

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Г.Б. Абдыкаримова¹, Л.С. Шамганова¹, В.Н. Токсаров², Н.О. Бердинова¹, А.М. Хайруллаев³

¹ Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Республика Казахстан

² Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

³ Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Республика Казахстан, e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com

Аннотация: Объект исследования: Горный массив Куржункульского месторождения в условиях перехода на глубокие горизонты (до отметки -290 м). Описан комплексный подход, сочетающий натурные и аналитические методы учета действия тектонических напряжений. Для определения фактического тензора напряжений использован метод скважинной разгрузки с применением гидродомкрата Гудмана и регистрацией акустической эмиссии (эффект Кайзера). Оценка устойчивости бортов выполнена путем сравнительного анализа двух подходов: метода предельного равновесия (ПО Rocscience Slide) и численного моделирования методом конечных элементов (ПК MIDAS GTS NX). Натурные измерения выявили значительную тектоническую составляющую: действующие горизонтальные напряжения в массиве превышают расчетные гравитационные значения в 2 раза. Установлено, что наиболее уязвимым участком является северо-восточный борт, где сочетание тектонических сил и техногенного воздействия приводит к развитию деформационных процессов в прибортовом массиве. Численное моделирование позволило определить зоны концентрации максимальных касательных напряжений τ_{max} , активизирующих процессы скалывания на глубоких горизонтах. Расчетами установлено, что классические методы предельного равновесия могут недооценивать риски на глубоких горизонтах. Численное моделирование подтвердило развитие деформаций на отметке -290 м, что потребует корректировки проектных решений и внедрения систем активного мониторинга в ослабленных зонах Северо-Восточного борта карьера. Результаты работы являются основой для обеспечения безопасности горных работ Куржункульского карьера при достижении проектной глубины 490 м.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, тектонические напряжения, эффект Кайзера, домкрат Гудмана, численное моделирование, метод конечных элементов, устойчивость бортов карьеров, деформационные процессы.

Благодарность: Работа выполнена в рамках грантового финансирования Жас галым по проекту № AP22688305 «Разработка научно-методических основ для создания единой системы геомониторинга за напряженно-деформированным состоянием массива горных пород на Качарском карьере».

Для цитирования: Абдыкаримова Г. Б., Шамганова Л. С., Токсаров В. Н., Бердинова Н. О., Хайруллаев А. М. Оценка напряженно-деформированного состояния и устойчивости бортов глубокого карьера в условиях действия тектонических напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 8. – С. 18–30. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_18.

Stress–strain and stability assessment of deep open pit slopes under the action of tectonic stresses

G.B. Abdykarimova¹, L.S. Shamganova¹, V.N. Toksarov², N.O. Berdinova¹, A.M. Khairullaev³

¹ D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Republic of Kazakhstan

² Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

³ Satbayev University (Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev), Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com

Abstract: The subject of study is rock mass at the Kurzhunkul deposit in the conditions of mining advance to deeper levels (down to -290 m). This article describes an integrated approach combining the in-situ and analytical methods of taking into account tectonic stresses. The actual stress tensor is determined using the borehole slotting with the help of the Goodman jack, with recording of acoustic emission (Kaiser effect). The slope stability assessment involved the comparative analysis of two approaches: the limit equilibrium method (in Rocscience Slide) and the finite element-based modeling (in MIDAS GTS NX). The full-scale measurements reveal a considerable tectonic-related component in the stress field: the horizontal stresses exceed the estimated gravitational stresses by 2 times. It is found that the most vulnerable site is the northeastern slope of the test open pit, where the tectonic forces together with the mining-induced impact initiate deformations in adjacent rock mass of the pitwall. Numerical modeling identified concentration zones of the maximal shear stress τ_{\max} , which activated spalling at deep levels. The calculations show that the classical methods of limit equilibrium may underestimate risks at deep levels. The numerical modeling confirms deformations at the level of -290 m, which requires updating of the project designs and introduction of active monitoring in weakened zones of the northeastern pitwall. The research findings are the framework for the safety provisions for mining operations at the project depth of 490 m in the Kurzhunkul open pit mine.

Key words: stress–strain behavior, tectonic stress, Kaiser effect, Goodman jack, numerical modeling, finite element method, pitwall slope stability, deformation processes.

Acknowledgements: The study was supported by the Zhas Galym Grunt Financing Program, Project No. AP22688305: Scientific–Methodological Framework for Integrated Rock Mass Stress–Strain Monitoring at the Kachary Open Pit.

For citation: Abdykarimova G. B., Shamganova L. S., Toksarov V. N., Berdinova N. O., Khairullaev A. M. Stress–strain and stability assessment of deep open pit slopes under the action of tectonic stresses. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(8):18-30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_8_0_18.

Введение

Основную роль в формировании неустойчивых блоков прибортового массива Куржункульского карьера играет сочетание разноориентированных тектонических нарушений. Под действием тектонических напряжений и взрывных работ при переходе к отработке глубоких горизонтов по проекту не исключены тек-

тонические подвижки по структурным блокам, дизъюнктивным нарушениям, как вдоль борта, так и в сторону карьера.

Северный и северо-восточный борта карьера в пределах профилей с Л-10 до Л-5+50 наиболее подвержены опасности развития деформационных процессов и представляют ослабленную зону.

Цель работы

Целью работы является оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) массива для обоснования безопасных параметров углубки карьера и выявления зон потенциальной нестабильности.

Проблема прогноза тектонического влияния на напряженное состояние массива горных пород является актуальной в геомеханике.

Подробный анализ напряженного состояния в окрестностях карьерных выемок различной формы и при различных вариантах задания граничных условий по напряженному состоянию и разработке вариантов активного управления напряженным состоянием прибортовых массивов были выполнены такими исследователями, как А.Д. Сашурин, А.Г. Протосеня, А.Б. Макаров, В.В. Рыбин, А.В. Зубков [1–5].

На сегодняшний день работы, связанные с изучением структурно-геологических особенностей породных массивов, в том числе и для цели определения устойчивых углов откосов на карьерах, базируются на различных показателях качества горных массивов (рейтингов) [5–9]. Геомеханическая модель является визуализацией рейтинговых показателей качества массива в трехмерном пространстве и дает оценку текущего состояния приконтурного массива. Для прогноза деформаций, сдвижений и разрушений горных пород месторождений с учетом полей напряжений часто применяются численные методы для моделирования характера изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива [10]. Их сочетание с натурными методами прогноза позволяет осуществить выбор геомеханически обоснованных более безопасных технических решений [11].

Существует ряд прямых и косвенных методов для качественной и количест-

венной оценки действующих напряжений в массиве горных пород [12, 13]. Натурные методы оценки параметров НДС можно условно разделить на три группы – скважинные методы; методы, основанные на исследовании образцов керна; методы контроля напряжений на обнажениях горных пород. Наиболее широкое применение на горных предприятиях получили два скважинных метода [14]: метод полной разгрузки и метод гидроразрыва.

При ведении открытых горных работ в тектонически напряженных породных массивах, сопровождаемых ростом уровня действующих напряжений и гравитационной и тектонической природы, неминуемо наступает такое положение, когда скальные породы начинают разрушаться в динамической форме. Это происходит, когда деформация породы достигает критического значения, приводящего к ее разрушению. Тогда для оценки устойчивости породного массива производится расчет уровня действующих напряжений до проектной глубины карьера. Для этого применяются численные методы расчетов распределения напряжений. При этом устойчивость собственно откосов оценивается исходя из сравнения уровня расчетных напряжений в окрестности откоса с пределом прочности пород. Если уровень расчетных напряжений в проектируемом сооружении не превышает предел прочности горных пород с учетом коэффициента запаса прочности, то в этом случае сооружение считается в целом устойчивым [15].

Для уточнения геомеханической модели Куржункульского карьера были выполнены натурные исследования по оценке напряженно-деформированного состояния пород. Контроль напряжений в прибортовом массиве осуществлялся на основе использования эффекта Кайзера горных пород при нагружении

стенок скважины гидродомкратом Гудмана. Суть используемого скважинного метода измерения компонент поля напряжений заключается в разгрузке некоторой области массива пород бурением скважины и повторном нагружении ее стенок гидродомкратом Гудмана. При этом эффект Кайзера используется в качестве индикатора восстановления породами околоскважинного пространства радиальной компоненты поля напряжений в направлении нагружения [16, 17].

Геомеханическое обоснование устойчивости бортов и откосов Куржункульского карьера было выполнено методом предельного равновесия и численного моделирования напряженно-деформированного состояния в двухмерной постановке методом конечных элементов в программном комплексе MIDAS GTS NX.

Методика

Экспериментальное исследование природного напряженно-деформированного состояния массива горных пород карьера

Определение горизонтальных напряжений массива Куржункульского карьера проводилось методом скважинной разгрузки на 2 экспериментальных участках специалистами ГИ УрО РАН (г. Пермь). Всего было пробурено 30 горизонтальных скважин.

Метод разгрузки является достаточно точным и методически обоснованным, что позволяет применять его для определения полного тензора напряжений изучаемого массива пород [18]. Этот метод измеряет давление, необходимое для компенсации (восстановления) деформации, вызванной разгрузкой, с использованием домкрата Гудмана (Goodman Jack). Он вводится в скважину и накачивается до тех пор, пока массив не вернется в исходное состояние. Домкрат Гудмана — это зонд для буровых скважин, используемый для измерения де-

формации стенок скважины в зависимости от приложенной нагрузки. Данные, полученные в результате измерений, нагрузка-деформация, позволяют напрямую определить модуль упругости породы. Также в состав комплекса входил портативный прибор регистрации акустической эмиссии, позволяющий осуществлять синхронную запись АЭ-сигнала и давления в гидросистеме.

Порода, которая была разгружена бурением, будет «помнить» максимальное действующее напряжение, которое на нее действовало. При повторном нагружении она не будет издавать акустических сигналов (акустоэмиссии, АЭ) до тех пор, пока приложенное давление не превысит то, которое было на ней до нарушения (бурения). Напряжение, при котором акустоэмиссия начинает резко нарастать, принимается за величину компоненты природного напряжения, действующей в направлении нагружения.

Измерения напряжений и деформационных свойств пород скважинным гидродомкратом выполняются согласно стандарту. В процессе проведения экспериментов на первом этапе в стенке горной выработки осуществляется бурение скважины диаметром 76 мм. Глубина скважины определяется задачами исследований. Затем в скважину помещается гидродомкрат на испытательную глубину. Далее с помощью ручного насоса производится равномерное повышение давления в гидроцилиндрах устройства до значений, превышающих ожидаемые величины напряжений в районе исследований. На следующем этапе процедура проводится в обратном порядке; давление уменьшается путем плавного приоткрывания клапана сброса давления на насосе. В каждой измерительной точке обычно проводится 2–3 цикла нагружения. Для исключения взаимного влияния замерные точки в скважине располагались на расстоянии 300 мм друг от друга.

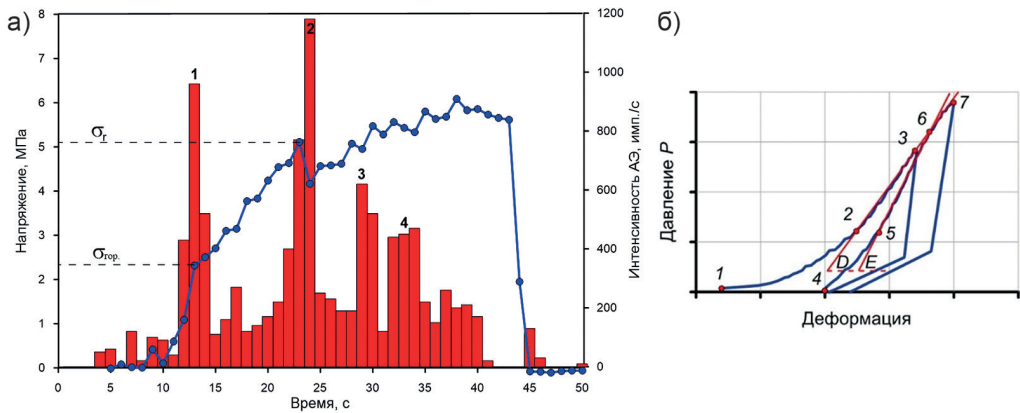


Рис. 1. Характерный график изменения параметров АЭ — давления гидродомкрата от времени при нагружении стенок скважины и относительной деформации от времени при испытании стенок скважины гидродомкратом

Fig. 1. Characteristic plots of changes in acoustic emission (AE) parameters and hydraulic jack pressure versus time during loading of borehole walls, and relative deformation versus time during testing of borehole walls using a hydraulic jack

По результатам экспериментов были построены графики изменения акустических параметров от напряжения. Характерный тип такого графика приведен на рис. 1, а.

По диаграммам деформирования стенок скважины (рис. 1, б) оценивались деформационные свойства пород. Модуль деформации D определяется на квазилинейном участке нагружения перво-

го цикла диаграммы деформирования (участок 2–3 на рис. 1, б). Модуль упругости E — на линейно-упругом участке нагружения 2-го цикла (участок 5–6 на рис. 1, б)

Общие результаты измерения горизонтальных напряжений в бортах карьера приведены на рис. 2.

В табл. 1 представлены усредненные данные измерений параметров нап-

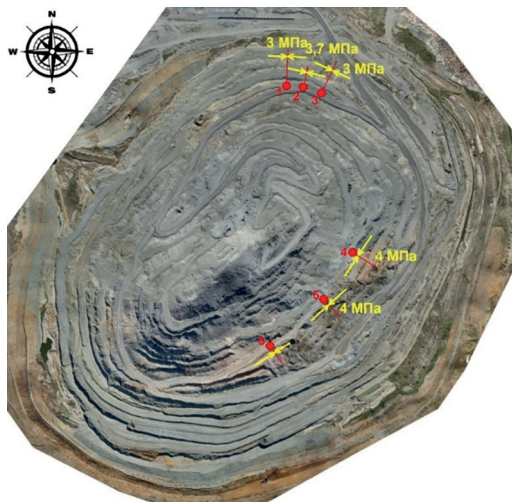


Рис. 2. Результаты определения горизонтальных напряжений в бортах карьера

Fig. 2. Results of determining horizontal stresses in the pit slopes

Таблица 1

Параметры напряженного состояния массива пород Куржункульского карьера, измеренные методом скважинной разгрузки

Parameters of the stress state of the rock mass at the Kurzhunkul open pit determined by the borehole unloading method

| Параметры | Северный борт | Юго-восточный борт |
|---|---|---|
| Абсолютная отметка экспериментального участка, м | +100 | +50 |
| Высота борта участка измерений Н, м | (110 + 30)* | 160 |
| Измеренные значения напряжения в массиве пород методом разгрузки, МПа | $\sigma_x^{\max} = -7,4$ | $\sigma_y^{\max} = -8,23$ |
| | $\sigma_x^{\min} = -3,23$ | $\sigma_y^{\min} = -4,0$ |
| Среднее значение напряжения в массиве пород методом разгрузки, МПа | $\sigma_x^{\text{cp}} = -5,31$ | $\sigma_y^{\text{cp}} = -6,11$ |
| Расчетные значения напряжения, исходя только из собственного веса вышележащих пород, МПа ($\sigma_{\text{гор}}^{\text{cp}} = -\eta\gamma H$, $\sigma_z^n = -\gamma H$) | $\sigma_z^n = -3,78$ | $\sigma_z^n = -4,72$ |
| | $\sigma_{\text{гор}}^{\text{cp}} = -1,32$ | $\sigma_{\text{гор}}^{\text{cp}} = -1,72$ |
| Значения тектонической составляющей T_x и T_y , МПа | $T_x = -3,99$ | $T_y = -4,39$ |
| $\sigma_{x,y}^{\max} / \sigma_x^n$ | $\sigma_x^{\max} / \sigma_x^n = 1,95$ | $\sigma_y^{\max} / \sigma_x^n = 1,94$ |

* Высота борта вместе с высотой отвала в этой части карьера.

ряженного состояния массива пород Куржункульского карьера методом разгрузки.

Сравнение расчетных и измеренных первоначальных величин напряжений в массиве показывает, что измеренные значения главных напряжений на экспериментальных участках $\sigma_{x,y}^{\max}$ превышают расчетные вертикальные напряжения в ~2 раза.

Геомеханическое обоснование устойчивости бортов и откосов карьера

- Расчет устойчивости бортов и откосов карьера методом предельного равновесия

По проекту отработка Куржункульского карьера запланирована до абсолютной отметки -290 м (глубина 490 м). Размеры карьера по поверхности на ко-

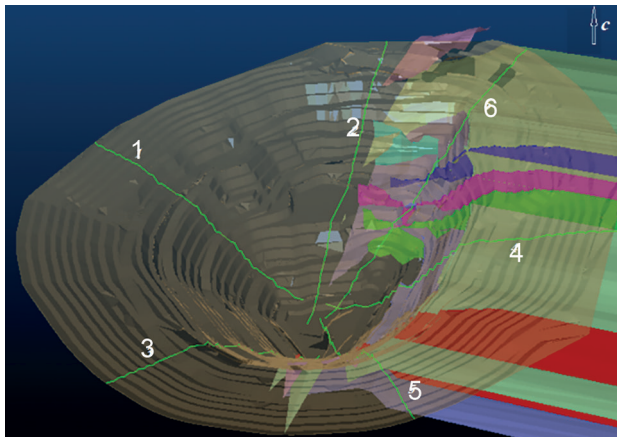


Рис. 3. Расположение расчетных профилей (1 – 6) бортов на 3D-плane

Fig. 3. Location of the calculation profiles (1 – 6) of pit slopes on the 3D plan

Таблица 2

Результаты расчетов устойчивости карьера при углубке до -290 м на конечном контуре

Results of stability analysis of the open pit at a deepening level of (-290 m) on the final contour

| № профиля | Борт | Границы минимальной призмы обрушения, м | Высота участка борта, м | Угол наклона участка борта, град | min коэффициент запаса устойчивости | Состояние борта |
|-----------|---------------------------|---|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | СЗ | (-290)÷(200) | 490 | 33 | 1,04 | близко к предельному |
| | | (-275)÷(198) | 472,9 | 32 | 1,23 | устойчив |
| 2 | СВ | (-290)÷(182) | 472 | 27 | 1,22 | устойчив |
| 3 | ЮЗ | (-278)÷(144) | 334 | 41 | 1,103 | устойчив |
| 4 | ЮВ | (-126)÷(161) | 165 | 36 | 1,034 | близко к предельному |
| 5 | Ю | (-230)÷(130) | 300 | 43 | 1,14 | устойчив |
| 6 | ослабленная зона СВ борта | (-200)÷(160) | 360 | 28 | 0,892 | неустойчив |

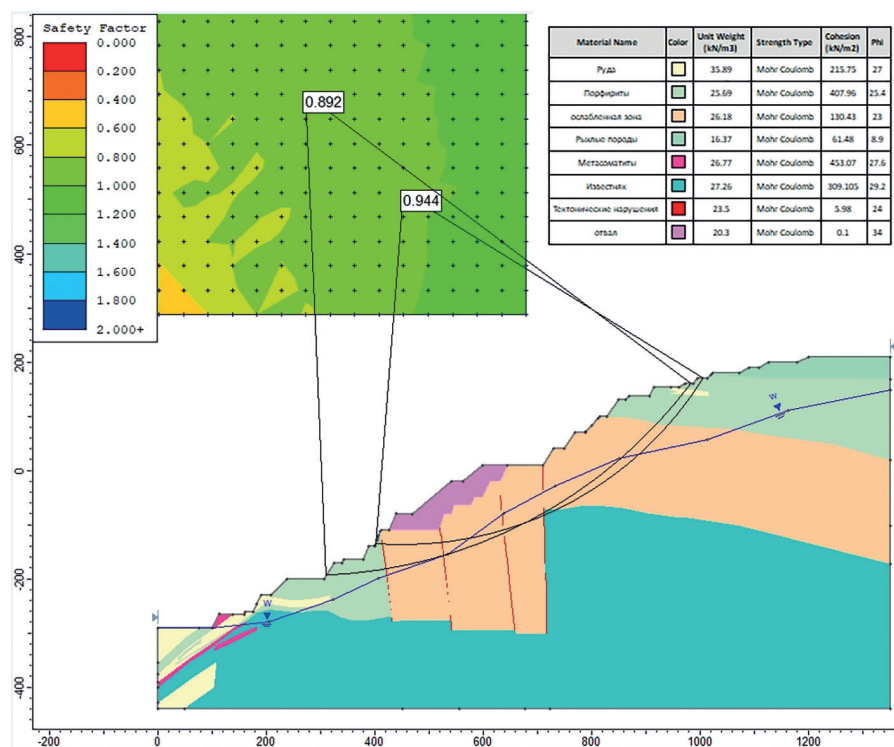


Рис. 4. Расчет устойчивости ослабленной зоны северо-восточного борта по проектному контуру (с внутренним отвалом и с учетом взрывов)

Fig. 4. Stability analysis of the weakened zone of the northeastern pit slope along the design contour (including the internal waste dump and accounting for blasting effects)

нец обработки составят 1900×1700 м. Оценка устойчивости Куржункульского карьера проведена с использованием программного обеспечения Rocscience Slide методами предельного равновесия путем сравнения внешних (сдвигающих) и внутренних (удерживающих) сил и соответствует методике ВНИМИ по 6 профилям, построенным вкрест простирания откосов (рис. 3). Результаты расчетов устойчивости карьера приведены в табл. 2.

По итогам расчетов ослабленная зона северо-восточного (СВ) борта на предельном контуре с учетом техногенного воздействия — борт неустойчив (рис. 4).

- Численное моделирование напряженно-деформированного состояния Куржункульского карьера в двухмерной постановке методом конечных элементов в программном комплексе MIDAS GTS NX

Согласно исследованиям М. Протодьяконова установлено, что на прочность горной породы оказывает влияние лишь соотношение максимального и минимального напряжений (σ_1, σ_3), в плоскости которых действует максимальное касательное напряжение τ_{xy} .

В соответствии с теориями прочности для хрупких материалов на практике считается, что потеря устойчивости участком прибортового массива пород карьера, по результатам численного моделирования, возможна при реализации одного из следующих критериев:

- при превышении максимальной компонентой сжимающих напряжений σ_1 50% предела прочности на одноосное сжатие пород ($\sigma_{сж}$), слагающих рассматриваемый участок борта ($|\sigma_1| \geq 0,5 |\sigma_{сж}|$) — массив переходит в предельное состояние;
- при превышении минимальной компонентой напряжений σ_3 растягиваю-

щих напряжений предела прочности на растяжение: $\sigma_3 > \sigma_p$ — возможно раскрытие природных и формирование техногенных трещин;

- при превышении максимальными касательными напряжениями τ_{xy} предела прочности на сдвиг вероятен сдвиг блоков пород по природным и техногенным трещинам.

Согласно теории предельного равновесия, условие неразрушения при действии двусосных напряжений для произвольной площадки определяется неравенством, связывающим нормальные и касательные напряжения по критерию Кулона:

$$\tau_{xy} < C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где τ_{xy} — действующие максимальные касательные напряжения; C, φ — сцепление и угол внутреннего трения разрушаемого материала; σ_n — нормальная составляющая напряжения, действующая на площадку скольжения.

Составляющие напряжения на произвольной площадке при разрушении по сдвигу по критерию Мора–Кулона можно выразить через главные напряжения:

$$\sigma_n = \sigma_3 \cos 2\alpha + \sigma_1 \sin 2\alpha, \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha, \quad (3)$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно максимальные и минимальные главные напряжения; α — угол наклона поверхности скольжения к линии действия минимального главного напряжения σ_3 .

Общее условие потери устойчивости отдельным уступом и заключается в превышении сдвигающими силами удерживающих сил. Отсюда, исходя из формулы (1), значение коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) для τ_{\max} можно рассчитать по формуле при $\alpha = 45^\circ$:

$$n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) \operatorname{tg} \varphi + 2C}{2\tau_{xy}}, \quad (4)$$

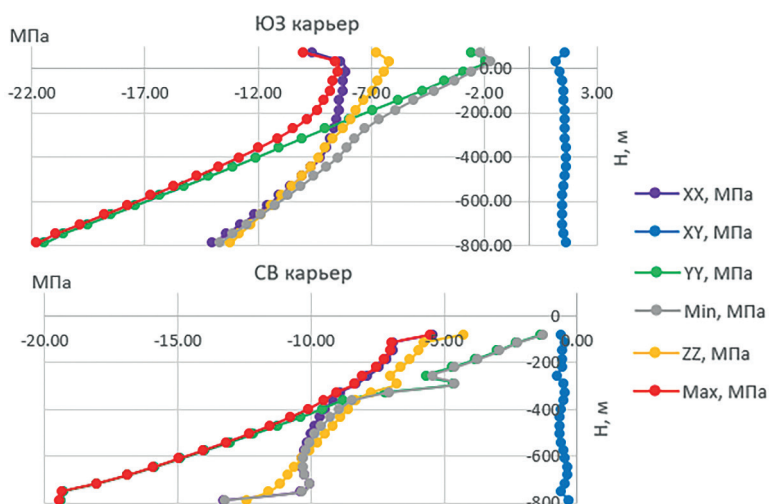


Рис. 5. Графики распределения напряжений в ЮЗ и СВ (с ослабленной зоной) направлении бортов
 Fig. 5. Stress distribution plots in the southwestern (SW) and northeastern (NE) directions of the pit slopes (with a weakened zone)

Таблица 3

Анализ влияния касательных напряжений τ_{\max} на прибортовой массив Куржункульского карьера в ЮЗ и СВ направлении бортов по итогам численного моделирования

Analysis of the influence of maximum shear stresses (τ_{\max}) on the near-slope rock mass of the Kurzunkul open pit in the southwestern (SW) and northeastern (NE) directions based on numerical modeling results

| Расчетная схема | Опасные участки для развития деформаций, горизонты м | Выполнение условия неразрушения $\tau_{xy} < [c] + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$ | | Расчетный коэффициент запаса устойчивости участка | Прогнозируемое состояние участка |
|-----------------|---|--|--|---|---|
| | | действующие максимальные касательные напряжения τ_{xy} , МПа | расчетный предел прочности на сдвиг, МПа | | |
| СВ | 170 ÷ 150 м, 135 м, 100 м, (-290) м | 4,1 | 3,05 | 0,86 | на данных участках при превышении касательными напряжениями предела прочности на сдвиг возникают трещины скалывания и вероятен сдвиг блоков пород по природным и техногенным трещинам |
| | (-100) ÷ (-165) м | 4,15 – 7,36 | 3,05 | 0,86 | |
| ЮЗ | 40 м, -20 м, (-50) ÷ (-95) м, (-140) м, (-170) ÷ (-220) м, (-260) м, (-290) м | 2,26 – 2,5 | 3,45 | | борт устойчив |

Таблица 4

Сравнение зон нестабильности, полученных различными методами расчета
Comparison of instability zones obtained by different calculation methods

| Метод расчета | Зоны нестабильности |
|--------------------------|--|
| Численного моделирования | 170 ÷ 150 м, 135 м, 100 м, (-100) ÷ (-165) м, (-290) м |
| Предельного равновесия | 160 ÷ (-200) м |

где φ — угол внутреннего трения, град.;
 C — сцепление в массиве, т/м².

Расчетными схемами для построения сетки конечных элементов были приняты разрезы конечного контура Куржункульского карьера (с углубкой до -290 м) в направлении юго-восточного (ЮВ) и северо-западного (СЗ) бортов и юго-западного (ЮЗ) и северо-восточного (СВ) бортов.

На рис. 5 приведены графики распределения напряжений в ЮЗ и СВ (с ослабленной зоной) направлении бортов по результатам моделирования.

По итогам моделирования ЮЗ – СВ бортов были определены участки, где наблюдается неблагоприятное воздействие касательных напряжений на прибортовой массив и возможно превышение максимальными касательными напряжениями (τ_{max}) предела прочности на сдвиг (табл. 3). Для этих участков выполнена проверка условия неразрушения по (1) и расчет КЗУ деформируемого участка по (4).

В СВ борту на горизонтах 170 ÷ 150 м, 135 м, 100 м, (-100) ÷ (-165) м при превышении касательными напряжениями предела прочности на сдвиг возникают трещины скола в местах сопряжения берм и откосов и вероятен сдвиг блоков пород по природным и техногенным трещинам.

В табл. 4 приведено сравнение зон нестабильности, полученных методами предельного равновесия и численного моделирования.

В интервале высот от +160 м до -160 м результаты обоих методов рас-

чета устойчивости практически совпадают. Расчет устойчивости откосов методом предельного равновесия подтвердил основную зону нестабильности. Метод конечных элементов в ПК MIDAS GTS NX позволил выявить развитие деформационных процессов на более глубоких горизонтах (до -290 м), что недоступно стандартным методам предельного равновесия.

Заключение

Был выполнен полный цикл геомеханических исследований — от полевых замеров до численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива Куржункульского карьера. Результаты исследования позволили прогнозировать поведение уступов карьера под воздействием тектонических сил, выявлять зоны повышенного риска деформаций и разрушений.

Исследование природного поля напряжений массива методом на основе эффекта Кайзера с использованием гидромкрата Гудмана подтвердили наличие значительной тектонической составляющей. Измеренные значения главных напряжений превышают расчетные вертикальные напряжения (обусловленные только весом вышележащих пород) в ≈2 раза.

Численное моделирование следует признать определяющим методом для прогноза состояния глубоких горизонтов (ниже -200 м), где классические методы расчета устойчивости откосов могут недооценивать масштаб зоны деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубков А. В., Селин К. В., Сентябов С. В. Закономерности формирования напряженного состояния массива горных пород в верхней части земной коры // Литосфера. — 2015. — № 6. — С. 116–129.
2. Рыбин В. В., Константинов К. Н., Калюжный А. С. Возможность динамических проявлений горного давления в карьерах // Горная промышленность. — 2023. — № S1. — С. 56–60. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-56-60.
3. Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 42–48. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08.
4. Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Буслова М. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 619–627.
5. Stacey T. R. Slope stability in high stress and hard rock conditions / Slope Stability 2007: Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. — Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2007, pp. 187–200. DOI: 10.36487/ACGrepo/708Stacey.
6. Satyanarayana, Gnananandh Budi, Murmu S. Stability analysis of a deep highwall slope using numerical modelling and statistical approach—a case study // Arabian Journal of Geosciences. 2021, vol. 14, no. 3. DOI: 10.1007/s12517-021-06476-x.
7. Sedina S. A., Altayeva A. A., Shamganova L. S., Abdykarimova G. B. Rock mass management to ensure safe deposit development based on comprehensive research within the framework of the geomechanical model development // Mining of Mineral Deposits. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 103–109. DOI: 10.33271/mining16.02.103.
8. Zhang B., Mu J., Zheng J., Lv Q., Deng J. A new estimation method and an anisotropy index for the deformation modulus of jointed rock masses // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022, vol. 14, pp. 153–168. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.06.005.
9. Khairullaev A. M., Berdinova N. O., Syedina S. A., Abdikarimova G. B., Altayeva A. A. 3D block modeling of geomechanical properties of ore deposits using modern GMISs // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2022, vol. 6, no. 456, pp. 58–69. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.238.
10. Carranza-Torres C., Hormazabal E. Computational tools for the estimation of factor of safety and location of the critical failure surface for slopes in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion / Proceedings of the International Symposium Slope Stability–2020. Australian Centre for Geomechanics. 2020, pp. 1099–1122. DOI: 10.36487/ACGrepo/202573.
11. Abdikarimova G., Shamganova L., Berdinova N., Lakhbayeva Zh., Sedina S. On the question of predicting deformations in the vicinity of a deep quarry in a tectonically stressed rock mass // Engineered Science. 2025, vol. 37, article 1776. DOI: 10.30919/es1776.
12. Семенова И. Э., Амосов П. В., Кузнецов Н. Н., Некрасов В. А. Развитие подходов к расчету параметров напряженно-деформированного состояния массива пород по результатам измерений деформаций на торце скважины // Горная промышленность. — 2024. — № 5S. — С. 122–129. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-122-129.
13. Mohammed Sazid, Khaled Hussein, Khalid Abudurman Rock stress measurement methods in rock mechanics — A brief overview // World Journal of Engineering and Technology. 2023, vol. 11, pp. 252–272. DOI: 10.4236/wjet.2023.112018.
14. Hudson J. A. (ed.). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. ISRM, 2007.
15. Xu B., Liu S., Wang J. An analysis of slope stability based on finite element method and distinct element method // Journal of Physics: Conference Series. 2022, vol. 2148, article 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/2148/1/012053.
16. Salvini R., Ermini A., De Lucia V., Beltramone L. Stress–strain investigation of the rock mass based on overcoring with CSIRO HI cell test and numerical modeling: a case study from an Italian underground marble quarry // Geosciences. 2022, vol. 12, article 441. DOI: 10.3390/geosciences12120441.
17. Hutchinson D. J. Integrating monitoring data into risk assessment and management for rock slopes / SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2023, pp. 55–64. DOI: 10.36487/ACGrepo/23350.04.

18. Шамганова Л. С., Токсаров В. Н., Самоделкина Н. А., Кузьменко С. В. Использование акустического эффекта памяти для оценки напряженного состояния трещиноватых скальных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 116 – 129. DOI: 10.15372/FPVGN2019060144. [VIA3](#)

REFERENCES

1. Zubkov A. V., Selin K. V., Sentyabov S. V. Regularities of stress state formation of rock mass in the upper part of the Earth's crust. *Lithosphere*. 2015, no. 6, pp. 116–129. [In Russ].
2. Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kalyuzhny A. S. Possibility of dynamic manifestations of rock pressure in open pits. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. S1, pp. 56–60. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-56-60.
3. Makarov A. B., Usov A. A. Geomechanical model of a mine. Part 1. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 42–48. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.08.
4. Protosenya A. G., Belyakov N. A., Buslova M. A. Modeling of the stress–strain state of a block rock mass of ore deposits during extraction using caving systems. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 262, pp. 619–627. [In Russ].
5. Stacey T. R. Slope stability in high stress and hard rock conditions. *Slope Stability 2007: Proceedings of the International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2007, pp. 187–200. DOI: 10.36487/ACGrepo/708Stacey.
6. Satyanarayana, Gnananandh Budi, Murmu S. Stability analysis of a deep highwall slope using numerical modelling and statistical approach – a case study. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, vol. 14, no. 3. DOI: 10.1007/s12517-021-06476-x.
7. Sedina S. A., Altayeva A. A., Shamganova L. S., Abdykarimova G. B. Rock mass management to ensure safe deposit development based on comprehensive research within the framework of the geomechanical model development. *Mining of Mineral Deposits*. 2022, vol. 16, no. 2, pp. 103–109. DOI: 10.33271/mining16.02.103.
8. Zhang B., Mu J., Zheng J., Lv Q., Deng J. A new estimation method and an anisotropy index for the deformation modulus of jointed rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, pp. 153–168. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.06.005.
9. Khairullaev A. M., Berdinova N. O., Syedina S. A., Abdikarimova G. B., Altayeva A. A. 3D block modeling of geomechanical properties of ore deposits using modern GMISs. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2022, vol. 6, no. 456, pp. 58–69. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.238.
10. Carranza-Torres C., Hormazabal E. Computational tools for the estimation of factor of safety and location of the critical failure surface for slopes in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Proceedings of the International Symposium Slope Stability–2020. Australian Centre for Geomechanics*. 2020, pp. 1099–1122. DOI: 10.36487/ACGrepo/202573.
11. Abdikarimova G., Shamganova L., Berdinova N., Lakhbayeva Zh., Sedina S. On the question of predicting deformations in the vicinity of a deep quarry in a tectonically stressed rock mass. *Engineered Science*. 2025, vol. 37, article 1776. DOI: 10.30919/es1776.
12. Semyonova I. E., Amosov P. V., Kuznetsov N. N., Nekrasov V. A. Development of approaches to calculating stress–strain state based on deformation measurements in borehole end. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5S, pp. 122–129. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-122-129.
13. Mohammed Sazid, Khaled Hussein, Khalid Abudurman Rock stress measurement methods in rock mechanics – A brief overview. *World Journal of Engineering and Technology*. 2023, vol. 11, pp. 252–272. DOI: 10.4236/wjet.2023.112018.
14. Hudson J. A. (ed.). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*. ISRM, 2007.
15. Xu B., Liu S., Wang J. An analysis of slope stability based on finite element method and distinct element method. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2148, article 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/2148/1/012053.
16. Salvini R., Ermini A., De Lucia V., Beltramone L. Stress–strain investigation of the rock mass based on overcoring with CSIRO HI cell test and numerical modeling: a case study from an Italian underground marble quarry. *Geosciences*. 2022, vol. 12, article 441. DOI: 10.3390/geosciences12120441.

17. Hutchinson D. J. Integrating monitoring data into risk assessment and management for rock slopes. *SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2023, pp. 55 – 64. DOI: 10.36487/ACGrepo/23350.04.

18. Shamganova L. S., Toksarov V. N., Samodelkina N. A., Kuzmenko S. V. Acoustic memory effect for stress state evaluation in fractured rocks. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 1, pp. 116 – 129. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2019060144.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Абдыкаримова Гулнур Бакытбеккызы*¹ – старший научный сотрудник,
e-mail: abdykarimovagulnur@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0767-7538,

*Шамганова Ляззат Саевна*¹ – д-р техн. наук,
академик РОО НАН РК, зав. лабораторий,
e-mail: l.shamganova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5903-5118,

Токсаров Валерий Николаевич – канд. техн. наук, доцент,
старший научный сотрудник, Горный институт
Уральского отделения РАН, e-mail: toksarov67@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0006-105X,

*Бердинова Нагима Окасовна*¹ – ведущий научный сотрудник,
e-mail: bno0204@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8752-9406,

Хайруллаев Алихан Муктарулы – главный научный сотрудник,
Казахский национальный исследовательский технический университет
им. К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Казахстан,
e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com,
ORCID ID: 0000-0001-9521-1780,

¹ Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Казахстан.

Для контактов: Хайруллаев А.М., e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*G.B. Abdykarimova*¹, Senior Researcher,
e-mail: abdykarimovagulnur@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0767-7538,

*L.S. Shamganova*¹, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Public Association
«National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan»,
Head of Laboratory, e-mail: l.shamganova@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-5903-5118,

V.N. Toksarov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Senior Researcher, Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy
of Sciences, Perm, Russia, e-mail: toksarov67@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0006-105X,

*N.O. Berdinova*¹, Leading Researcher, e-mail: bno0204@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8752-9406,

A.M. Khairullaev, Chief Researcher, Satbayev University
(Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev),
Almaty, Republic of Kazakhstan, e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com,
ORCID ID: 0000-0001-9521-1780,

¹ D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Corresponding author: A.M. Khairullaev, e-mail: alikhan.khairullayev@outlook.com.

Получена редакцией 12.03.2026; получена после рецензии 28.04.2026; принята к печати 10.07.2026.

Received by the editors 12.03.2026; received after the review 28.04.2026; accepted for printing 10.07.2026.