

**ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ПОРОД ВЗРЫВОМ, РУДНИЧНАЯ
АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА**

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-66-76

УДК 622.271.333

**ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ
ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ****ESTIMATION OF IMPROVING THE ACCURACY OF SLOPE STABILITY
PREDICTION USING THREE-DIMENSIONAL GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL
MODELS****Караблин М.М.**

аспирант, e-mail: karablin.mm@gmail.com

Karablin M.M. Postgraduate**Простов С.М.**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: psm.kem@mail.ru

Prostov S.M. Dr. Sc. in Engineering, Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo,
650000, Russian Federation

Аннотация:

По результатам обобщения баз данных геологического изучения, гидрогеологического мониторинга, электрофизических измерений и маркишейдерских съемок построены объемные геолого-геофизические модели откосных сооружений Бачатского и Кедровского угольных разрезов. Особенностью данных моделей является учет изменчивости физико-механических свойств грунтов как в плане, так и по глубине. На основании алгоритма, разработанного авторами статьи, исследовано влияние линейного шага построения расчетных сечений в плане на точность прогноза устойчивости откосных сооружений.

Ключевые слова: геолого-геофизическая модель, прогноз устойчивости откоса, коэффициент устойчивости, поровое давление, фильтрационный коллектор, поверхность скольжения, оползнеопасное сечение, электрофизические измерения.

Информация о статье: поступило в редакцию 16.04.2021

Abstract:

Anthracite is the highest type of coal. Total anthracite reserves account for 1 % of the world's coal reserves. The features of technological schemes of anthracite enrichment at five processing plants are investigated. Given the unique properties of anthracite and its relatively small global reserves, there is a need to maximize the extraction of useful components in the finished product. The existing methods for evaluating the efficiency of separation of coal and anthracite of class 13-100 (150) mm in gravity apparatuses are considered and analyzed. A probabilistic method is proposed for calculating the extraction of fractions of different densities into the concentrate and waste of SKVP heavy-medium separator, which allows evaluating the technological efficiency of enrichment.

Keywords: geological and geophysical model, slope stability prediction, factor of safety, improved calculation accuracy, pore pressure, filtration collector, slickenside surface, landslide dangerous section, electro physical measurements.

Article info: received April 16, 2021

Введение

Ведение открытых горных работ связано с риском развития неблагоприятных геомеханических процессов как при формировании горных выработок, так и при отсыпке отвалов. Анализ причин нарушения устойчивости откосных сооружений показывает, что расположение аварийных участков напрямую связано с наличием в массиве аномальных по плотности и влажности зон [1-4].

Несмотря на постоянное совершенствование методов прогноза устойчивости горных выработок и отвалов, задача снижения геомеханических рисков при открытой геотехнологии на сегодняшний день остается актуальной [5].

Нередко геомеханическое обоснование предельных параметров откосов производят по исходным данным о пространственно-геометрических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях массива, полученных прямыми методами изысканий. Учитывая недостаток построения разведочных сетей, суть которого заключается в интерполяции скважинных данных в межскважинном пространстве, аномальные зоны и изменчивость их физико-механических свойств могут быть не выявлены в полной мере. Снижение влияния данного фактора возможно за счет дополнения результатов прямых изысканий бесскважинными, в частности, электрофизическими измерениями. Их особенность заключается в возможности установить не только границы аномальных зон, но и статистические зависимости показателей физико-механических свойств и электрической контрастности, и в дальнейшем использовать полученные данные при прогнозе устойчивости.

Одним из основных способов количественной оценки состояния исследуемого массива является прогноз откосного сооружения по коэффициенту устойчивости. В настоящее время в инженерной практике наиболее распространенными остаются методы предельного равновесия [6-10]. Это обусловлено влиянием нескольких факторов. Во-первых, данный метод регламентирован требованиями нормативного документа – «Правилами обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Во-вторых, методы предельного равновесия требуют определения меньшего количества исходных характеристик пород в отличие от более сложных численных методов расчета. В-третьих, методы предельного равновесия доступны в компьютерной реализации [11-15].

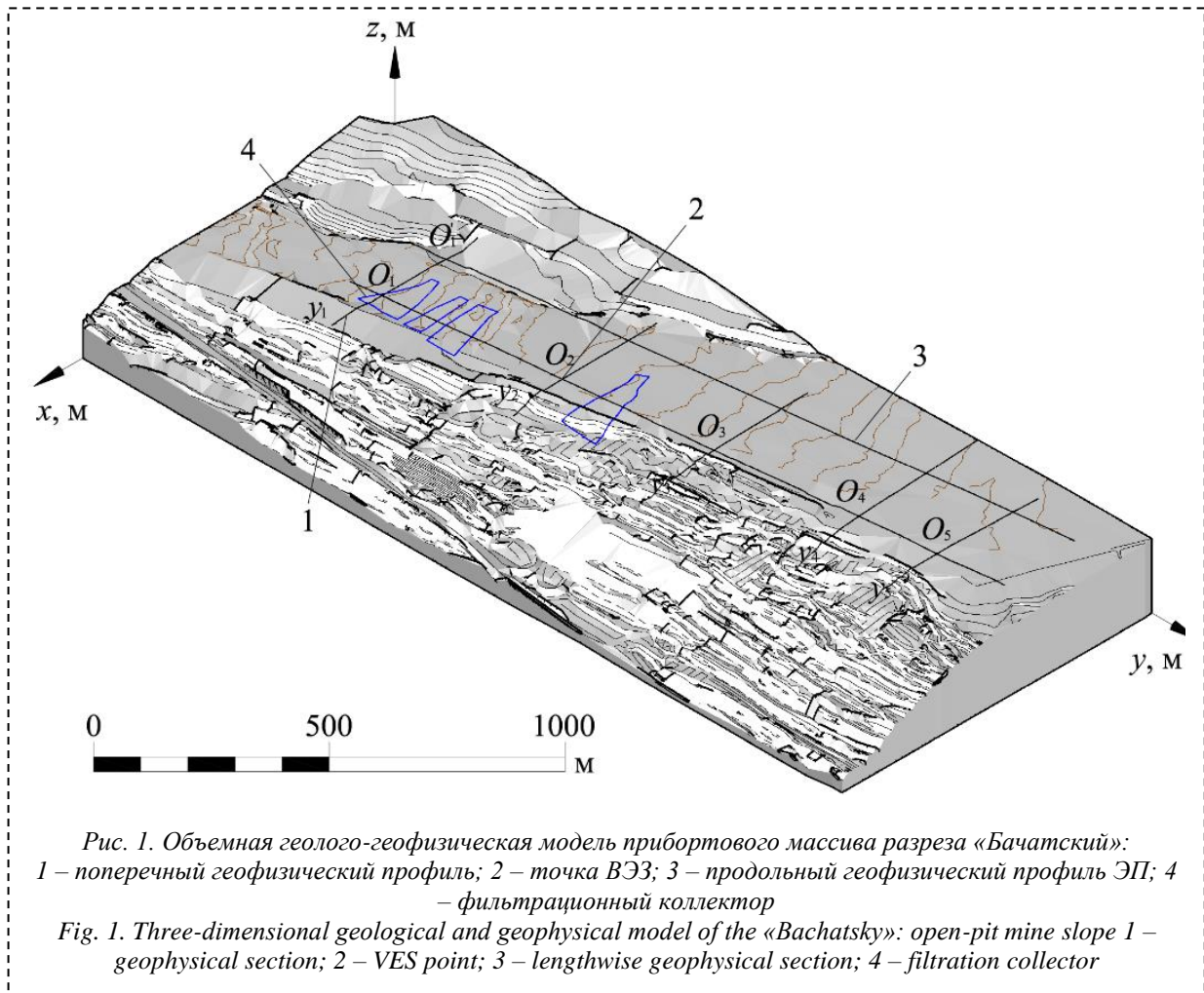
Прогноз устойчивости откосных сооружений методами предельного равновесия выполняют с использованием двух основных подходов: в плоской и объемной постановке задачи. При решении плоской задачи выполняют поиск наиболее напряженной поверхности скольжения вдоль откоса [16], при этом положение расчетного сечения на плане определяется человеческим фактором. Решение объемной задачи заключается в поиске наиболее напряженной поверхности скольжения за счет подбора направлений и величин полуосей эллипсоида напряжений [17-20], при этом массив моделируют как квазиизотропную или слоистую среду, в которой физико-механические свойства литологических разностей или инженерно-геологических комплексов усреднены.

Авторами статьи предложен алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на основе геолого-геофизических моделей [21], который позволяет устранить недостаток, связанный с проблемой выбора положения расчетного сечения, и учитывает пространственную изменчивость физико-механических свойств.

Цель работы заключается в демонстрации на примерах откосных сооружений Бачатского и Кедровского угольных разрезов актуальности компьютерной реализации разработанного алгоритма для повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений.

Методика исследования

Количественная оценка повышения точности прогноза устойчивости выполнена с использованием геолого-геофизических моделей откосных сооружений, основанных на результатах инженерно-геологических изысканий, гидрогеологического изучения, электрофизических измерений и маркшейдерских съемок.



Для каждой модели по ряду расчетных сечений методом предельного равновесия, являющимся одним из наиболее распространенных в инженерной практике, вычислены коэффициенты устойчивости n . По результатам расчетов в первом приближении определены границы участков минимальных значений n . Путем последовательных приближений в пределах полученных участков уменьшался линейный шаг Δx построения расчетных сечений. Для каждой итерации (шага) вычислена погрешность определения координаты положения наиболее опасного расчетного сечения, отсчитываемой вдоль откоса, по формуле

$$\Delta = \left(\frac{n_i^{\text{ср}}}{n_i^{\text{мин}}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

где $n_i^{\text{ср}}$, $n_i^{\text{мин}}$ – среднее и минимальное значения коэффициентов устойчивости в i -том приближении.

Аналогично может быть дана оценка повышения точности геомеханического прогноза за счет поворота расчетного сечения с заданным угловым шагом при сложной геометрии уступа в плане. В связи с относительной прямолинейностью исследуемых участков откосных сооружений оценка влияния углового шага построений расчетных сечений на точность прогноза устойчивости в данной работе не производилась.

Результаты

Прибортовой массив Бачатского угольного разреза представлен четвертичными отложениями на западном борту между выработанным пространством и Сагарлыкским гидроотвалом. Ширина исследуемого участка составила 2000 м. Высота борта изменяется от 27 до 40 м при результирующих углах 11-21°. Ведение горных работ сопровождалось геомеханическими процессами с высачиванием воды на откос на глубине 13-17 м от земной

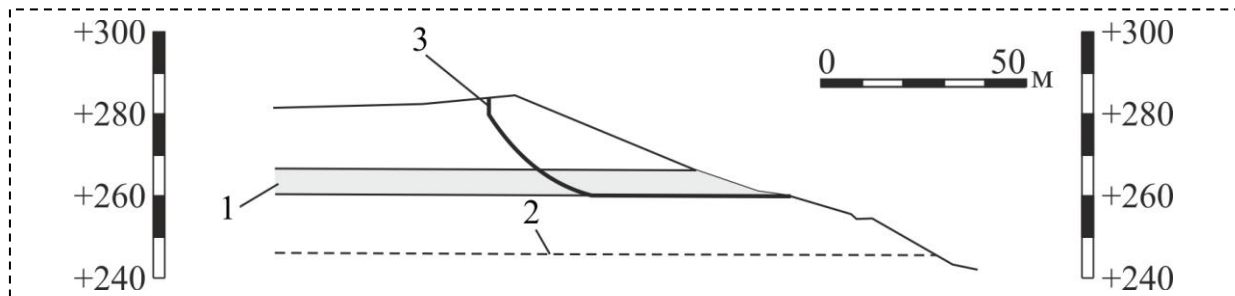


Рис. 2. Пример расчета по геофизическому профилю O_1y_1 :

1 – фильтрационный коллектор; 2 – контакт четвертичных отложений с коренными породами; 3 – наиболее напряженная поверхность скольжения

Fig. 2. Calculation on the geophysical section O_1y_1 : 1 – filtration collector; 2 – top of parent material; 3 – failure slickenside surface

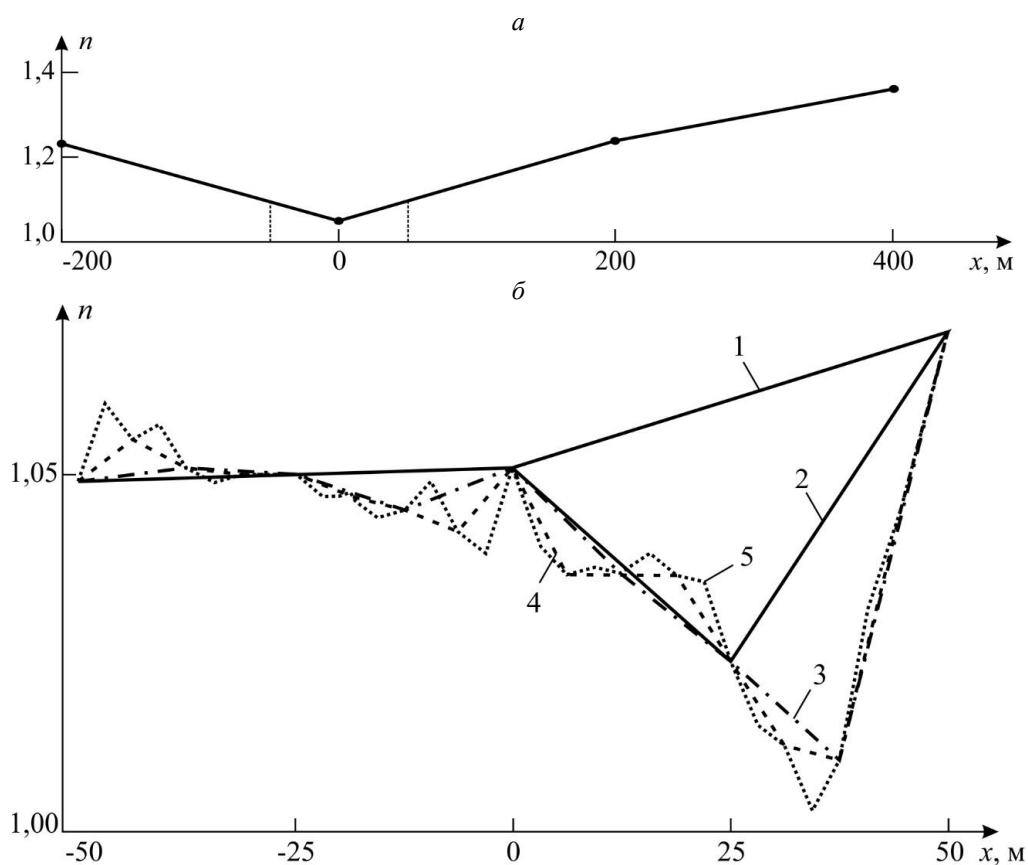


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов устойчивости n от координаты продольного профиля x при величине линейного шага $\Delta x = 250$ м (а) и его уменьшении (б): 1 – $\Delta x = 50$ м; 2 – $\Delta x = 25$ м; 3 – $\Delta x = 12$ м; 4 – $\Delta x = 6$ м; 5 – $\Delta x = 3$ м

Fig. 3. Graphs of the dependence of factor of safety n on the lengthwise section coordinate x at the linear step value $\Delta x = 250$ m (a) and its decreasing (б) to: 1 – $\Delta x = 50$ m; 2 – $\Delta x = 25$ m; 3 – $\Delta x = 12$ m; 4 – $\Delta x = 6$ m; 5 – $\Delta x = 3$ m

поверхности. Величины трещин отрыва составляют 3-6 м. Анализ маркшейдерских съемок показывает рост интенсивности деформаций, образуя единый оползневой фронт.

Для мониторинга гидрогеомеханического состояния прибортового массива выполнены электрофизические исследования, включающие в себя вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) по 5 поперечным профилям $O_1y_1, O_2y_2, O_3y_3, O_4y_4, O_5y_5$ с максимальным разномом питающей линии $AB = 260$ м (150 точек), и электрическое профилирование (ЭП) по двум продольным профилям $O_1x_1, O_1'x_2$ суммарной длиной 2400 м (120 точек).

Таблица 1. Результаты анализа влияния линейного шага Δx поиска наиболее опасного сечения на минимальное значение коэффициента устойчивости n_{min} в условиях Бачатского угольного разреза

Table 1. The results of the analysis of influence of linear search step Δx of the most dangerous section on the minimum factor of safety n_{min} for Bachatsky open-pit mine

| Линейный шаг Δx , м | Минимальное значение коэффициента устойчивости n_{min} | Продольная координата профиля x , м |
|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| 250 | 1,051 | 0 |
| 50 | 1,049 | -50 |
| 25 | 1,024 | +25 |
| 12 | 1,010 | +37 |
| 6 | 1,010 | +37 |
| 3 | 1,003 | +34 |

координат продольных профилей $h(x_1, x_2)$ на основании авторской методики обработки результатов электропрофилеирования.

Объемная геолого-геофизическая модель прибортового массива разреза «Бачатский» представлена на рис. 1.

Прогноз устойчивости прибортового массива выполнен на основании физико-механических свойств пород и естественных поверхностей ослабления, полученных в ходе обобщения результатов специальных исследований и метода обратных расчетов. Пример расчета по геофизическому профилю O_1y_1 представлен на рис. 2.

В первом приближении геомеханической оценки величина линейного шага построения расчетных сечений Δx определена произвольно и равна половине расстояния между поперечными геофизическими профилями (250 м). За начало системы координат продольного профиля принята точка O_1 (см. рис.1). По результатам выполненных расчетов установлена зависимость коэффициента устойчивости n от продольной координаты x (рис. 3а). Полученный график имеет одну точку минимума с коэффициентом устойчивости $n = 1,051$ ($x = 0$ м). Для дальнейшего анализа выбраны границы участка поиска наиболее опасного сечения, соответствующие диапазону продольной координаты $x \in [-50 \text{ м}; +50 \text{ м}]$. Величины линейных шагов Δx построения расчетных сечений составили: 50, 25, 12, 6, 3 м. Графики зависимости коэффициентов устойчивости от продольной координаты x представлены на рис. 3б.

По результатам анализа графиков (рис.3) и данных табл.1 установлено следующее:

- при уменьшении шага построения расчетных сечений Δx практически в каждой итерации наблюдается снижение величины коэффициента устойчивости n от 1,051 ($\Delta x = 250$ м) до 1,003 ($\Delta x = 3$ м), таким образом, точность геомеханического прогноза увеличивается;

- продольная координата x точки минимума графика функции изменяется от -50 ($\Delta x = 50$ м) до +34 м ($\Delta x = 3$ м), при этом с каждой итерацией отклонение координаты x от предыдущего значения снижается.

Аналогичные исследования проведены на участке ведения горных работ в намывном массиве Кедровского угольного разреза.

Гидроотвал №3 Кедровского угольного разреза расположен на северо-восточном борту. В связи с необходимостью расконсервации запасов было принято решение о частичном удалении намывных пород с ограждением зоны гидромеханизации трехъярусной насыпью (разделительной перемычкой) общей высотой до 60 м.

По результатам электрофизических измерений получены следующие результаты:

- выполнено оконтуривание аномальных зон – фильтрационных коллекторов (они имеют мощность 3-6 м и расположены на глубинах от 10 до 20 м, иногда расщепляются на отдельные русла по глубине); эти зоны были сформированы вследствие водонасыщения грунтового основания и инфильтрации воды из водоотводного канала, оконтуривающего Сагарлыкский гидроотвал.

- установлена зависимость мощности рыхлого слоя от

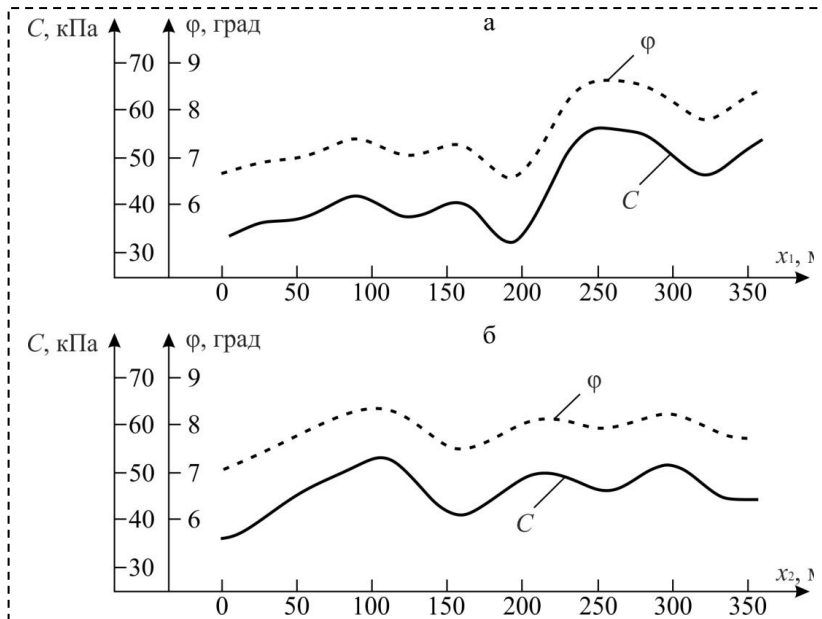


Рис. 4. Графики зависимости механических свойств намывных грунтов φ и C от координат профилей x_1 (а) и x_2 (б)
 Fig. 4. Graphs of the dependence of the mechanical properties of alluvial soils φ and C on the sections coordinates x_1 (a) and x_2 (б)

Физико-механические свойства естественных и техногенных грунтов, слагающих объект исследования, изучены в ходе инженерно-геологических изысканий и дополнены электротомографическими измерениями. Выполненные геофизические работы позволили установить зависимость значений углов внутреннего трения φ и сцепления C намывных грунтов от координат профилей x_1 и x_2 , расположенных вдоль откоса разрезательной перемычки (рис. 4)

Влияние порового давления в намывных глинистых грунтах,

обусловленного гравитационным уплотнением породами сухой вскрыши, исследовано на основании данных наблюдений по 14 пьезометрическим датчикам ПДС струнного типа.

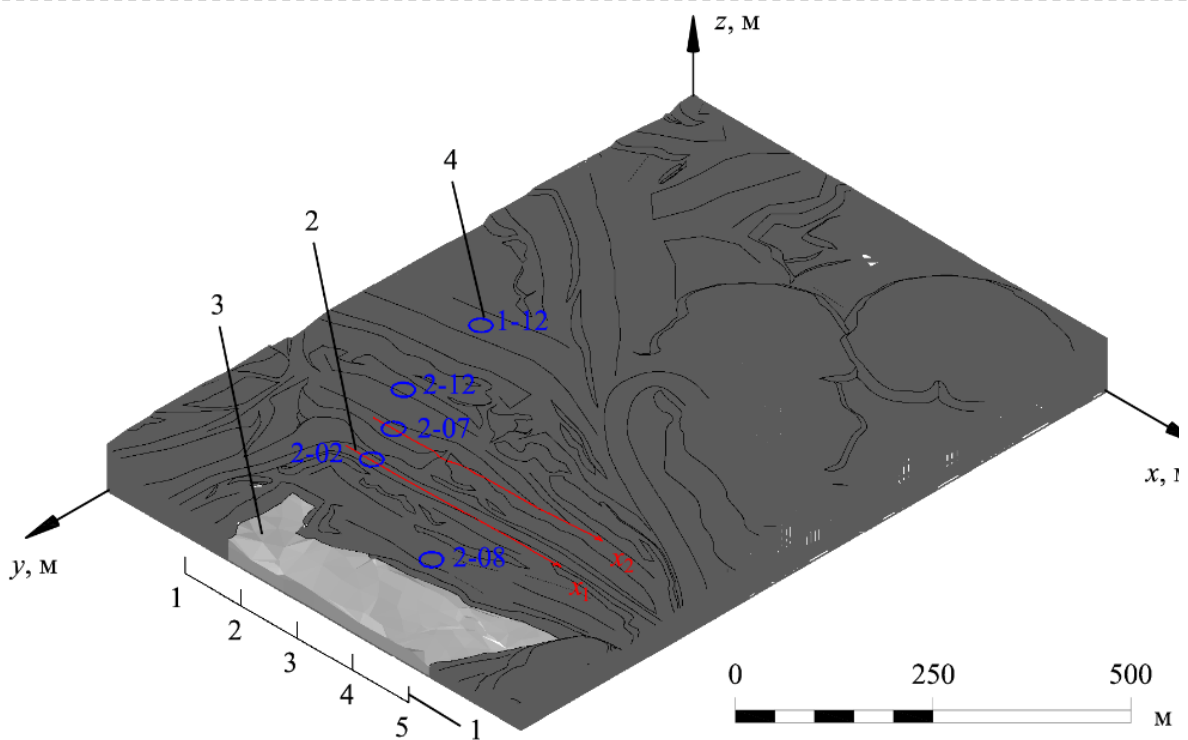


Рис. 5. Объемная геолого-геофизическая модель разделительной перемычки: 1 – поверхность намывных пород; 2 – продольный геофизический профиль; 3 – инженерно-геологическая скважина, оборудованная датчиком порового давления

Fig. 5. Three-dimensional geological and geophysical model of the dividing fill: 1 – inwashed soil surface; 2 – lengthwise geophysical section; 3 – geological hole with pore pressure sensor

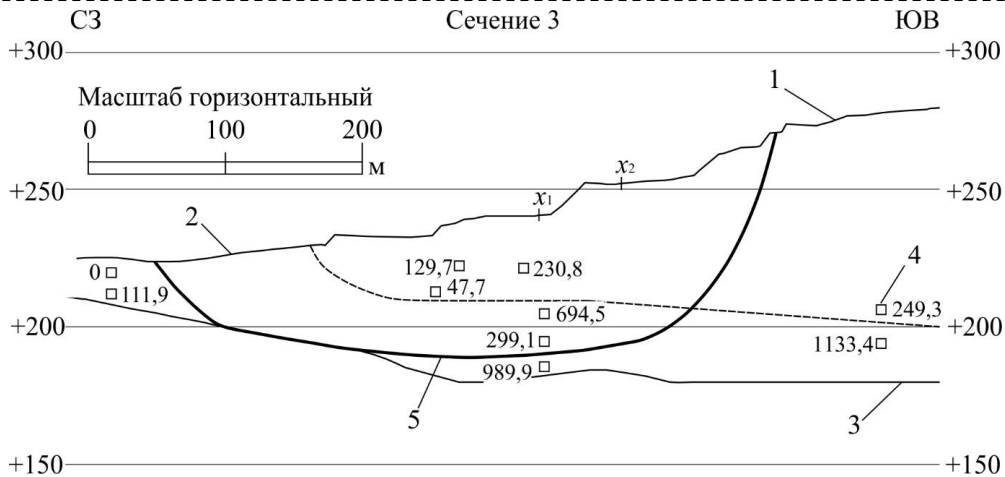


Рис. 6. Пример расчета по сечению 3: 1 – поверхность разделительной перемычки; 2 – поверхность намывных пород; 3 – естественный рельеф; 4 – показание датчика порового давления, кПа; 5 – наиболее напряженная поверхность скольжения
Fig. 6. Calculation on section 3: 1 – fill surface; 2 – inwashed soil surface; 3 – natural topography; 4 – pore pressure sensor value, kPa; 5 – failure slickenside surface

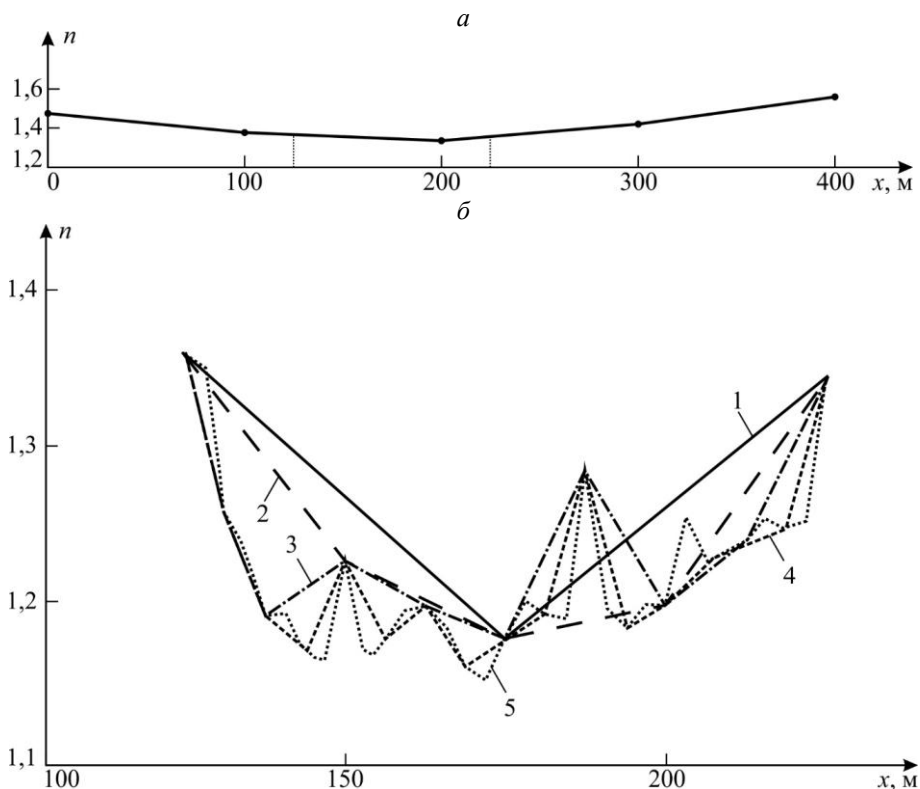


Рис. 7. Графики зависимости коэффициентов устойчивости n от координаты продольного профиля x при величине линейного шага $\Delta x = 100$ м (а) и его уменьшении (б): 1 – $\Delta x = 50$ м; 2 – $\Delta x = 25$ м; 3 – $\Delta x = 12$ м; 4 – $\Delta x = 6$ м; 5 – $\Delta x = 3$ м
Fig. 7. Graphs of the dependence of factor of safety n on the lengthwise section coordinate x at the linear step value $\Delta x = 100$ m (a) and its decreasing (б) to: 1 – $\Delta x = 50$ m; 2 – $\Delta x = 25$ m; 3 – $\Delta x = 12$ m; 4 – $\Delta x = 6$ m; 5 – $\Delta x = 3$ m

В результате обобщения полученных данных построена геолого-геофизическая модель разделительной перемычки, представленная на рис. 5, на основании которой по расчетным сечениям выполнен прогноз устойчивости. Пример расчета представлен на рис. 6.

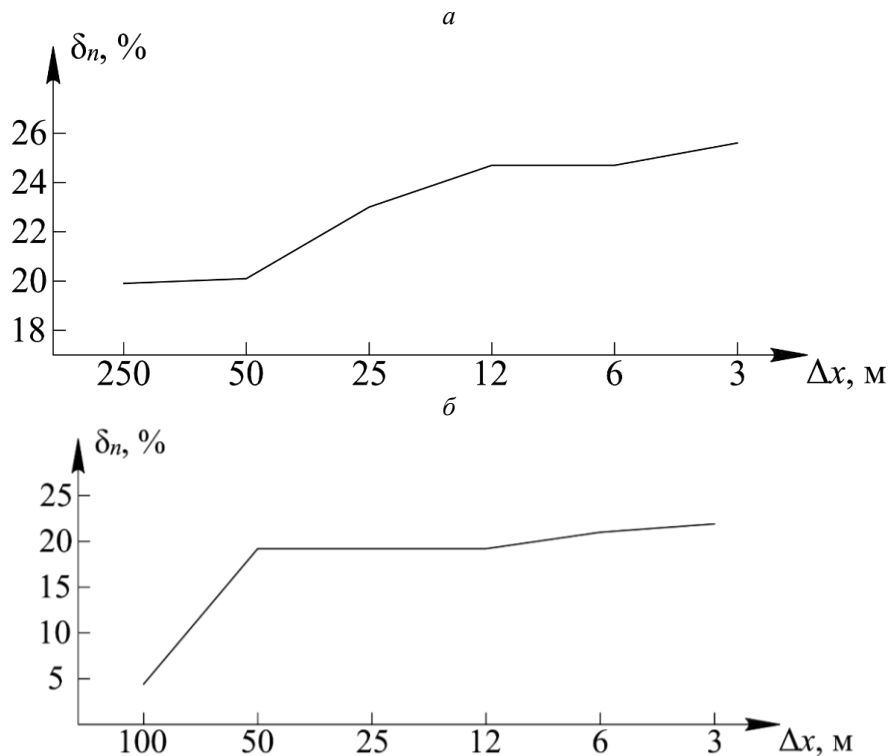


Рис. 8. Графики зависимости точности расчета коэффициента устойчивости δ_n от величины линейного шага Δx для условий Бачатского (а) и Кедровского (б) угольных разрезов
 Fig. 8. Graphs of the dependence of the accuracy of factor of safety calculating δ_n on the value of the linear step Δx for the conditions of the Bachatsky (a) and Kedrovsky (b) open-pit mines

В первом приближении геомеханической оценки величина линейного шага построения расчетных сечений Δx составила 100 м. За начало системы координат продольного профиля принято устье скважины 2-02 (см. рис.5). По результатам выполненных расчетов установлена зависимость коэффициента устойчивости n от продольной координаты x (рис. 7а). Полученный график имеет одну точку минимума с коэффициентом устойчивости $n = 1,343$ ($x = 200$ м). Для дальнейшего анализа выбраны границы участка поиска наиболее опасного сечения,

Таблица 2. Результаты анализа влияния линейного шага Δx поиска наиболее опасного сечения на минимальное значение коэффициента устойчивости n_{min} в условиях Кедровского угольного разреза

Table 2. The results of the analysis of influence of linear search step Δx of the most dangerous section on the minimum factor of safety n_{min} for Kedrovsky open-pit mine

| Линейный шаг $\Delta x, \text{ м}$ | Минимальное значение коэффициента устойчивости n_{min} | Продольная координата профиля $x, \text{ м}$ |
|------------------------------------|--|--|
| 100 | 1,343 | +200 |
| 50 | 1,176 | +175 |
| 25 | 1,176 | +175 |
| 12 | 1,176 | +175 |
| 6 | 1,158 | +169 |
| 3 | 1,150 | +172 |

соответствующие диапазону продольной координаты $x \in [+125 \text{ м}; +225 \text{ м}]$. Величины линейных шагов Δx построения расчетных сечений составили: 50, 25, 12, 6, 3 м. Графики зависимости коэффициентов устойчивости от продольной координаты x представлены на рис. 7б.

Результаты исследований, представленные на рис. 7 и в табл. 2, в значительной мере совпадают с результатами, полученными на предыдущем участке:

- при уменьшении шага построения расчетных сечений Δx установлено снижение величины коэффициента устойчивости n от 1,343 ($\Delta x = 100$ м) до 1,150 ($\Delta x = 3$ м) за счет более детального учета изменений расчетных данных;

- продольная координата x точки минимума графика функции изменяется от

+200 ($\Delta x = 100$ м) до +169 м ($\Delta x = 3$ м), при этом с каждой итерацией отклонение координаты x от предыдущего значения снижается.

На основании выполненных исследований влияния линейного шага построения расчетных сечений Δx на минимальное значение коэффициента устойчивости n_{min} с использованием закономерности (1) принятой методики построены графики зависимости точности расчета коэффициента устойчивости δ_n от величины Δx для условий Бачатского и Кедровского угольных разрезов (рис.8).

Выводы

1. Достоинством разработанного авторами статьи алгоритма прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей с учетом неоднородности физических свойств инженерно-геологических массивов является исключение влияния человеческого фактора на результат за счет поиска оползнеопасного участка путем перебора множества расчетных сечений через заданные величины линейного и углового шагов. Предложенный подход позволил повысить точность прогноза устойчивости в пределах расчетных моделей для Бачатского и Кедровского угольных разрезов на 25,6 и 21,9% соответственно.

2. Экспериментально подтвержденная идея повышения точности пространственного прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей предопределяет актуальность дальнейших исследований в следующих направлениях:

- обоснование необходимой остаточной детальности геологической, геофизической, гидрогеологической и маркшейдерской информации для сокращения объемов изысканий;
- разработка рациональных алгоритмов поиска наиболее опасных сечений (исключение заведомо неопасных интервалов профилей, управление диапазонами линейного и углового шагов задания расчетных сечений в зависимости от требуемой точности прогноза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхотуров, А.Г., Размахина, И.Б. Причины деформирования бортов угольных разрезов Забайкалья / А.Г. Верхотуров, И.Б. Размахина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 211-221.
2. Далатказин, Т.Ш. Исследование формирования оползней в Коршуновском карьере / Т.Ш. Далатказин // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2. – С. 34-40.
3. Яковлев, А.В., Переход, Т.М., Шимкив, Е.С. Анализ деформационного поведения массива северо-западного борта главного карьера АО «ЕВРАЗ КГОК» / А.В. Яковлев, Т.М. Переход, Е.С. Шимкив // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3. – С. 89-95.
4. Проблемы оценки устойчивости бортов карьера Киембаевского месторождения / Т.Ф. Харисов, О.Д. Харисова, Е.Ю. Ефремов, Ю.П. Коновалова, А.Л. Турсуков // Проблемы недропользования. – 2017. – № 4. – С. 33-42.
5. Жабко, А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов / А.В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2015. – № 4(40). – С. 45-57.
6. Жабко, А.В. Основы общей теории расчета устойчивости откосов / А.В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – № 4(32). – С. 47-58.
7. Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method / M.W. Agam, M.H. M. Hashim, M.I. Murad, H. Zabidi // Procedia Chemistry. – 2016. – Vol. 16. – pp. 651-658.
8. Deng, D.P. Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique / D.P. Deng, L. Liang, L.H. Zhao // Journal of Mountain Science. – 2017. – Vol. 14. – pp. 2311-2324.
9. Deng, D.P. Limit equilibrium slope stability analysis using the nonlinear strength failure criterion / D.P. Deng, L.H. Zhao, L. Li // Canadian Geotechnical Journal. – 2015. – Vol. 52. – pp. 563-576.
10. Deng, D.P. Limit equilibrium method for rock slope stability analysis by using the Generalized Hoek-Brown criterion / D.P. Deng, L. Li, J.F. Wang, L.H. Zhao // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol. 89. – pp. 176-184.
11. Автоматизированный расчет устойчивости откосов бортов карьеров / И.Т. Мельников, В.Ю. Заляднов, Н.С. Шевцов, Е.В. Павлова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – № 2. – С. 8-12.

12. Оценка устойчивости бортов карьеров с использованием отечественного и зарубежного программного обеспечения / А.М. Мочалов, С.А. Иштугин, А.А. Павлович, Р.Ю. Сапачев // Записки горного института. – 2012. – Т.199. – С. 219-226.
 13. Шпаков, П.С. Расчет устойчивости карьерных откосов по программе Stability Analysis / П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков, М.В. Шпакова // ГИАБ. – 2011. – №8. – С. 56-63.
 14. Ломакин, В.В. Алгоритм и программное обеспечение расчета устойчивости земляных сооружений по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения / В.В. Ломакин, С.В. Сергеев, Е.В. Лычагин, О.С. Резниченко // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: естественные науки. – 2013. – №24 (167). – Вып. 25. – С. 169-167.
 15. Бас, Н.С. Проектирование программного обеспечения для расчета устойчивости откосных сооружений / Н.С. Бас, В.Н. Костин // ГИАБ. – 2016. – № 11. – С. 33-46.
 16. О точности определения ширины призмы возможного обрушения откосов / Б.А. Храпцов, А.А. Ростовцева, О.А. Рыбка, Абдул Батен Абдул Захир // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2012. – Вып. 2. – С. 271-275.
 17. Черчинцева, Т.С. Объемная задача определения коэффициента запаса устойчивости / Т.С. Черчинцева, Т.С. Кузнецова // ГИАБ. – 2004. – Семинар №13. – с. 210-213.
 18. 3D stability analysis method of concave slope based on the Bishop method / Zhang Tianwen, Cai Qingxiang, Liu Han, Jisen Shu, Wei Zhou // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – pp. 1-6.
 19. Three-dimensional critical slip surface locating and slope stability assessment for lava lobe of Unzen volcano / Mowen Xie, Wang Zengfu, Xiangyu Liu, Xu Bo. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – No.3. – Vol.1. – pp. 82-89.
 20. Souza, João Paulo Tavares Análise 2d e 3d da estabilidade da barragem de fundão / João Paulo Tavares. Souza, Moura Nicolas Rodrigues, Jr. Gilson de F.N. Gitirana // REEC. – 2019. – Vol.15. – No. 2. – pp. 123-136.
- Караблин, М.М. Прогноз устойчивости прибортового массива оползня «Центральный» угольного разреза «Ангренский» на основе объемной геолого-геофизической модели / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 3. – С. 39-49..

REFERENCES

1. Verkhoturov, A.G. Causes of deformation of the sides of the coal sections of Transbaikalia / A.G. Verkhoturov, I.B. Razmakhina // Mining Informational Analytical Bulletin. – 2016. – №9. – pp. 211-221.
2. Dalatkazin, T.S. Study of the formation of landslides in Korshunovsky open-pit mine / T. S. Dalatkazin // Subsoil problems use. – 2017. – No. 2. – pp. 34-40.
3. Yakovlev, A.V. Analysis of the deformation behavior of the array of the northwestern side of the main quarry of JSC «EVRAZ KGOK» / A.V. Yakovlev, T.M. Perekhod, E.S. Shimkiv // Subsoil Use Problems. – 2018. – Vol. 3. – pp. 89-95.
4. Problems of assessing the stability of the sides of the open pit of the Kimbaevskoye field / T.F. Kharisov, O.D. Harisova, E.Yu. Efremov, Yu.P. Konovalova, A.L. Tursukov // Problems of Subsoil Use. – 2017. – Vol. 4. – pp. 33-42.
5. The theory of calculating the stability of slopes and foundations. Analysis, characteristics and classification of existing methods for calculating the stability of slopes / A.V. Zhabko, // Izvestiya of the Ural State Mining University. – 2015. – No. 4 (40). – pp. 45-57.
6. Zhabko, A.V. Fundamentals of the General theory of slope stability calculation / A.V. Zhabko // Izvestiya Ural state mining University. – 2013. – No. 4 (32). – pp. 47-58.
7. Slope Sensitivity Analysis using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method / M.W. Agam, M. H.M. Hashim, M.I. Murad, H. Zabidi // Procedia Chemistry. – 2016. – Vol. 16. – pp. 651-658.
8. Deng, D.P. Limit equilibrium method (LEM) of slope stability and calculation of comprehensive factor of safety with double strength-reduction technique / D.P. Deng, L. Liang, L.H. Zhao // Journal of Mountain Science. – 2017. – Vol. 14. – pp. 2311–2324.
9. Deng, D.P. Limit equilibrium slope stability analysis using the nonlinear strength failure criterion / D.P. Deng, L.H. Zhao, L. Li // Canadian Geotechnical Journal. – 2015. – Vol. 52. – pp. 563–576.
10. Deng, D.P. Limit equilibrium method for rock slope stability analysis by using the Generalized Hoek-Brown criterion / D.P. Deng, L. Li, J.F. Wang, L. H. Zhao // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2016. – Vol. 89. – pp. 176–184.
11. Automated calculation of slope stability of pit walls / I.T. Melnikov, V.Yu. Zalyadnov, N.S. Shevtsov, E.V. Pavlova // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State University. – 2013. – Vol.2. – pp. 8-12.
12. Evaluation of the stability of slopes with using native and foreign software / А.М. Мочалов, С.А. Иштугин, А.А. Павлович, Р.Ю. Сапачев // Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute. – 2012. – Vol.199. – pp. 219-226.
13. Shpakov, P.S. Calculation of the stability of career slopes using the Stability Analysis program / P.S. Shpakov, Yu.L. Yunakov, M.V. Shpakova // GIAB. – 2011. – Vol. 8. – pp. 56-63.
14. Algorithm and software of earth constructions slopes stability calculation on round cylindrical to sliding surfaces / V.V. Lomakin, S.V. Sergeev, E.V. Lychagin, O.S. Reznichenko // Belgorod State University Scientific Bulletin Natural sciences. – 2013. – No24 (167). – Vol. 25. – pp. 169-167.

15. Bas, N.S. Design of software for calculation of stability of sloping structures / N.S. Bas, V.N. Kostin // *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. – 2016. – Vol. 11. – pp. 33–46. (In Russ.).
16. About accuracy of the determining prism width of possible crushing escarpment / B.A. Khramtsov, A.A. Rostovtseva, O.A. Rybka, Abdul Baten Abdul Zahir // *Izvestiya of Tula State University. Geoscience*. – 2012. – Vol. 2. – pp. 271-275.
17. Cherkhintseva, T.S. Volumetric Problem of Determining the Stability Margin Coefficient / T.S. Cherkhintseva, T.S. Kuznetsova // *GIAB*. – 2004. – Seminar No. 13. – pp. 210-213.
18. 3D stability analysis method of concave slope based on the Bishop method / Zhang Tianwen, Cai Qingxiang, Liu Han, Jisen Shu, Wei Zhou // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – pp. 1-6.
19. Three-dimensional critical slip surface locating and slope stability assessment for lava lobe of Unzen volcano / Mowen Xie, Wang Zengfu, Xiangyu Liu, Xu Bo. // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2011. – No.3. – Vol.1. – pp. 82-89.
20. Souza, João Paulo Tavares Análise 2d e 3d da estabilidade da barragem de fundão / João Paulo Tavares. Souza, Moura Nicolas Rodrigues, Jr. Gilson de F.N. Gitirana // *REEC*. – 2019. – Vol.15. – No. 2. – pp. 123-136.
21. Karablin, M.M. Angren coal pit Centralny landslide slope stability analysis based on a three-dimensional geological-geophysical model / M.M. Karablin, S.M. Prostov // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. – 2020. – Vol. 3. – 39-49. (In Russ.).

Библиографическое описание статьи

Караблин М.М., Простов С.М. Оценка повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2021. – № 4 (146). – С. 66-76.

Reference to article

Karablin M.M., Prostov S.M. Estimation of improving the accuracy of slope stability prediction using three-dimensional geological-geophysical models. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.4 (146), pp. 66-76.