

И. Т. Андреев¹

Комплексная оценка устойчивости бортов карьера: методы расчета, мониторинг и прогнозирование

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: vano.tim0feevich@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного геомеханического исследования устойчивости бортов карьера «Центральный» на месторождении Ведуга. На основе исходных данных о горно-геологических условиях выполнен расчет ширины призмы возможного обрушения, который показал значения 2,82 м для участка высотой 47 м. Проведенный кинематический анализ в программном комплексе Swedge для уступа гор. +460-430 м выявил минимальный риск крупномасштабного обрушения (коэффициент запаса устойчивости КЗУ = 1,7), однако подтвердил возможность формирования локальных клиньев. С использованием методики обратного расчета выполнена калибровка прочностных параметров трещиноватости, что позволило определить значение сцепления по трещинам, соответствующее предельному равновесию (КЗУ = 1), которое составило 6,5 кПа. Комплекс примененных методик демонстрирует эффективность для прогнозирования зон деформации, оценки рисков и обоснования превентивных мероприятий по обеспечению безопасности горных работ. Разработанный подход может быть адаптирован для других горнодобывающих предприятий со схожими геологическими условиями.

Ключевые слова: устойчивость борта карьера, коэффициент запаса устойчивости (КЗУ), призма обрушения, кинематический анализ, обратный расчет, безопасность горных работ

I. T. Andreev¹

Comprehensive Assessment of Quarry Borders Stability: Calculation Methods, Monitoring, and Forecasting

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: vano.tim0feevich@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a comprehensive geomechanical study of the stability of the Central quarry walls at the Veduga deposit. Based on the initial data on the mining and geological conditions, the width of the possible collapse prism was calculated, which showed values of 2.82 m for a section with a height of 47 m. The kinematic analysis conducted in the Swedge software package for the +460-430 m ledge revealed a minimal risk of large-scale collapse (with a safety factor of 1.7), but confirmed the possibility of local wedge formation. Using the inverse calculation method, the strength parameters of the fracturing were calibrated, which allowed us to determine the value of the fracture adhesion corresponding to the ultimate equilibrium (FAD = 1), which was 6.5 kPa. The combination of these methods demonstrates their effectiveness in predicting deformation zones, assessing risks, and justifying preventive measures to ensure the safety of mining operations.

Keywords: stability of a quarry side, stability factor (SF), collapse prism, kinematic analysis, reverse calculation, safety of mining operations

Введение

Актуальность проблемы обеспечения устойчивости бортов карьеров возрастает с увеличением глубины открытых разработок и усложнением инженерно-геологических условий [1, 2]. Современные методы оценки устойчивости включают как аналитические расчеты, так и численное моделирование, позволяющие прогнозировать поведение горного массива под воздействием техногенных и природных факторов [3, 4].

Карьер «Центральный» характеризуется сложными геологическими условиями, включающими интенсивную трещиноватость массива, что предопределяет риск образования клиновых вывалов и локальных обрушений.

Для данного объекта необходим комплексный подход, сочетающий методы прогнозирования зон потенциального разрушения, детального анализа конкретных уступов и калибровки расчетных моделей по натурным наблюдениям.

Целью настоящего исследования является комплексная оценка устойчивости бортов карьера «Центральный» с применением методов расчета призмы обрушения, кинематического и обратного анализа.

Задачи исследования:

- выполнить расчет ширины призмы возможного обрушения для типовых участков борта карьера;
- провести кинематический анализ устойчивости уступа с выявленными деформациями для определения коэффициента запаса устойчивости и вероятных механизмов разрушения;
- произвести обратный расчет для калибровки прочностных характеристик трещин на основе допущения о предельном равновесии массива;
- разработать рекомендации по мониторингу и обеспечению безопасности ведения горных работ.

Методы и материалы

Объектом исследования выступил борт карьера «Центральный». Визуальный осмотр западного борта на уступе гор. +460-430 м выявил локальные деформации по типу нависей и заколов, что свидетельствует об активности деформационных процессов.

Использованные методы и исходные данные. Расчет призмы обрушения выполнен согласно «Правилам обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах» (1993 г.). Метод основан на определении зоны потенциального разрушения в однородном массиве с трещиноватостью [5]. Для карьера «Центральный» приняты следующие параметры:

- высота борта (H) = 47 м;
- генеральный угол откоса (d) = 20° ;
- угол внутреннего трения пород = 28° ;
- коэффициент обводнения (k) = 0,2.

Кинематический анализ проведен в специализированном программном обеспечении Swedge (Rocscience). Метод позволяет оценить устойчивость откоса

против образования клиньев, сформированных пересекающимися системами трещин [6]. Исходные данные для анализа:

- высота уступа: 30 м;
- угол откоса: 55° ;
- система трещин 1: падение $50-55^\circ$, азимут падения $50-60^\circ$, сцепление 20 кПа, угол трения 26° ;
- система трещин 2: падение $50-55^\circ$, азимут падения $130-140^\circ$, сцепление 20 кПа, угол трения 26° .

Обратный расчет КЗУ выполнен в программе Swedge. Принцип метода заключается в определении таких прочностных параметров массива (например, сцепления по трещинам), при которых коэффициент запаса устойчивости становится равным 1 (предельное состояние) [7]. Это позволяет калибровать модель по данным о фактических обрушениях или значительных деформациях.

Результаты

Расчет ширины призмы возможного обрушения. По результатам расчета, выполненного согласно графическим зависимостям [5]. Определяется значение отношения $\frac{a}{H}$, соответствующее углу внутреннего трения и углу наклона борта карьера в соответствии с коэффициентом обводненности (k). Для карьера «Центральный» отношение $\frac{a}{H}$ составило 0,06 (рис. 1).

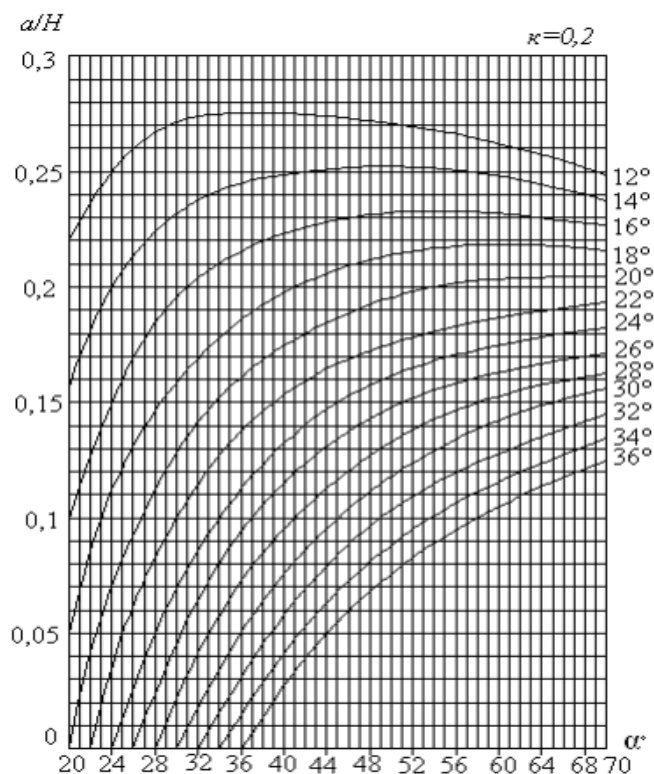


Рис. 1. График зависимости между высотой плоского откоса H и его углом наклона α при коэффициенте обводнения $k = 0,2$

Расчетная ширина призмы обрушения составила 2,82 м (формула 1):

$$a = H \cdot \left(\frac{a}{H}\right) = 47 \text{ м} \cdot 0,06 = 2,82 \text{ м}, \quad (1)$$

где H – высота плоского откоса, м;

$\frac{a}{H}$ – отношение, соответствующее углу внутреннего трения и углу наклона борта карьера в соответствии с коэффициентом обводненности (k).

Данный результат означает, что зона потенциального обрушения на верхней бровке борта простирается вглубь массива на 2,82 метра. Эта информация является критически важной для планирования расположения промышленных объектов и безопасных зон на борту карьера, а также для определения зон, требующих усиленного мониторинга.

Кинематический анализ устойчивости уступа. Проведенный в ПО Swedge анализ показал, что риск общего обрушения исследуемого уступа минимален. Рассчитанный коэффициент запаса устойчивости составил 1,7, что превышает нормативное значение для временных уступов, а вероятность обрушения равна 0.

Однако анализ выявил возможность образования локальных клиньев в результате взаимодействия двух систем трещин (рис. 2). Несмотря на то, что сильная нарушенность массива делает формирование крупных клиньев маловероятным, риск отрыва отдельных блоков и формирования нависей сохраняется.

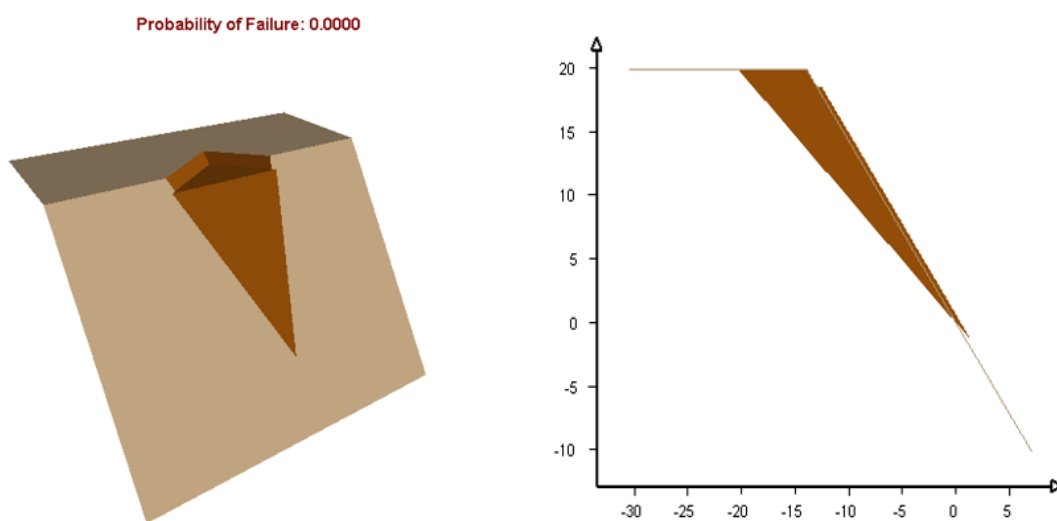


Рис. 2. Результат кинематического анализа

Выводы по кинематическому анализу:

- общая устойчивость уступа обеспечена ($KЗУ=1,7$);
- существует риск локальных вывалов в виде клиньев;
- для обеспечения безопасности необходимо проведение профилактической оборки нависей и заколов механическим способом.

Обратный расчет прочностных параметров. С целью верификации и калибровки модельных параметров был выполнен обратный расчет. В качестве условия был принят предельный случай, когда коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) равен 1. В качестве варьируемого параметра было выбрано сцепление по поверхностям трещин.

В результате построения графика зависимости КЗУ от величины сцепления было установлено, что значению $KЗУ = 1$ соответствует сцепление 6,5 кПа (рис. 3).

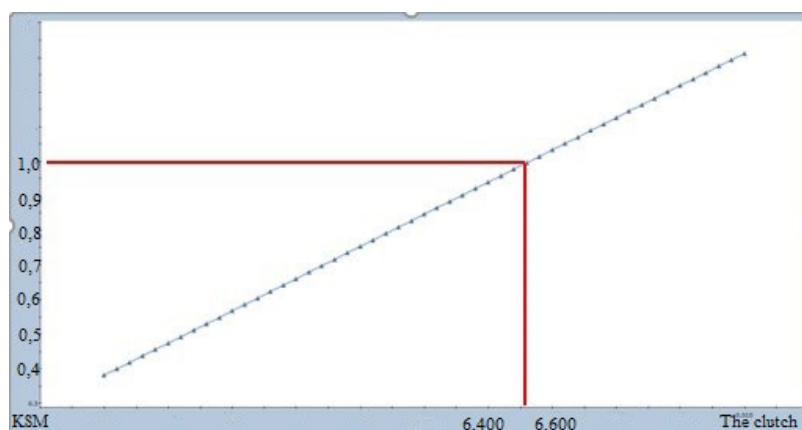


Рис. 3. Определение искомого сцепления

Это значение существенно ниже базового, принятого для систем трещин 1 и 2 (20 кПа). Данное расхождение может быть объяснено следующими факторами:

- влияние выветривания: приповерхностная зона борта подвержена интенсивному атмосферному воздействию, что приводит к снижению прочности трещин;
- влияние воды: несмотря на низкий коэффициент обводнения, периодическое замачивание осадками может временно снижать сцепление;
- масштабный эффект: лабораторные или точечные определения прочности могут давать завышенные значения по сравнению с осредненной прочностью трещиноватого массива в натурных условиях.

Полученное значение сцепления (6,5 кПа) может быть рекомендовано для использования в прогнозных расчетах устойчивости аналогичных нарушенных массивов в условиях карьера «Центральный».

Таким образом, комплексное применение различных методов оценки, результаты которого систематизированы в таблице 1, позволило получить всестороннюю характеристику устойчивости борта: от прогнозирования зоны возможного обрушения до количественного определения запаса прочности и калибровки модельных параметров.

Сводная таблица результатов расчетов

Метод оценки	Расчетный параметр	Значение	Вывод
Расчет призмы обрушения	Ширина призмы (а)	2,82 м	Определена зона риска на бровке борта
Кинематический анализ	КЗУ	1,7	Общая устойчивость уступа обеспечена
Обратный расчет	Сцепление при КЗУ = 1	6,5 кПа	Получена калиброванная характеристика для нарушенного массива

Обсуждение

На примере карьера «Центральный» показана эффективность комплексного подхода к оценке устойчивости бортов, включающего:

- прогнозное картирование зон риска с помощью расчета призмы обрушения, что позволяет заблаговременно планировать мероприятия по безопасному ведению работ;
- детальную количественную оценку устойчивости конкретных уступов методом кинематического анализа, позволяющую определить коэффициент запаса и вероятные механизмы разрушения;
- калибровку модельных параметров методом обратного расчета, что повышает достоверность прогнозных оценок для участков с признаками деформации.

Заключение

Практические рекомендации для карьера «Центральный» включают:

- установление охранной зоны шириной не менее 3 метров от бровки борта в соответствии с расчетом призмы обрушения;
- регулярный мониторинг состояния уступа гор. +460-430 м с акцентом на выявление и своевременную оборку локальных нависей и клиньев;
- использование значения сцепления 6,5 кПа для моделирования участков с интенсивной трещиноватостью и признаками выветривания.

Разработанный методический подход может быть успешно применен на других карьерах с аналогичными горно-геологическими условиями для повышения уровня промышленной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломтадзе В. Д., Горбунова Е. А. Методы и технические средства мониторинга устойчивости бортов карьеров // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 300–308.
2. Фомин А. А., Курленя М. В., Таланов Г. П. Комплексный геомеханический мониторинг при отработке глубоких карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 3. – С. 124–135.
3. Hoek, E., Bray, J. W. Rock Slope Engineering. – CRC Press, 1981.

4. Wyllie, D.C., Mah, C.W. Rock Slope Engineering: Civil and Mining. – 4th ed. – Spon Press, 2004.
5. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – Санкт-Петербург, 1993. – 208 с.
6. Rocscience Inc. Swedge – Probabilistic Analysis of the Geometry and Stability of Surface Wedges. – Toronto, Canada.
7. Дик Г. Дж. Разработка методологии анализа времени до разрушения для раннего предупреждения обрушений откосов карьеров // Дис. на соиск. уч. степ. магистра прикл. наук. Университет Британской Колумбии. – 2013. – 436 с.

© И. Т. Андреев, 2026