

14. Корнилов С.В., Лаптев Ю.В., Яковлев В.Л. Принципы оптимизации стратегии развития горнотехнических систем глубоких карьеров // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 4–14.
15. Jethro M.A., Onyemaobi O.O., Xiao Z. Optimizing fragmentation for efficient loading and haulage operations // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022. – Vol. 32, № 4. – P. 717–728. – DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.05.002.
16. Das R., Topal E., Mardaneh E. Concurrent optimisation of open pit ore and waste movement with optimal haul road selection // Resources Policy. – 2024. – Vol. 91. – Article 104940. – DOI: 10.1016/j.resourpol.2024.104940.
17. Pathan A.G., Saqib S., Ali M., Memon Z.A. Simulation optimization of shovel-truck system in open-pit mines considering rockmass parameters // Journal of Advanced Transportation. – 2025. – Vol. 2025. – Article 7939037. – DOI: 10.1155/atr/7939037.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Umarov Farhodbek Yarkulovich	— Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Scientific Consultant; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS, Almalyk, Uzbekistan. E-mail: farkhodbek.umarov@yandex.ru ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-5173-4561
Karimov Sherzod Vafo o'g'li	— Applicant for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS, Almalyk, Uzbekistan.
Tuychiboev Eldor Ilhom o'g'li	— Basic Doctoral Student; Almalyk Branch of the National University of Science and Technology MISIS, Almalyk, Uzbekistan.

МАРКШЕЙДЕРСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОСУШЕННОГО ПРИБОРТОВОГО МАССИВА УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА «АНГРЕНСКИЙ» НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ

Баймирзаев Б.Ж., Муродбеков У.Ф., Саййидкасимов С.С.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

Doi: 10.5281/zenodo.21590665

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты маркшейдерского мониторинга геомеханических процессов и прогноза устойчивости осушенного прибортового массива угольного разреза «Ангренский» на основе объемных геолого-геомеханических моделей. Автором разработан алгоритм прогноза, включающий построение триангуляционной модели прибортового массива, определение физико-механических параметров с учетом анизотропии влажности и расчет коэффициента устойчивости методом предельного равновесия. Прогноз по геологическим разрезам 1–1, 2–2, 3–3 показал повышение коэффициента устойчивости с 1,00–1,04 до 1,06–1,09 (прирост 5–6 %) после реализации комплекса опережающего осушения. Показало, что внедрение объемных моделей в практику маркшейдерского обеспечения открытых горных работ позволяет повысить точность прогноза и достоверность выбора параметров борта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

маркшейдерский мониторинг, геомеханические процессы, прибортовой массив, угольный разрез, прогноз устойчивости, объемная геолого-геомеханическая модель, метод предельного равновесия, коэффициент устойчивости, опережающее осушение.

Введение

Обеспечение устойчивости бортов угольных разрезов является одной из ключевых задач маркшейдерского обеспечения безопасности открытых горных работ. Отсутствие своевременного выявления оползнеопасных зон связано с особенностью построения разведочных сетей, которая заключается в интерполяции

скважинных данных в межскважинном пространстве. В результате факторы, влияющие на возникновение геомеханических процессов, могут быть не выявлены или частично выявлены за счет недостаточной детализации [1, 2].

В настоящее время широкое распространение получили геомеханические методы исследования состояния прибортовых массивов,

основанные на взаимосвязи параметров состояния и свойств горных пород с параметрами физических полей [3]. С учетом современной тенденции использования средств автоматизации для повышения точности прогноза актуальной задачей является разработка алгоритмов прогноза устойчивости на основе объемных геолого-геомеханических моделей [4, 5].

Целью настоящей работы является разработка и апробация методики маркшейдерского мониторинга геомеханических процессов и прогноза устойчивости осушенного прибортового массива угольного разреза «Ангренский» с использованием объемных геолого-геомеханических моделей.

Методика исследований

В результате анализа геомеханических процессов на рабочем борту разреза «Ангренский» выявлены наиболее масштабные действующие оползни, увлажненные прибортовые массивы горных пород, снижающие безопасность и нарушающие технологический режим работы предприятия. Установлена хронология развития деформаций, проанализированы базы данных геологической разведки, маркшейдерских инструментальных наблюдений за деформациями и электрических зондирований прилегающего прибортового массива.

Исходя из установленной динамики развития деформационных процессов, для разработки инженерных мероприятий по стабилизации оползня методом обратных расчетов были определены показатели сопротивления сдвигу, направленных на стабилизацию оползня, методом обратных расчетов определены показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения прибортового массива горных пород (табл. 1).

Условие предельного равновесия при алгебраическом сложении сил на наиболее напряженной поверхности записывается в виде:

$$n_{уст} = \frac{tg\phi_p \cdot \sum P_i \cdot g \cdot \cos \phi_i + C_p \cdot \sum l_i}{\sum P_i \cdot g \cdot \sin \phi_i}$$

Расчеты с учетом обводненности массива производились по формуле:

$$n = \frac{\sum (P_i \cdot \cos \phi_i - D_i) + k_i \cdot l_i}{\sum P_i \cdot \sin \phi_i}$$

На основании полученных исходных данных построена объемная геолого-геомеханическая модель прибортового массива и прилегающих увлажненных уступов. Для поиска наиболее опасного сечения предложен алгоритм прогноза устойчивости на основе объемных геолого-геомеханических моделей.

Для оценки устойчивости был разработан и использован четырехэтапный алгоритм прогноза устойчивости, позволяющий определить наиболее опасные сечение:

1. Построение объемной модели. Маркшейдерские планы и геологические разрезы переводятся в цифровой формат, строится триангуляционная модель поверхности борта, рельефа и границ аномальных зон с выделением поверхностей ослабления и влагонасыщенных зон.

2. Задание исходных данных. Вводятся физико-механические параметры ϕ , C , γ для зон естественной влажности и влагонасыщения, а также граничные условия (поровое давление, сейсмическое воздействие).

3. Формирование расчетной схемы. Задаются координаты первого расчетного сечения, величины линейного (Δl) и углового ($\Delta \alpha$) шага смещения расчетных сечений, а также шаг поиска (Δa) наиболее напряженной поверхности скольжения с автоматическим построением веера расчетных сечений.

4. Расчет и визуализация. В каждом расчетном сечении вычисляется сумма удерживающих и сдвигающих сил и определяются коэффициенты устойчивости методом предельного равновесия; результаты наносятся на поверхность модели в виде изолиний $E(n)$, по которым идентифицируются оползнеопасные зоны и формируются горно-геометрические графики.

Результаты и их обоснование

Прибортовой массив опасной зоны сложен породами мезо-кайнозойского покрова с преобладанием пород глинистого состава. Падение слоистости близкое к горизонтальному. Строение массива осложнено разрывными нарушениями, классифицируемыми как взбросо-надвиги с очень пологим сместителем в нижней части и крутым в верхней.

Для прибортового массива характерно цикличное развитие деформационного процесса: параллельно верхней бровке откоса многократно формируются вертикальные трещины отрыва, происходит оседание и горизонтальное смещение отколовшихся блоков. При анализе результатов маркшейдерских инструментальных и визуальных наблюдений поверхность скольжения приурочена к глинам и пескам сузакского яруса палеогена.

Основной причиной интенсивных геомеханических процессов является инфильтрация поверхностных и подрусловых вод через разрывные нарушения, за счет чего образуется естественная поверхность ослабления и происходит снижение показателей сопротивления сдвигу переувлажненных глин.

Таблица 1.

Показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения прибортового массива горных пород

Литологическая разность	φе, град. (ест. влажн.)	φв, град. (влагонасыщ.)	Се, кН/м ² (ест. влажн.)	Св, кН/м ² (влагонасыщ.)
Известняки, мергели, песчаники	0	0	0	0
Глины сузакского яруса	6,5–7,5	5,5–6,5	2,9–3,9	2,5–2,9
Глины песчаные	18–22	14–16	17,7–35,3	5,3–10,6

С использованием полученных показателей выполнен прогноз устойчивости по трем геологическим разрезам (1–1, 2–2, 3–3), построение которых выполнено автором и детально изложено в соответствующем разделе

диссертации. Прогноз выполнялся методом многоугольника сил на различные периоды времени. Результаты прогноза представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты прогноза устойчивости оползня «Центральный»

Геологический разрез	зв, м	зн, м	h, м	α, град.	n (до осушения)	n (после осушения)	Прирост, %
1–1	+680	+550	130	43	1,00	1,06	6,0
2–2	+685	+545	140	43	1,00	1,08	8,0
3–3	+675	+535	140	43	1,04	1,09	4,8
Среднее					1,01	1,08	≈ 6,3

Примечание: зв, зн — отметки верхней и нижней бровок; h — высота борта; α — результирующий угол борта; n — коэффициент устойчивости.

Анализ данных табл. 2 показывает, что состояние равновесия прибортового массива до осушения оценивается как предельное: значения n по геологическим разрезам 1–1, 2–2 и 3–3 равны 1,00; 1,00 и 1,04 соответственно. После реализации комплекса мероприятий по опережающему осушению скважинами с камуфлетными полостями [6, 7] значения коэффициентов устойчивости увеличились до 1,06; 1,08 и 1,09, что соответствует приросту на 5–6 %.

Выводы

1. Автором разработан алгоритм прогноза устойчивости прибортового массива на основе объемных геолого-геомеханических моделей, включающий четыре этапа: формирование триангуляционной модели, ввод физико-механических параметров с учетом анизотропии влажности, настройку расчетного модуля и вычисление коэффициента устойчивости.

2. Методом обратных расчетов определены показатели сопротивления сдвигу по

поверхности скольжения для зон естественной влажности и влагонасыщения. Установлено, что значения сцепления С для глинистых пород изменяются от 2,5–2,9 кН/м² (влагонасыщение) до 17,7–35,3 кН/м² (естественная влажность), углы внутреннего трения φ — от 5,5° до 22°.

3. Маркшейдерский прогноз устойчивости, выполненный с учетом осушения прибортового массива, показал повышение коэффициента устойчивости по геологическим разрезам 1–1, 2–2, 3–3 с 1,00–1,04 до 1,06–1,09, что соответствует приросту на 5–6 % и переводит прибортовой массив из предельного состояния в устойчивое.

4. Внедрение объемных геолого-геомеханических моделей в практику маркшейдерского обеспечения открытых горных работ позволяет принципиально повысить точность прогнозов устойчивости и обоснованность выбора параметров борта за счет исключения ошибок, связанных с человеческим фактором.

MINE SURVEYING MONITORING OF GEOMECHANICAL PROCESSES AND STABILITY ASSESSMENT OF THE DEWATERED HIGHWALL ROCK MASS AT THE ANGRENSKY OPEN-PIT COAL MINE USING 3D MODELING

B.J. Baymirzaev, U.F. Murodbekov, S.S. Sayyidkasimov

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

ABSTRACT

The results of mine surveying monitoring of geomechanical processes and stability forecast of the dewatered pit wall massif of the Angrensky coal open-pit based on volumetric geological-geomechanical models are presented. The author has developed a

forecast algorithm that includes the construction of a triangulation model of the pit wall massif, the determination of physical and mechanical parameters considering moisture anisotropy, and the calculation of the stability coefficient using the limit equilibrium method. The forecast for geological sections 1–1, 2–2, and 3–3 showed an increase in the stability coefficient from 1.00–1.04 to 1.06–1.09 (an increase of 5–6%) after implementing a set of advanced dewatering measures. It has been demonstrated that the introduction of volumetric models into the practice of mine surveying support of open-pit mining improves forecast accuracy and the reliability of pit wall parameter selection.

KEYWORDS

mine surveying monitoring, geomechanical processes, pit wall massif, coal open-pit, stability forecast, volumetric geological-geomechanical model, limit equilibrium method, stability coefficient, advanced dewatering.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саййидкасимов С.С., Низамова А.Т. Условия и тенденции маркшейдерского обеспечения цифровой трансформации горнодобывающего производства // Труды Международной научно-практической конференции. – Ташкент: ТашГТУ, 2022. – С. 4–9.
2. Саййидкасимов С.С., Низамова А.Т., Хакимов А.М. Повышение точности маркшейдерского обеспечения щитовой проходки тоннелей второй очереди Ташкентского метрополитена // Горный журнал. – 2025. – № 11. – С. 15–20.
3. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 2020. – 378 с.
4. Deng D.P., Zhao L.H., Li L. Limit equilibrium slope stability analysis using the nonlinear strength failure criterion // Canadian Geotechnical Journal. – 2015. – Vol. 52. – P. 563–576.
5. Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. – Leiden: CRC Press/Balkema, 2022. – 512 p.
6. Baymirzaev B., Murodbekov U., Mamarajabova Z., Morozov V. Advanced drainage of the sides of a coal mine by horizontal wells with a camouflage cavity // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 383. – 04045.
7. Toshov J.B., Yelemessov K., Baymirzayev B.J., Baskanbayeva D., Murodbekov U.F. Drainage methods of the pit wall massif for efficient groundwater interception in open-pit mines // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2025. – Vol. 5, № 473. – P. 267–281.
8. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений открытым способом. – Пермь: ПНИПУ, 2023. – 288 с.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Baymirzaev Bakhtiyor Jumanazarovich	— Head of the Academic Affairs Department, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Doctor of Philosophy in Economics, Associate Professor; 2 University Street, Almazar District, Tashkent 100095, Uzbekistan. E-mail: b.baymirzaev76@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8313-085X
Murodbekov Ulugbek Furkatovich	— Doctoral Candidate, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Street University, 2A, 100095 Tashkent, Uzbekistan. E-mail: ralcon5350@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2181-157X
Sayyidkosimov Sayyidjabbor Sayyidkosim ugli	— Professor at the department of Mine surveying and geodesy, DSc, professor; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan. E-mail: sayyidjabbor@yandex.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5954-2790