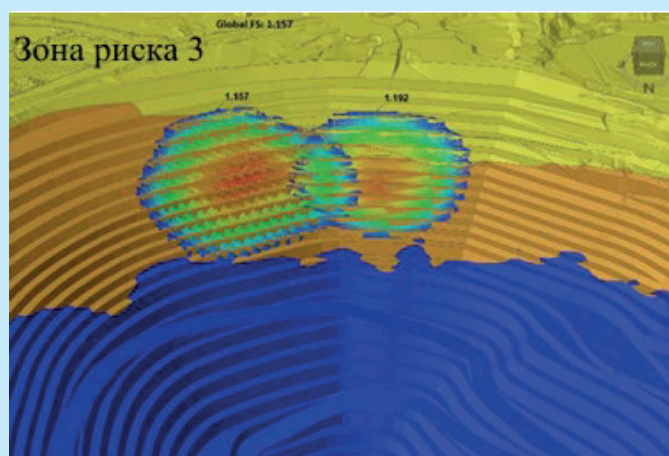
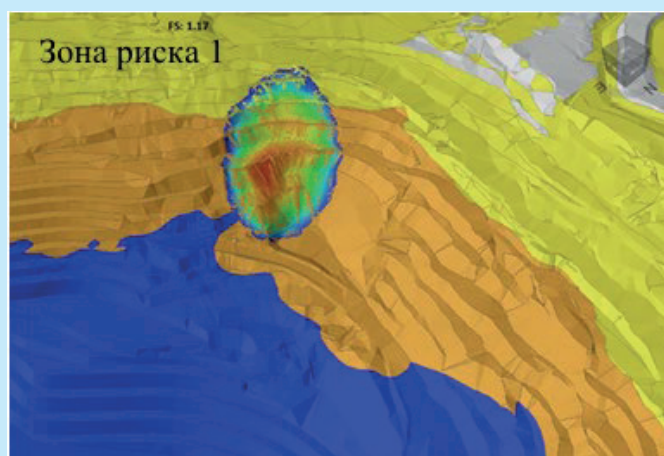
Кесте 2

Соңғы контурдың тұрақтылығын талдау нәтижелері

Table 2

The results of the stability analysis of the final contour

Стадии отработки	Участок	С учетом разломов					
		Particle S.S.			Cuckoo S.		
		FoS GLE	Объем, м ³	FoS Bishop	FoS GLE	Объем, м ³	FoS Bishop
Конечный контур карьера (ЛОМ)	ДЗР-2_север	1,25	381 822	1,19	1,17	332 158	1,1
		1,54	275 194	1,5			
		1,55	240 569	1,51			
	ДЗР-1_север	1,14	763 643	1,09	1,09	443 175	1,08
		1,31	1 307 610	1,28			
		1,6	1 728 890	1,56			
	ДЗР-1,2_юг	1,15	929 956	1,14	1,14	559 344	1,13
		1,19	635 355	1,14			
		1,26	1 673 170	1,25			



**Рис. 6. Потенциальные обрушения по ЛОМ-контру (Зоны риска 1 и 3).
Сурет 6. ЛОМ контур бойынша ықтимал құлау (1 және 3 құлау аймақтар).
Figure 6. Potential collapses on weathered rock slopes (Risk zones 1 and 3).**

постоянный мониторинг и меры по снижению рисков в указанных зонах.

Закключение

Исследование подтвердило, что комбинирование методов LEM и FEM является ценным подходом в анализе устойчивости откосов, особенно в сложных условиях месторождения Жайрем. В то время как LEM предоставляет достаточную точность для общей оценки устойчивости, FEM вносит дополнительную глубину в понимание процессов, особенно при наличии значительного воздействия подземных вод. Это исследование не только улучшает техническое понимание устойчивости склонов, но также предоставляет практические рекомендации для их укрепления, что способствует повышению безопасности на месторождении Жайрем.

Оба метода учитывают влияние подземных вод, регулярный мониторинг с применением этих методов помогает предотвратить обрушения. Сравнительный анализ показывает, что LEM дает более консервативные оценки, тогда как FEM точнее отражает сложные взаимодействия. Интеграция этих методов с данными наблюдений позволяет эффективно управлять рисками в условиях горных работ.

Благодарность

Статья опубликована по результатам научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках проекта №AP19677938 «Создание метода прогнозирования сдвижения вмещающих пород до земной поверхности для модернизации технологии повторной разработки пологих рудных залежей», при грантовом финансировании Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Орынбаев Б.А., Алиев С.Б., Мырзахметов С.С. Сравнительный анализ методов оценки устойчивости откосов в изотропной среде // Горный журнал Казахстана. 2024. № 11. С. 40–46 (на русском языке)
2. Андреева О.Н., Кольцов П.В., Пыхтеева Н.Ф. Анализ устойчивости откосов карьера Западно-Озерный для обеспечения безопасности ведения горных работ // Проблемы недропользования. 2023. № 1. С. 32–40 (на русском языке)
3. Метод оценки масштабов распространения физических процессов в естественном напряженном состоянии массива / Таханов Д.К. [и др.] // Горный журнал Казахстана. 2023. № 11. С. 33–38 (на казахском языке)
4. Эргашев Н.Х., Шарипов Л.О. Анализ современных методов определения и оценки параметров устойчивых откосов бортов карьеров // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2025. Т. 2. № 131. С. 29–33 (на русском языке)
5. Ayob M. Оценка устойчивости склонов с использованием методов предельного равновесия и конечных элементов // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Т. 28. № 18. С. 27–43 (на английском языке)
6. Bhandary R.P., Krishnamoorthy A., Rao A.U. Анализ устойчивости склонов с использованием метода конечных элементов и генетического алгоритма // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Т. 37. № 3. С. 1877–1889 (на английском языке)
7. Shi L., Wang H., Bai B., Li X. Совершенствованный метод предельного равновесия на основе конечных элементов для анализа устойчивости склонов с учетом нелинейных критериев прочности и его применение для оценки анкерного эффекта // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2019. Т. 43. № 2. С. 578–598 (на английском языке)
8. Afiri R., Gabi S. Анализ устойчивости склонов дамбы Souk Tleta методом конечных элементов с использованием техники уменьшения прочности // Innovative Infrastructure Solutions. 2018. Т. 3. № 1. С. 6–16 (на английском языке)
9. Saha B.K. Сравнительное исследование методов анализа устойчивости склонов: большие деформации методом конечных элементов и методы предельного равновесия // Memorial University Research Repository. 2017. С. 45–47 (на английском языке)
10. Zhang P., Liu L.L., Zhang S.H. Диаграммы анализа устойчивости склонов с использованием метода материальных точек, учитывающие коэффициент глубины для двухмерных когезивно-фрикционных склонов // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2022. Т. 81. С. 42–44 (на английском языке)
11. Олжатаев О.К., Хамзе А.М. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости карьерных уступов и откосов // Материалы для академических и научных обзоров. 2024. № 5. С. 135–137 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Орынбаев Б.А., Алиев С.Б., Мырзахметов С.С. Изотропты ортада төбе тұрақтылығын бағалау әдістерін салыстырмалы талдау // Қазақстанның тау-кен журналы. 2024. № 11. Б. 40–46 (орыс тілінде)
2. Андреева О.Н., Кольцов П.В., Пыхтеева Н.Ф. Западно-Озерный карьерінің төбе тұрақтылығын талдау тау-кен жұмыстарын қауіпсіз жүргізуді қамтамасыз ету мақсатында // Табиғи ресурстарды пайдалану мәселелері. 2023. № 1. Б. 32–40 (орыс тілінде)
3. Табиғи кернеулі күйдегі массивтің физикалық процестерінің таралу ауқымын бағалау әдісі / Таханов Д.К. [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. 2023. № 11. Б. 33–38 (қазақ тілінде)
4. Эргашев Н.Х., Шарипов Л.О. Карьер қырқаларының тұрақтылық параметрлерін анықтау және бағалау үшін қазіргі әдістерді талдау // Universum: техникалық ғылымдар: электронды ғылыми журнал. 2025. Т. 2. № 131. Б. 29–33 (орыс тілінде)
5. Ayob M. Төбе тұрақтылығын бағалау шекті тепе-теңдік және соңғы элементтер әдістерін қолдану арқылы // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Т. 28. № 18. Б. 27–43 (ағылшын тілінде)
6. Bhandary R.P., Krishnamoorthy A., Rao A.U. Төбе тұрақтылығын талдау соңғы элементтер әдісі және генетикалық алгоритмдер қолдану арқылы // Geotechnical and Geological Engineering. 2018. Т. 37. № 3. Б. 1877–1889 (ағылшын тілінде)

7. Shi L., Wang H., Bai B., Li X. Нелинейлі беріктік критерийлерін ескере отырып, төбе тұрақтылығын талдау үшін соңғы элементтер әдісі негізінде жетілдірілген шекті тепе-теңдік әдісі және оның анкерлеу әсерін бағалауда қолданылуы // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019. Т. 43. № 2. Б. 578–598 (ағылшын тілінде)
8. Afiri R., Gabi S. Souk Tleta бөгетінің төбе тұрақтылығын соңғы элементтер әдісі арқылы шекті беріктік азайту әдісімен талдау // *Innovative Infrastructure Solutions*. 2018. Т. 3. № 1. Б. 6–16 (ағылшын тілінде)
9. Saha B.K. Төбе тұрақтылығын талдауда үлкен деформациялар әдісі мен шекті тепе-теңдік әдістерін салыстыру // *Memorial University Research Repository*. 2017. Б. 45–47 (ағылшын тілінде)
10. Zhang P., Liu L.L., Zhang S.H. Тереңдік коэффициентінің әсерін ескере отырып, материалдық нүкте әдісімен екі өлшемді когезивті-фрикциялық төбе тұрақтылығын талдау диаграммалары // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. Т. 81. Б. 42–44 (ағылшын тілінде)
11. Олжатаев О.К., Хамзе А.М. Карьерлік қырқалар мен төбелердің тұрақтылығын қамтамасыз ету жөніндегі шараларды әзірлеу // Академиялық және ғылыми шолуларға арналған материалдар. 2024. № 5. Б. 135–137 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Orinbaev B.A., Aliev S.B., Myrzakhmetov S.S. *Sravnitel'nyi analiz metodov otsenki ustoychivosti otkosov v izotropnoi srede [Comparative Analysis of Slope Stability Assessment Methods in Isotropic Medium]*, *Gornyi zhurnal Kazakhstana [Mining magazine of Kazakhstan]*. 2024. No. 11. 40–46 pp. (in Russian)
2. Andreeva O.N., Kol'tsov P.V., Pykhiteeva N.F. *Analiz ustoychivosti otkosov kariiera Zapadno-Ozernyi dlia obespecheniia bezopasnosti vedeniia gornykh rabot [Analysis of Slope Stability of the Zapadno-Ozernyi Quarry to Ensure Safety of Mining Operations]*, *Problemy nedropol'zovaniia [Problems of Subsurface Use]*. 2023. No. 1. 32–40 pp. (in Russian)
3. *Method for Estimating the Spread of Physical Processes in the Natural Stress State of the Massif / Takhanov D.K. [et al.] // Mining magazine of Kazakhstan*. 2023. No. 11. 33–38 pp. (in Kazakh)
4. Ergashev N.Kh., Sharipov L.O. *Analiz sovremennykh metodov opredeleniia i otsenki parametrov ustoychivyykh otkosov bortov kariierov [Analysis of Modern Methods for Determining and Assessing the Parameters of Stable Quarry Slopes]*, *Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. [Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal]*. 2025. No. 131. 29–33 pp. (in Russian)
5. Ayob M. *Slope Stability Evaluations Using Limit Equilibrium and Finite Element Methods // International Journal of Advanced Science and Technology*. 2019. V. 28. No. 18. 27–43 pp. (in English)
6. Bhandary R.P., Krishnamoorthy A., Rao A.U. *Stability Analysis of Slopes Using Finite Element Method and Genetic Algorithm // Geotechnical and Geological Engineering*. 2018. V. 37. No. 3. 1877–1889 pp. (in English)
7. Shi L., Wang H., Bai B., Li X. *Improved finite element-based limit equilibrium method for slope stability analysis by considering nonlinear strength criteria and its application in assessing the anchoring effect // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2019. V. 43. No. 2. 578–598 pp. (in English)
8. Afiri R., Gabi S. *Finite element slope stability analysis of Souk Tleta dam by shear strength reduction technique // Innovative Infrastructure Solutions*. 2018. V. 3. No. 1. 6–16 pp. (in English)
9. Saha B.K. *A comparative study between large deformation finite element and limit equilibrium methods of slope stability analysis // Memorial University Research Repository*. 2017. 45–47 pp. (in English)
10. Zhang P., Liu L.L., Zhang S.H. *Material point method-based two-dimensional cohesive-frictional slope stability analysis charts considering depth coefficient effect // Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2022. V. 81. 42–44 pp. (in English)
11. Olzhataev O.K., Khamze A.M. *Razrabotka meropriiatii po obespecheniiu ustoychivosti kar'ernykh ustupov i otkosov [Development of measures to ensure the stability of quarry benches and slopes]*, *Materialy dlya akademicheskikh i nauchnykh obzorov [Academics and Science Reviews Materials]*. 2024. No. 5. 135–137 pp. (in Russian)

Сведения об авторах:

Таханов Д.К., к.т.н., старший преподаватель кафедры «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых», Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, главный научный сотрудник ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности» (г. Караганда, Казахстан), takhanov80@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2360-9156>

Рымкулова А.Б., преподаватель кафедры «Маркшейдерское дело и геодезия», Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, младший научный сотрудник ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности» (г. Караганда, Казахстан), arai-1995@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2116-6371>

Рахметов Б.Р., ведущий инженер, геотехник ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности» (г. Караганда, Казахстан), bekzad.rakhmetov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0929-190X>

Балпанова М.Ж., доктор Ph.D, директор ТОО «Научно-технический центр промышленной безопасности» (г. Караганда, Казахстан), balpanova86@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1513-5317>

Авторлар туралы мәліметтер:

Таханов Д.К., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, «Геология және пайда қазбалар орынын барлау» кафедрасының т.ғ.к., аға оқытушысы, «Өнеркәсіптік қауіпсіздік ғылыми-техникалық орталығы» ЖШС бас ғылыми қызметкері (Қарағанды қ., Қазақстан)

Рымқұлова А.Б., Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Маркшейдерлік іс және Геодезия кафедрасының оқытушысы, «Өнеркәсіптік қауіпсіздік ғылыми-техникалық орталығы» ЖШС кіші ғылыми қызметкері (Қарағанды қ., Қазақстан)

Рахметов Б.Р., «Өнеркәсіптік қауіпсіздік ғылыми-техникалық орталығы» ЖШС жетекші геотехник инженері (Қарағанды қ., Қазақстан)

Балпанова М.Ж., Ph.D докторы, «Өнеркәсіптік қауіпсіздік ғылыми-техникалық орталығы» ЖШС директоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Takhanov D.K., Senior lecturer at the Department of Geology and exploration of mineral deposits, Abylkas Saginov University, Chief Researcher at Scientific and Technical Center for Industrial Safety LLP, Ph.D (Karaganda, Kazakhstan)

Rymkulova A.B., lecturer at the Department of Mining and Geodesy, Abylkas Saginov University, Junior Researcher at the Scientific and Technical Center for Industrial Safety LLP (Karaganda, Kazakhstan)

Rakhmetov B.R., a leading geotechnical engineer at Scientific and Technical Center for Industrial Safety LLP (Karaganda, Kazakhstan)

Balpanova M.Zh., Director of Scientific and Technical Center for Industrial Safety LLP, Ph.D (Karaganda, Kazakhstan)

Рудник The Mine

22–24 октября 2025, Екатеринбург

10-я международная выставка современных технологий, оборудования и спецтехники для горнодобывающей промышленности

одна из крупнейших горных выставок в России

МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
ЭКСПО-бульвар, дом 2
(342) 206-44-80

mine.proexpo.ru



официальная
поддержка:



Торгово-промышленная
палата Российской
Федерации



Правительство
Свердловской области



НП «Горнопромышленники
России»