# **РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК** СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

2022

УДК 622.271

# ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА КЕНТОБЕ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ ЦИФРОВОЙ ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ф. К. Низаметдинов<sup>1</sup>, В. Д. Барышников<sup>2</sup>, А. О. Оралбай<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, E-mail: oralbay\_aldiyar@mail.ru, просп. Нурсултана Назарбаева, 56, 100012, г. Караганда, Казахстан <sup>2</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: v-baryshnikov@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

На примере железорудного карьера Кентобе (Республика Казахстан) рассмотрены этапы выполнения наземного лазерного сканирования карьерного поля и обработки полученных данных с помощью программного комплекса Maptek I-Site Studio. Описана методика создания цифровой геолого-геомеханической модели, основу которой составляет множество пространственных точек, сформированных путем лазерного сканирования. Модель позволяет проводить детальное изучение геологического строения прибортовых массивов карьера с учетом структурно-тектонических особенностей и физико-механических свойств горных пород. На основе разработанной модели выполнена оценка устойчивости бортов и дано обоснование безопасных параметров карьерных откосов при понижении горных работ.

Прибортовой массив, опорный пункт, горный сканер, лазерное сканирование, геологогеомеханическая модель, коэффициент запаса устойчивости

DOI: 10.15372/FTPRPI20220603

Эффективность и безопасность открытых горных работ связаны с обеспечением устойчивости уступов и бортов карьера. Современный подход к геомеханической оценке и прогнозу состояния прибортовых массивов при проведении горных работ основывается на расчетах, выполненных с использованием цифровой геолого-геомеханической модели месторождений. Для решения геологических, маркшейдерских и геомеханических задач на горнодобывающих предприятиях требуется своевременное получение данных о геологическом строении месторождения, физико-механических свойствах горных пород, проектном и фактическом состоянии горных работ, а также наличие программного обеспечения (ПО) для их обработки [1–2].

Описание сбора и анализа исходных данных, перевода графической документации в цифровую, построение геолого-структурной модели и учет гидрогеологической составляющей для создания геомеханической модели месторождения рассмотрены в [3-5]. На основе модели выполняется расчет коэффициентов запаса устойчивости откосов и бортов карьера. Отмечается необходимость учета порядка залегания горных пород и их нарушенности для анализа устойчивости бортов карьера. Настоящая работа посвящена практической реализации геомеханической модели месторождения и получению оценки устойчивости прибортовых массивов при углубке карьера на нижних горизонтах на примере железорудного карьера Кентобе, расположенного в Каркаралинском районе Республики Казахстан.

№ 6

## ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТ ПО СКАНИРОВАНИЮ БОРТОВ КАРЬЕРА

Планирование открытых горных работ с крутыми углами и максимальной высотой откосов позволяет уменьшить затраты на экскавацию вскрышных горных пород. С этой целью создается геолого-геомеханическая модель, которая включает в себя основные геометрические и горно-технологические показатели. Геометрические параметры бортов карьера определяются техническим проектом отработки, его соблюдение контролируется маркшейдерской службой на основе результатов наблюдений с использованием опорной маркшейдерско-геодезической сети на дневной поверхности карьера [6].

Маркшейдерская опорная сеть карьера основана на пунктах триангуляции, используемых при производстве съемок контуров рельефа местности, при перенесении проектного расположения выработок и буровзрывных скважин в натурные условия, при привязке разведочных выработок и объектов геологоразведочных наблюдений, а также при наблюдениях за сдвижением земной поверхности и прибортовых массивов по реперам профильных линий. Для уменьшения погрешности измерений опорные пункты располагаются в местах, обеспечивающих их сохранность и устойчивость в сложных погодных условиях до окончания отработки месторождения. Устанавливаются пилоны с учетом видимости других опорных пунктов и максимально возможным обзором противоположного борта. Общая высота пилона составляет 3.0-3.5 м, в том числе над земной поверхностью 1.2-1.3 м, остальная часть бетонируется в заранее пробуренную скважину ниже глубины промерзания грунта [6-8].

На рассматриваемом карьере размещены четыре пилона на верхних уступах северовосточного, северо-западного, юго-восточного и юго-западного бортов. Для выполнения съемки лазерный сканер устанавливается на пилоне и проводится его настройка, фиксируется высота инструмента от края трубы до опорной метки на сканере. После подключения планшета к сканеру в систему сканирования вводятся данные этих замеров и координаты двух точек: установки и ориентирования. Для снижения погрешности измерений в систему вводятся данные атмосферного давления и температуры воздуха, которые в дальнейшем учитываются при обработке результатов съемки [6–9].

После настройки сканера выполняется автоматическое панорамное фотографирование противоположного прибортового массива, по которому корректируется освещенность местности и область сканирования. В зависимости от задачи сканирования и заданной точности измерений выбирается количество циклов сканирования (1–16). Увеличение числа циклов позволяет снизить ошибку измерений координат точек. При съемках применялась схема сканирования с числом циклов, равным восьми.

Время сканирования прибортового массива из одной точки (пилона) занимает около 1.5 ч. Для получения полной картины состояния уступов бортов карьера дополнительно выставляются временные точки на нижних горизонтах восточной и западной частей. В общей сложности для детальной съемки карьера требуется около 7 ч, что по сравнению с тахеометрической съемкой позволяет сэкономить до двух рабочих дней. В целом лазерное сканирование по сравнению с другими геодезическими инструментами позволяет получить высокоточные и детализированные данные и обеспечивает безопасность ведения маркшейдерских съемок, включая работы на опасных участках карьера. При этом затраты на проведение съемки по всему контуру карьера значительно сокращаются.

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Полученные данные сканирования с планшета передаются на компьютер и далее обрабатываются с помощью программного комплекса Maptek I-Site Studio [8]. После загрузки данных в программу с включенной функцией автоматического начального позиционирования в ПО I-Site Studio проводится соединение одних и тех же точек, полученных с различных ракурсов и шести сканов, для создания трехмерного облака точек на поверхности карьера.

Для исключения влияния запыленности в период съемки, а также при увеличении плотности точек с перекрытием сканов одного и того же места в ПО I-Site Studio применялась опция фильтрации. Она предназначена для удаления лишних или близко расположенных точек, а также для исключения из сканов точек, полученных от пыли. При помощи фильтров "полигон" и "поверхность" удаляются все точки, расположенные вне карьера.

На панели программы I-Site Studio во вкладке "триангуляция" выбирается способ создания цифровой модели карьера из облака точек. В программе имеется четыре различных способа: поверхность слияния, топографическая, сферическая и спиральная триангуляция. При создании цифровой модели в настоящей работе выбран способ сферической триангуляции. Учитывая, что сетка триангуляции накладывается на сферическую поверхность с центром в точке расположения сканера, этот способ изображения эффективен для съемки нависающих поверхностей откосов и уступов.

Сравнение параметров цифровой модели, построенной на основе лазерного сканирования, с ранее полученными результатами тахеометрической съемки показало, что последняя дает погрешность в определении координат различных участков откосов и уступов более 3 %. Можно заключить, что результаты тахеометрической съемки не обеспечивают достаточную надежность съемки контура карьера.

С использованием программы I-Site Studio проведено картирование всех уступов с определением структуры залегания горных пород, разломов и трещин для построения геологогеомеханической модели [10]. Сравнение полученных результатов с ранее выполненным ручным картированием карьера показало, что рассмотренный способ более быстрый и точный. Сформированную цифровую модель (облако точек) можно экспортировать в другие программные комплексы, используемые при проведении горных работ (AutoCad, Surpac, Micromine) [11].

Следующий этап создания цифровой модели состоит в построении блочной модели карьера. Он осуществляется в программе Surpac, предназначенной для геологического и горного планирования с возможностью визуализации различных цифровых моделей. На этом этапе происходит детальное геомеханическое изучение слагающих типов горных пород бортов карьера и определение их геологической структуры по данным исследований инженерногеологических скважин.

По данным проб геологических разрезов и скважин установлены цифровые диапазоны изменения параметров для каждого типа пород. Далее создавались цифровые атрибуты: тип породы, физико-механические свойства, содержание железа и т. д., с присвоением им соответствующих индексов [3-5, 12-14].

В программном комплексе Surpac используются несколько методов вычислений параметров цифровых атрибутов модели. Построение блочной модели для карьера Кентобе осуществлялось с помощью гибкого и широко применяемого метода интерполяции — ординарного кригинга, который учитывает пространственную корреляцию. Далее выполнялась сверка полученных результатов с исходными данными о состоянии горного массива с целью корректировки цифровой модели. Построенная блочная модель карьера содержит параметры залегания горных пород и разрывных нарушений. В пределах рудного поля карьера Кентобе выявлено 14 разломов. Четыре разлома обнаружены на основном участке, где ведутся горные работы: два разлома в западной и северной частях карьера ограничивают район распространения рудных тел, другие два нарушают их целостность. Верхние уступы восточного, юго-восточного и западного бортов в основном сложены аральской (зеленовато-серые, вязкие глины) и павлодарской (краснобурые глины) свитами, мощность которых составляет 10–60 м. Большая часть северного борта представлена ороговиками черных углисто-кремнистых сланцев, южного борта — ороговиками желтовато-серых туфогенных песчаников, алевролитов и туффитов. Рудные тела залегают в направлении запад – восток.

В построенной цифровой модели фактические параметры контура карьера, полученные после сканирования, и проектные параметры откосов уступов и бортов карьера используются в качестве ограничителей для блочной модели. Знание пространственного расположения горных пород облегчает создание цифровых геологических разрезов, необходимых для расчета коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера (рис. 1). Разрезы для расчета устойчивости бортов выбраны на участках с наиболее слабыми и склонными к оползню горными породами. Полученные данные экспортируются в любые форматы графических программ, а также в программы, обеспечивающие другие виды расчетов.



Рис. 1. План карьера с указанием опорных и временных пунктов и расположение разрезов (1-10) по наиболее опасным участкам

# АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА

Оценка коэффициента запаса устойчивости бортов осуществлялась в программе Rocscience Slide, предназначенной для расчета вероятности разрушения пород на основе анализа предельного состояния. По данным измерений деформационного поля и упругих свойств слагающих пород в программе для анализа устойчивости рассчитывается поле действующих напряжений и применяется заданный критерий предельного состояния (например, критерий Кулона – Мора). В результате фиксируются зоны вероятного разрушения, где выполняется критерий предельного состояния.

В программу импортируется созданная ранее геолого-геомеханическая модель, включающая геологическое строение, физико-механические свойства горных пород, уровень подземных вод, данные о разрезах фактического и проектного состояний борта, а также показатели проч-30 ности по критерию Кулона–Мора [3–5, 15–17]. Показатели физико-механических свойств горных пород, полученные по результатам лабораторных и натурных исследований, приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1.	Физико-механические свойства горных пород, сл	лагающих прибо	ртовые массие	вы карьера

Порода	Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град
Красно-бурые глины павлодарской свиты	20.3	20	18
Ороговикованные желтовато-серые туфогенные песчаники	27.6	260	37
Ороговикованные черные углисто-кремнистые сланцы	27.4	530	32
Пироксен-плагиоклазовые роговики	28.7	400	34
Скарнированные роговики	28.0	316	33
Дайки диабазовых и диоритовых порфиритов	27.0	300	33
Мартитовые и магнетитовые руды	43.6	400	35

Результаты оценки устойчивости откосов уступов и бортов, полученные с помощью программы Rocscience Slide, по всем выделенным разрезам приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Коэффициенты запаса устойчивости бортов и откосов уступов по	о фактическим
и проектным контурам карьера	

Fort H pappar	Положение	Коэффициент запаса устойчивости		
bopt in paspes	борта	борта	верхних глинистых уступов	
Северо-западный	Фактическое	2.041		
1-1	Проектное	1.654		
Юго-восточный	Фактическое	2.414	1.627	
1-1	Проектное	1.857	0.561	
Северный	Фактическое	2.096		
2-2	Проектное	1.656		
Южный	Фактическое	1.901	1.526	
2-2	Проектное	1.626	1.491	
Северо-восточный	Фактическое	2.356	0.949	
3-3	Проектное	1.757	0.847	
Северо-восточный	Фактическое	2.538	0.941	
4-4	Проектное	1.653	0.996	
Восточный	Фактическое	2.458	1.336	
5-5	Проектное	1.517	0.775	
Восточный	Фактическое	2.085	1.106	
6-6	Проектное	1.457	0.509	
Северный	Фактическое	2.638		
7-7	Проектное	2.006		
Южный	Фактическое	2.327	—	
7-7	Проектное	1.966	—	
Северный	Фактическое	1.664	—	
8-8	Проектное	1.493		
Южный	Фактическое	1.904		
8-8	Проектное	1.627		
Западный	Фактическое	2.417	2.028	
9-9	Проектное	2.057	2.057	
Западный	Фактическое	2.172	1.426	
10-10	Проектное	1.504	0.488	

В соответствии с действующими методическими указаниями [1] коэффициент запаса устойчивости борта  $n_y$  при сроке службы карьера более 10 лет должен составлять 1.3 или более. В зонах с  $n_y = 1.0 - 1.3$  борта находятся в предельно допустимом состоянии, требующем обязательного контроля. При  $n_y \le 1$  они находятся в неустойчивом состоянии.

На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости бортов и уступов по разрезу 3-3 в северо-восточном борту (рис. 2a) и по разрезу 6-6 в юго-западном борту (рис.  $2\delta$ ), выполненные для фактического контура действующего карьера и его проектного положения на момент окончания открытой отработки запасов.



Рис. 2. Коэффициенты запаса устойчивости бортов карьера по разрезам 3-3 (*a*) и 6-6 (*б*) для существующего контура и проектного его положения при завершении открытой отработки запасов

По разрезу 3 – 3 коэффициент запаса устойчивости  $n_y$  для фактического положения контура карьера составил 2.356, для проектного — 1.757 (табл. 2). Однако для верхних глинистых уступов по разрезу 3 – 3 для фактического положения северо-восточного борта  $n_y$  равен 0.949, для проектного — 0.847, что свидетельствует о его неустойчивом состоянии. По разрезу 6 – 6 значение  $n_y$  для фактического состояния борта — 2.085, для проектного — 1.457. Предельное состояние верхних глинистых уступов составляет при фактическом положении контура карьера  $n_y = 1.106$ , для его проектного состояния  $n_y = 0.509$  (неустойчивое состояние). Полученные результаты в целом свидетельствуют об устойчивом состоянии бортов карьера ниже границ залегания глинистых пород, где  $n_y > 1.5$ . Анализ устойчивости бортов и уступов по 10 разрезам показывает, что в неустойчивом состоянии находятся только верхние глинистые уступы по большинству расчетных разрезов ( $n_y < 1$ ), что требует изменения их геометрических параметров (табл. 2).

Анализ полученных значений коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера позволил выполнить районирование приконтурных массивов с выделением трех зон (рис. 3): зона 1 -коэффициент запаса  $n_y \le 1.0$  и борт является неустойчивым; зона  $2 - n_y = 1.0 - 1.3$ , борт находится в предельно допустимой области устойчивости; зона  $3 - n_y > 1.3$  соответствует устойчивой зоне. В отмеченных на рис. З зонах 1 и 2 на участках глинистых уступов ранее наблюдались деформации и оползни. В районе расположения зон 1 в северо-восточной части карьера требуется уточнить параметры глинистых откосов уступов или разработать мероприятия по отводу от карьера талых и дождевых вод, оказывающих существенное влияние на устойчивость горных пород.



Рис. 3. Расположение на плане карьера опасных зон (1) и участков предельного состояния уступов (2)

#### выводы

По результатам лазерного сканирования создана цифровая модель фактического контура уступов бортов карьера. Сравнение цифровых моделей, полученных по результатам тахеометрической съемки и лазерного сканирования, показало, что лазерное сканирование повышает точность маркшейдерской съемки и обеспечивает безопасность выполнения съемочных работ на карьере. При этом существенно уменьшаются затраты времени на проведение полевых и камеральных работ. Разработана цифровая геолого-структурная модель прибортовых массивов, учитывающая структуру залегания и физико-механические свойств горных пород, данные лазерного сканирования сформированных контуров откосов уступов. На основе цифровой модели месторождения выполнена оценка устойчивости прибортовых массивов по десяти геологическим разрезам карьера. Установлено, что верхние глинистые уступы на северовосточном борту находятся в неустойчивом состоянии ( $n_y < 1.0$ ), а уступы на восточном и юго-западном бортах — в предельно допустимом состоянии ( $n_y = 1.0 - 1.3$ ). Остальные зоны бортов карьера являются устойчивыми ( $n_y > 1.3$ ). На опасных глинистых участках прибортовых массивов рекомендуется скорректировать параметры уступов и разработать меры для отвода паводковых вод.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Алматы, 2008.
- Мониторинг состояния откосов уступов и бортов карьеров / Φ. К. Низаметдинов, С. Г. Ожигин, С. Б. Ожигина и др. — Здибы, 2015. — 350 с.
- **3.** Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Ч. 1. Создание // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 42-48.

- 4. Съедина С. А., Балтиева А. А., Шамганова Л. С. Разработка 3D геомеханических моделей для подземных рудников и карьеров // Проблемы недропользования. — 2018. — № 1. — С. 60-65.
- Fleurisson J. A. Slope design and implementation in open pit mines: geological geomechanical approach, Proc. Eng., 2012, Vol. 46. — P. 27–38.
- 6. Dorokhov D. V., Nizametdinov F. K., Ozhigin S. G., and Ozhigina S. B. A technique for surveying of ground surface deformations in mine field, J. Min. Sci., 2018, Vol. 54, No. 5. P. 874–882.
- 7. Игемберлина М. Б., Естаева А. Р., Низаметдинов Р. Ф., Сатбергенова А. К. Применение современных технологий при проведении геодезического мониторинга сдвижений земной поверхности // Горн. журн. Казахстана. — 2020. — № 3. — С. 19–24.
- Lienhart W. Case studies of high-sensitivity monitoring of natural and engineered slopes, J. Rock Mech. Geotech. Eng., 2015, Vol. 7, Iss. 4. — P. 379–384.
- 9. Низаметдинов Ф. К., Барышников В. Д., Жанатулы Е., Нагибин А. А., Туякбай А. С., Низаметдинов Р. Ф., Естаева А. Р. Обоснование и выбор расчетных параметров прочностных свойств горных пород для оценки устойчивости бортов карьеров // ФТПРПИ. — 2021. — № 3. — С. 31–37.
- 10. Нурпеисова М. Б., Милетенко И. В. Геомеханика. Алматы: КазНТУ, 2014. 275 с.
- Moldabayev S., Rysbayuli B., Sultanbekova Z., and Toktarov A. Methodical approach to creation of the 3D model of oval form open pit mine, 17<sup>th</sup> Int. Symp. Env. Issues Waste Management Energy Min. Prod. (SWEMP 2017), Lulea, Sweden, 2017. — P. 257–264.
- Цирель С. В., Павлович А. А., Мельников Н. Я., Зуев Б. Ю. Физическое моделирование процессов деформирования прибортового массива карьера с крутопадающей слоистостью горных пород // ФТПРПИ. 2019. № 3. С. 22-30.
- **13.** Мельниченко И. А., Кириченко Ю. В. Пространственное районирование месторождений полезных ископаемых // ГИАБ. 2021. № 4. С. 46–56.
- **14.** Лихман А. А. Геологическая блочная модель как главный актив горнодобывающего предприятия // Недропользование XXI век. — 2020. — № 4. — С. 170–175.
- **15.** Ozhigin S. G., Ozhigina S. B., and Ozhigin D. S. Method of computing open pit slopes stability of complicated-structure deposits, Inz. Mineral., 2018, Vol. 19, No. 1. P. 203–208.
- 16. Sannikova A. P., Bazykina L. R., and Ozhigin D. S. Methodology for effective determination of rock jointing in calculation of open pit edges, J. Ind. Pollut. Control, 2017, Vol. 33, No. 1. P. 852–855.
- Qinghua Lei and Ke Gao A numerical study of stress variability in heterogeneous fractured rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2019, Vol. 113. — P. 121–133.

Поступила в редакцию 23/VII 2022 После доработки 17/XI 2022 Принята к публикации 24/XI 2022