

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.271.333.1

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-155-166

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВ КАРЬЕРА ГОРЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСЧЕТОВ УСТОЙЧИВОСТИ

Коврижных Егор Владимирович*,
Косолапов Александр Иннокентьевич,
Гришин Арсений Александрович

Сибирский Федеральный Университет

* для корреспонденции: e.kovrizhnykh@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

30 июня 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

Ключевые слова:

Индустрия 6.0, Майнинг 6.0,
добыча угля, геотехнология,
пост-майнинг,
природоцентричность.

Аннотация.

Актуальность применения современных программных комплексов для обоснования устойчивости бортов карьеров обусловлена необходимостью повышения безопасности, точности прогнозов и эффективности горных работ. Несмотря на это, многие инженеры не считают использование таких решений обязательным, что связано с рядом факторов. Во-первых, нормативные документы не всегда обязывают выполнять сложные геомеханические расчеты с применением численных методов, а во-вторых, существующие программные комплексы имеют высокую сложность и узкую направленность, что ограничивает их использование. Эти обстоятельства приводят к недостаточной распространенности более точных технологий прогнозирования поведения горного массива, которые могут значительно усилить контроль за устойчивостью формируемых бортов карьеров. Целью данной работы является исследование возможностей применения современных программных комплексов для более точного обоснования устойчивости бортов карьера, что продемонстрировано на примере Горевского свинцово-цинкового месторождения. В статье рассмотрены основные причины, ограничивающие внедрение сложных математических методов в практику прогнозирования устойчивости, и проанализированы различные программные решения, которые позволяют учитывать литологические разности, неоднородность массива и рассчитывать коэффициенты запаса устойчивости. Выполнены моделирование и расчеты устойчивых параметров бортов карьера с применением различных программных комплексов. Результаты работы показали, что использование современных программных решений значительно повышает точность расчетов устойчивости, способствует детализированию моделей горных массивов и улучшает прогнозирование. Это, в свою очередь, способствует повышению безопасности горных работ, снижению рисков и увеличению экономической эффективности горнодобывающих процессов, что подчеркивает необходимость их широкого применения в инженерной практике.

Для цитирования: Коврижных Е.В., Косолапов А.И., Гришин А.А. Обоснование параметров бортов карьера горевского месторождения по результатам сравнительного анализа расчетов устойчивости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 155-166. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-155-166, EDN: MLPAJM

Введение

Эффективность отработки месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом во многом зависит от предельных параметров откосов бортов (а также их элементов) карьеров и разрезов. В свою очередь, предельные устойчивые параметры определяются двумя большими группами факторов: природными и горнотехническими.

К природным факторам можно отнести геологическое строение месторождений (включая структурно-тектоническое строение, гидрогеологические особенности и физико-механические свойства пород и контактов), климатические условия (температура воздуха, количество и вид осадков), сейсмическую активность территории, температурный режим массива (цикл оттаивания-замерзания горных пород). Факторы данной группы специфичны и индивидуальны для каждого месторождения, их наличие изменить нельзя, но можно их учитывать в расчетах устойчивости [1-5].

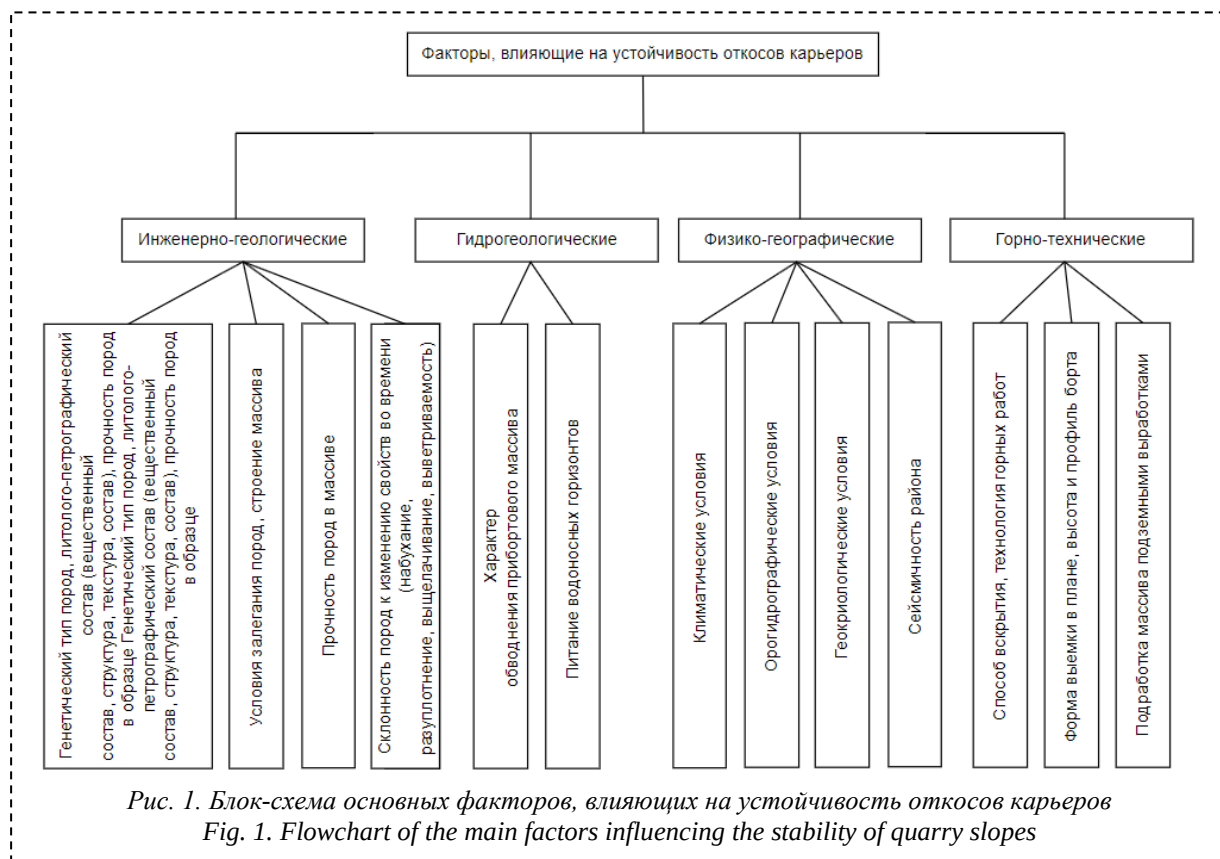
К горнотехническим факторам, влияющим на устойчивость откосов, относят способ вскрытия карьерного поля, систему разработки, способ отбойки горной массы, геометрические параметры откосов и методы управления устойчивости (мероприятия по повышению устойчивости откосов – контрфорсы, замораживание, цементация и т. п.) Факторы данной группы относятся к результатам производственной деятельности человека, соответственно, можно предпринимать

мероприятия, обеспечивающие решение проблем с устойчивостью откосов бортов и уступов на карьерах или разрезах [6].

Широко распространенная классификация факторов, влияющих на устойчивость откосов, была предложена ВНИМИ [7, 8], где выделено 4 группы, по своей сути более детально описывающие представленные ниже: инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические и горнотехнические (Рис. 1).

Для обоснования устойчивости откосов требуется детальное изучение всех факторов, влияющих на процесс сдвижения горных пород в карьере или разрезах, при этом решающее значение имеет выбор способа расчета, который отвечал бы конкретным условиям объекта разработки (горно-геологические особенности и физико-механические свойства прибортового массива и т. д.)

Современная методическая база по вопросам геомеханических расчетов насчитывает большое количество способов и методов оценки устойчивости, результаты которых в дальнейшем используются в оценке геомеханических рисков [9]. Разработанные методы по оценке устойчивости отличаются между собой методиками построения критической поверхности скольжения, принятием расчетных характеристик в соответствии с выбранной моделью деформирования, выбором механического поведения массива при разрушении с применением результатов



обратных расчетов [10] и т. д. Сейчас насчитывается более 150 способов и методов расчета устойчивости откосов, сложность и неоднозначность большинства разработанных методик привели к тому, что в инженерных расчетах широко используется не более чем 10 наиболее простых способов расчета.

С появлением общедоступных компьютерных технологий различными компаниями были разработаны специализированные программные обеспечения, которые уже могли производить расчеты устойчивости не по простым инженерным методикам, а используя более сложный математический аппарат, способный учитывать различные горно-геологические условия и механизмы деформации. Но большая вариативность в расчетных методах стала новой проблемой в инженерной практике – какой метод использовать для конкретных условий на месторождении.

В данной работе представлены результаты по оценке устойчивости откосов бортов в программе Slide2 (Rocscience) с применением наиболее распространенных зарубежных методов Спенсера [11], Бишопа [12], Моргенштерна-Прайса [13], а также численно-аналитического метода профессора Шпакова П. С. [14] в программном продукте «Stability analysis», методов алгебраического и векторного сложения сил [8] с использованием распространенных программных продуктов офисного обеспечения Microsoft Office Excel и проектирования NanoCad. Для сравнительного анализа расчеты также произведены в ПО RS2 (Rocscience) методом конечных элементов [15, 16]. По итогам расчетов устойчивости произведен анализ оптимального применения указанных методов для условий Горевского месторождения.

Методы

В качестве расчетной теории используется метод предельного равновесия, допускающий, что массив горных пород (и грунтов) над поверхностью скольжения делится на блоки, на которые действуют сдвигающие и удерживающие силы, соотношение между которыми определяет устойчивое или неустойчивое состояние откосов.

В качестве критерия прочности породного массива принята устоявшаяся теория Кулона-Мора. Теория базируется на предположении о том, что предел прочности массива на сдвиг по определенной площадке равен сумме величин сцепления и нормального напряжения с учетом значения угла внутреннего трения:

$$\tau = \tau_c + \sigma \cdot \operatorname{tg}(\phi), \quad (1)$$

где τ – предельное касательное напряжение, необходимое для разрушения; τ_c – величина сцепления на площадке сдвига; σ – нормальное напряжение; ϕ – угол внутреннего трения.

Экспериментальная часть исследования заключалась в анализе устойчивости откосов бортов Горевского свинцово-цинкового месторождения с применением различных методов расчета.

Методика расчета профессора Шпакова П. С. для однородного массива основана на принципе интегрирования сил на наиболее напряженной поверхности скольжения, в данном способе используется модель «расчлененного» отсека обрушения, разложение сил производится по схемам К. Терцаги, в качестве поверхности скольжения принимается поверхность, построение которой отвечает основным положениям теории предельного равновесия сыпучей среды. Основным недостаток разложения сил по схеме К. Терцаги (не учитываются силы реакции между блоками) устраняется применением интегрирования по поверхности скольжения [1]. Положение поверхности скольжения в массиве устанавливается в автономном режиме (с помощью программного обеспечения) при расчете коэффициента запаса устойчивости по ряду потенциальных поверхностей скольжения с использованием метода последовательных приближений.

Методы Спенсера, Бишопа также основаны на теории предельного равновесия и являются аналогами метода алгебраического сложения сил, однако метод Бишопа дополнительно учитывает граничные силы [11-12].

В методе Моргенштерна-Прайса используется численный анализ, являющийся более сложным по сравнению с методами Спенсера и Бишопа. Математические модели, учитывающие геометрические и геотехнические параметры, решаются численно [13].

Методы Спенсера, Бишопа, Моргенштерна-Прайса реализованы в программном продукте Slide2 компании Rocscience. Поверхность скольжения для оценки устойчивости принята круглоцилиндрической (как и для других методов). В программном продукте Slide2 реализована функция автоматического построения поверхностей скольжения и вычисления по ним коэффициента запаса устойчивости, где и определяется критическая поверхность скольжения.

Метод алгебраического сложения из-за своей простоты широко используется в инженерных расчетах, к недостатку данного метода можно отнести «консервативные» значения коэффициента запаса устойчивости, данный метод может дать погрешность расчета в меньшую сторону. Метод основан на алгебраическом сложении удерживающих и сдвигающих сил по потенциальной поверхности скольжения. При этом в расчет принимаются следующие силы:

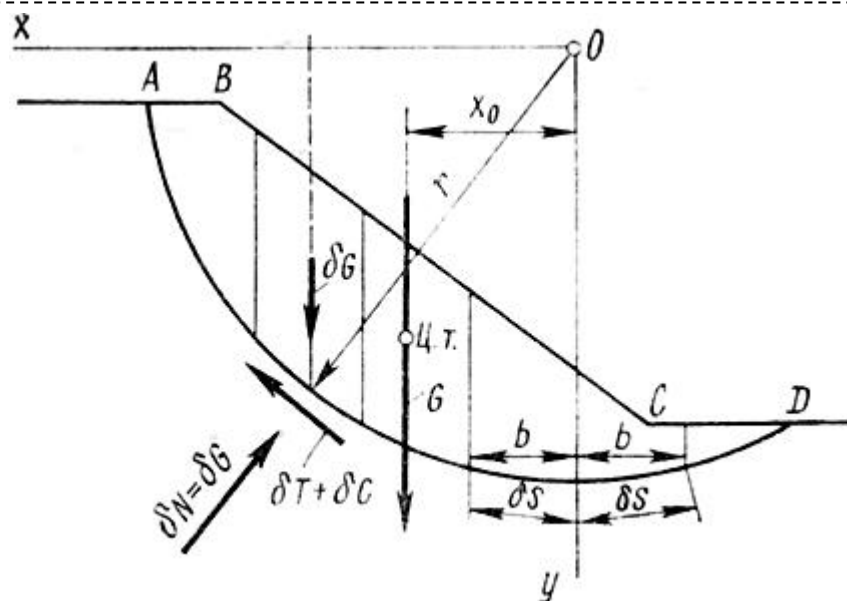


Рис. 2. Схема алгебраического сложения сил
Fig. 2. Scheme of algebraic addition of forces

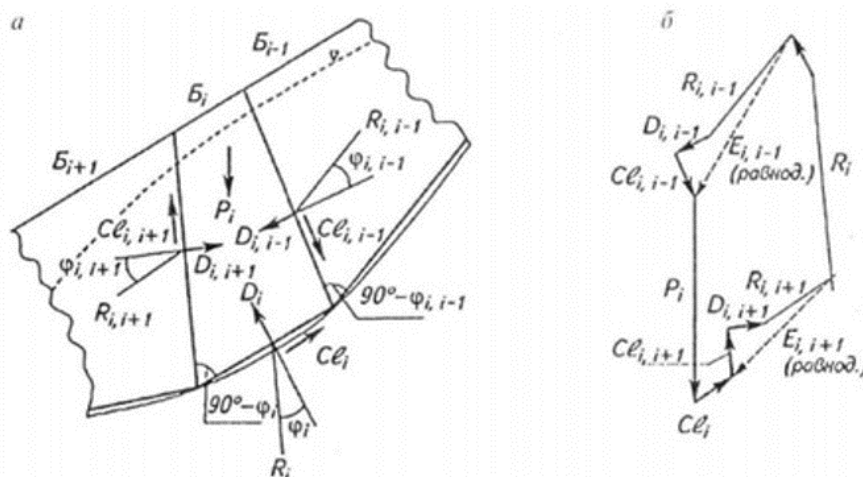


Рис. 3. Расчетная схема многоугольником сил
Fig. 3. Calculation diagram of the polygon of forces

$N_i = P_i \cdot \cos(\delta_i)$; $T_i = P_i \cdot \sin(\delta_i)$, (2)
где N_i , T_i – соответственно нормальная и касательная составляющие веса расчетного блока; δ_i – угол наклона расчетного блока к горизонту (Рис. 2).

Общее уравнение равновесия, определяющее разность удерживающих и сдвигающих сил по потенциальной поверхности скольжения, по методу алгебраического сложения сил имеет вид:

$$\Delta T = \sum N_i \cdot \operatorname{tg}(\phi_i) + C_i \cdot l_i - T_i, \quad (3)$$

где N_i , T_i – удерживающие и сдвигающие силы соответственно, C_i и ϕ_i – сцепление в массиве и угол внутреннего трения для расчетного блока шириной l_i .

Если по наиболее напряженной поверхности разность удерживающих и сдвигающих сил ΔT равна нулю, то массив находится в предельном состоянии.

Для оценки устойчивости бортов и откосов в реальных горно-геологических условиях также применяется метод векторного сложения сил (метод многоугольника сил), учитывающий реакции между блоками, на которые по определенным признакам разбивается призма возможного обрушения.

При расчете методом многоугольника сил точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и от направления реакции между ними (Рис. 3). Достаточная точность расчетов достигается, когда границы между блоками принимают подобно расположению второго семейства поверхностей скольжения при расчете методом предельно напряженного состояния, т. е. под углом $(90^\circ - \phi)$ к первому семейству поверхностей скольжения.

Таблица 1. Результаты расчета устойчивых параметров откоса борта карьера
 Table 1. Results of calculation of stable parameters of the quarry side slope

Высота откоса, м	Максимальный угол откоса при заданной высоте с использованием различных методов расчета, град						
	метод проф. Шпакова П. С. (ПО «Stability Analysis»)	метод алгебраического сложения сил (по расчетным формулам с исп. MS Excel)	метод многоугольника сил (с использованием граф. визуализации в ПО AutoCAD)	метод Спенсера (ПО Slide2)	метод Бишопа (ПО Slide2)	метод Morgenstern-Price (ПО Slide2)	метод конечных элементов (ПО RS2)
100	78.5	78.2	77	79.1	79.2	79.0	73.0
150	63.5	63.2	-	64.4	65.7	65.5	62.0
200	54.3	54.6	-	55.1	55.3	55.0	53.0
250	48.5	48.1	-	49.1	49.9	49.2	48.0
300	44.7	45.0	44	45.5	46.1	45.3	44.8
350	42.1	43.0	-	43.0	43.4	42.9	42.7
400	40.2	40.5	-	40.6	41.4	40.8	41.0
450	38.8	38.2	-	39.0	39.2	38.8	39.0
500	37.6	37.2	37	37.8	38.1	38.4	38.5
550	36.7	36.5	-	37.0	37.2	37.2	37.5
600	35.9	35.4	-	36.1	36.3	36.0	36.5
650	35.3	35	-	35.5	35.6	35.3	35.9
700	34.8	34.1	34	35.0	35.2	34.8	36.0

При этом в расчет принимаются следующие силы:

P_i – вес рассматриваемого блока;

$C_{i,i+1}$, $C_{i,i-1}$, C_i – силы сцепления, направленные параллельно соответствующим границам блока;

$R_{i,i+1}$, $R_{i,i-1}$, R_i – реакции по границам блока;

Если при расчете многоугольника сил не замыкается, т. е. существует невязка сил ΔF , то устойчивость откоса не соответствует принятому коэффициенту запаса.

Для проведения расчетов устойчивости методом алгебраического сложения сил и методом векторного сложения сил была построена критическая поверхность скольжения. Определение наиболее напряженной поверхности выполнено на основе аналитических расчетов.

В геологическом строении Горевского свинцово-цинкового месторождения принимают участие породы горевской свиты рифейского возраста. Прибортовой массив сложен известняками различного состава и строения: метаморфизованные, слюдисто-кварц-известковые, мелкозернистые, от слабо до интенсивно трещиноватых, слегка и интенсивно выветренных. По своим физико-механическим свойствам породы прибортовой зоны можно объединить как один геомеханический домен с усредненными прочностными свойствами:

сцепление, $C = 57.1 \text{ т/м}^2$; угол внутреннего трения, $\phi = 33^\circ$; плотность, $\rho = 2.78 \text{ т/м}^3$.

Карьерное поле месторождения нарушено тектоническими разломами различной мощности (от сантиметров до десятков метров), прочностные свойства тектонических нарушений были определены методом обратных расчетов $C = 3.39 \text{ т/м}^2$; угол трения, $\phi = 30^\circ$.

Результаты исследования

Согласно методическим указаниям по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов [6] для борта (или его участка) на этапе эксплуатации и технического перевооружения сформированного в скальных и полускальных массивах нормативный коэффициент запаса устойчивости должен составлять не менее $n=1.3$.

Оценка устойчивости откосов борта карьера Горевского месторождения выполнена по расчетной профильной линии семью методами: численно-аналитическим проф. Шпакова П. С., Спенсера, Бишопа, Morgenstern-Price, алгебраического сложения сил и многоугольника сил, конечных элементов. Результаты геомеханических расчетов устойчивости для Горевского месторождения представлены в Таблице 1 и на сводной диаграмме (Рис. 4). На Рис. 5-9 представлены типовые результаты расчетов и построений, которые были получены при расчетах различными методами в различном программном обеспечении.

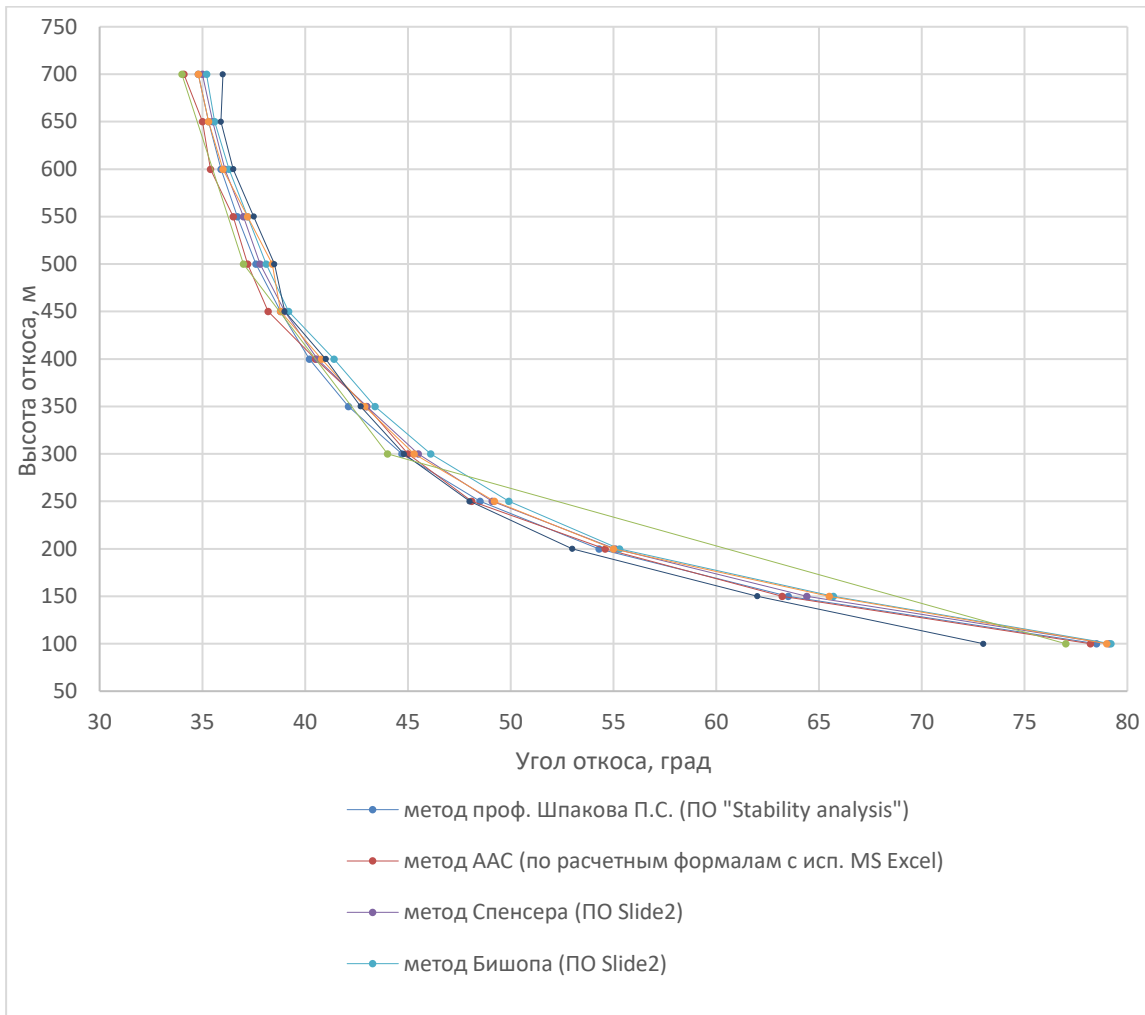


Рис. 4. Сводная диаграмма результатов расчетов устойчивости
Fig. 4. Summary diagram of stability calculation results

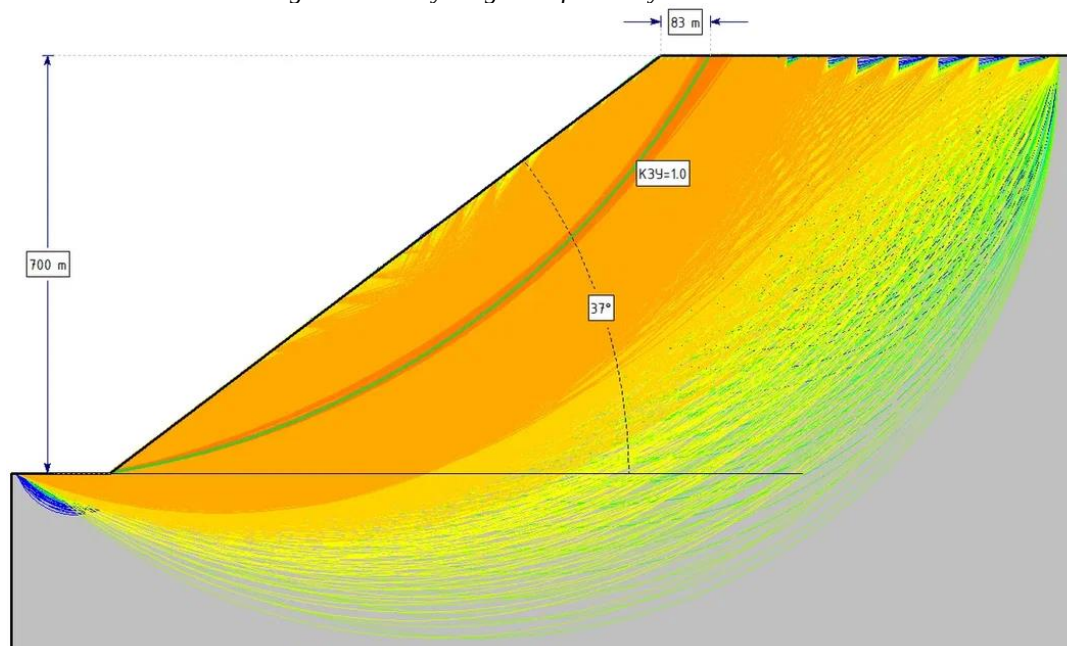


Рис. 5. Результат расчета в ПО Slide2
Fig. 5. Calculation result in Slide2 software

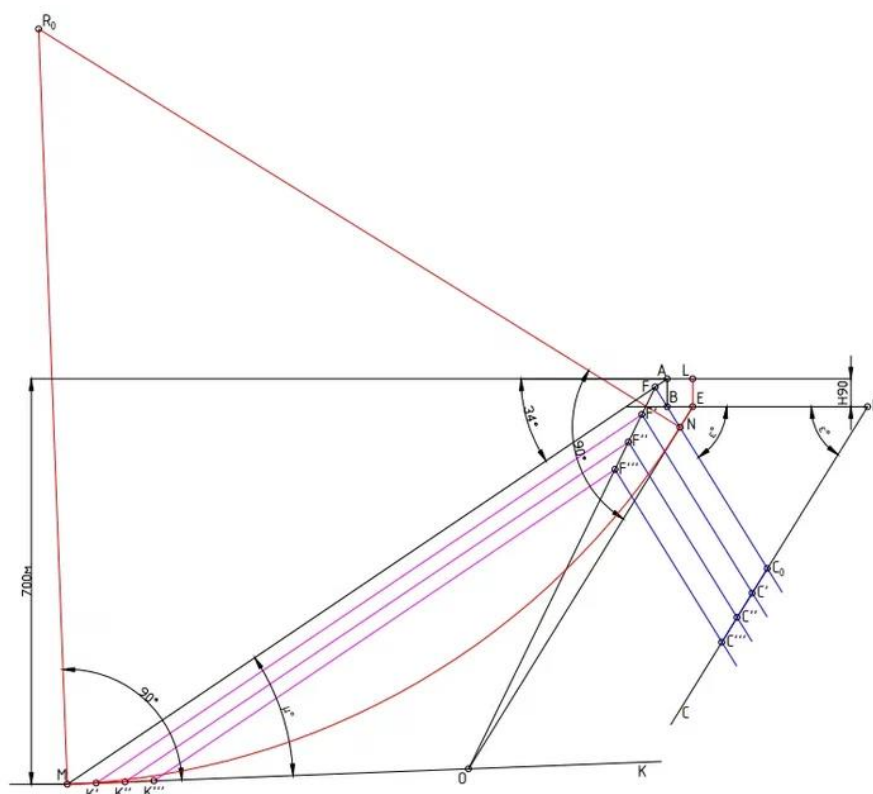


Рис. 6. Результат построения поверхности скольжения при расчете методом алгебраического и векторного сложения сил

Fig. 6. Result of constructing a sliding surface when calculating by the method of algebraic and vector addition of forces

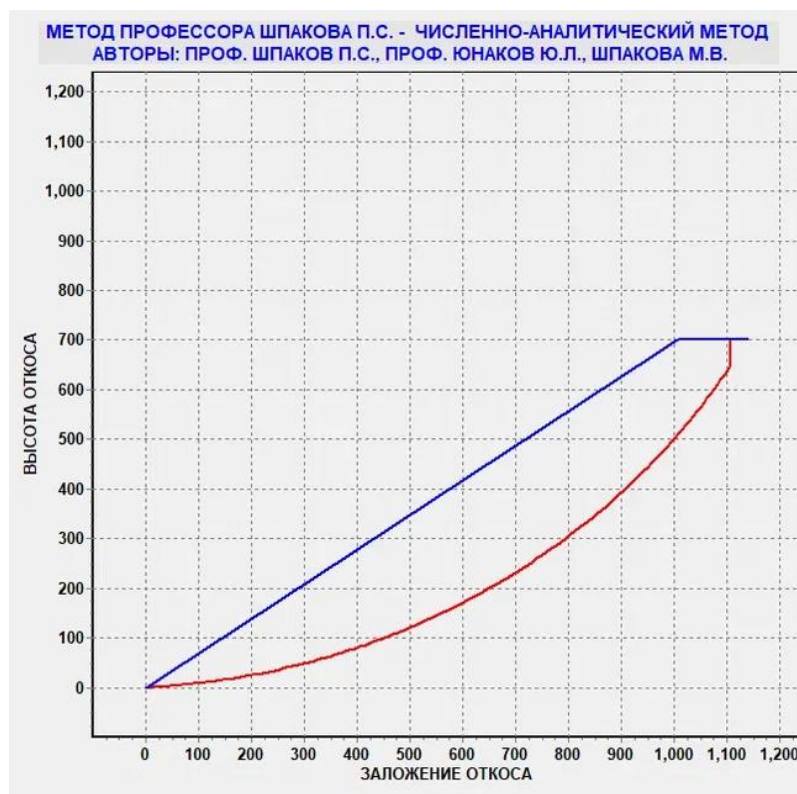


Рис. 7. Результат расчета в ПО «Stability Analysis»

Fig. 7. Calculation result «Stability Analysis» software

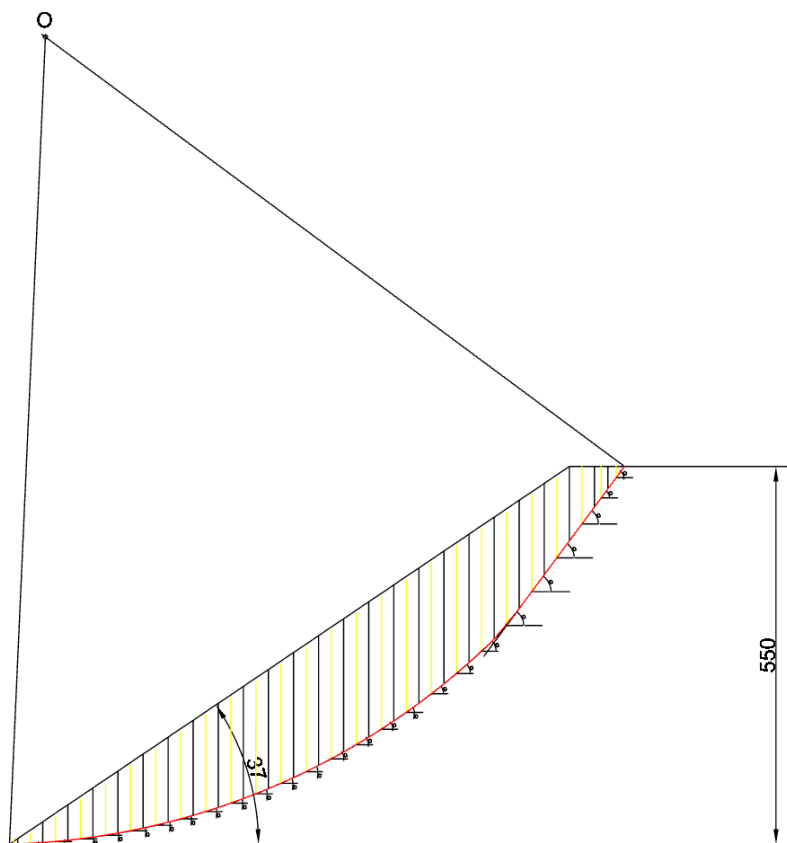


Рис. 8. Результат деления на блоки при расчете алгебраическим сложением сил
Fig. 8. The result of dividing into blocks when calculating by algebraic addition of forces

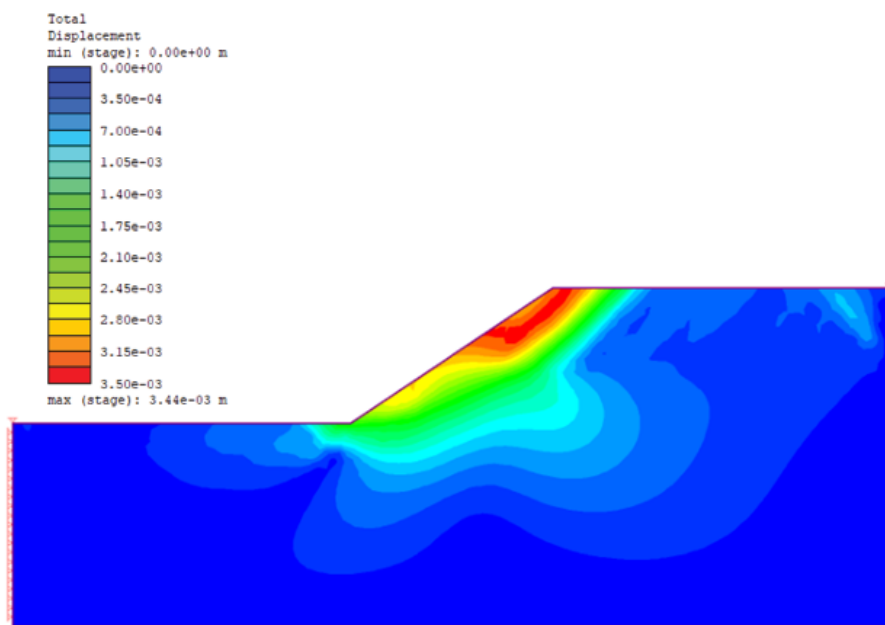


Рис. 9. Результат расчетов методом конечных элементов в ПО RS2
Fig. 9. The result of calculations using the finite element method in RS2 software

Обсуждение

При использовании метода профессора Шпакова П. С. (ПО «Stability analysis») результаты расчетов предельного угла откоса, при котором борт карьера будет находиться в устойчивом состоянии, варьируются в диапазоне

от 34.8 до 78.5 градусов в зависимости от высоты борта карьера. В целом результаты при применении данного метода показывают меньшие углы откоса при одинаковой высоте борта относительно результатов при использовании других методов, основанных на

теории предельного равновесия, за исключением результатов, полученных алгебраическим сложением сил с использованием MS Excel. Данные методы хорошо применимы при консервативном подходе обоснования устойчивости численно-аналитическими методами. Метод многоугольника сил с использованием графической визуализации в ПО AutoCAD является трудоемким в использовании, что говорит об ограниченной применимости метода с целью быстрого получения результата, однако результаты сопоставимы с другими в пределах 1 градуса. Методы Спенсера, Бишопа и Моргенштерна-Прайса (все на основе ПО Slide2) демонстрируют углы откоса в диапазоне от 35.0 до 79.1 градусов, от 35.2 до 79.2 градусов и от 34.8 до 79.0 градусов соответственно. По результатам расчета с использованием метода конечных элементов (ПО RS2) получены предельные углы откоса от 34.0 до 73.0 градусов – более низкие значения за счет использования другого принципа, заложенного в основах моделирования механики деформируемого тела, по сравнению с другими численно-аналитическими методами.

Таким образом, расчеты предельного угла откоса, обеспечивающего устойчивое положение борта, с использованием различных методов имеют результаты в пределах 1-2 градусов, что говорит о достаточной сходимости результатов. Исключением являются результаты, полученные при использовании метода конечных элементов в программе RS2 при расчете крутых углов откоса – расхождения с другими методами расчета составляют до 5 градусов.

Выводы

В ходе проведения исследований отмечено, что методы алгебраического сложения сил (по расчетным формулам с использованием MS Excel) и многоугольника сил (с использованием графической визуализации в ПО AutoCAD) являются трудоемкими в реализации, однако не требуют сложного программного обеспечения и могут быть использованы в случае отсутствия специализированного ПО.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы о рациональном применении изученных методов в комплексе для обоснования параметров борта карьера Горевского свинцово-цинкового месторождения:

1. Предварительная оценка устойчивости бортов карьера с использованием метода Спенсера, метода Бишопа в программном обеспечении Slide2 или метода профессора Шпакова П. С. в ПО «Stability Analysis». Данные методы позволяют быстро определить общую устойчивость откоса, учитывая геометрические параметры и геомеханические свойства горных пород. Важно произвести несколько итераций,

варьируя параметры, чтобы получить различные варианты устойчивости.

2. После предварительной оценки устойчивости в программе Slide2, Stability Analysis рекомендуется произвести более детальный анализ, используя метод конечных элементов в программе RS2. RS2 позволяет более точно учитывать влияние геологических структур, различных свойств горных пород и гидрологических факторов на устойчивость борта карьера, а также моделировать более сложную геометрию и учитывать более точные параметры.

3. Сравнение результатов устойчивости, полученных с помощью метода конечных элементов в RS2, с результатами методов Спенсера или Бишопа в Slide2. Необходимо сравнить коэффициенты запаса устойчивости, напряжения и деформации, полученные с помощью различных методов и программных средств.

В случае, если результаты различаются значительно, рекомендуется проанализировать причины этих различий и произвести оптимизацию параметров модели, чтобы достичь наиболее реалистичных и надежных результатов.

4. Учет неопределенности и верификация. Следует учитывать неопределенность свойств массива, геометрии откоса и других факторов, проводя дополнительный анализ исходных данных. Рекомендуется верифицировать результаты расчетов с фактическими наблюдениями или данными с обнажений массива, используя качественную оценку массива пород, чтобы убедиться в достоверности исходных данных, выбранных методов, программных пакетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuan G., Jinduo L., Tianhong Y., Wenxue D. Stability analysis of a deep and large open pit based on fine geological modeling and large-scale parallel computing // *Geomatics, natural hazards and risk*. 2023. Vol. 14. № 1. DOI: 10.1080/19475705.2023.2266663.
2. Deliveris A. V., Theocharis A. I., Koukoulas N. C., Zevgolis I. E. Numerical Slope Stability Analysis of Deep Excavations Under Rainfall Infiltration // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022. Vol. 8. DOI: 10.1007/s10706-022-02135-4.
3. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023. Vol. 7. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.
4. Bar N. On the importance of three-dimensional analysis of rock slopes in civil and mining engineering projects. Third International Slope Stability in Mining Conference. At: Perth, Australia. Conference: SSIM 2023.
5. Калужный А. С. Анализ результатов оценки устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 10. С. 123–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_123.

6. Рыльникова М. В., Алексеев А. Б., Есина Е. Н., Зотеев О. В. [и др.] Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. М. : ИПКОН РАН, 2022. 80 с. URL: <http://opst.xn--80apgmdbfl.xn--p1ai/wp-content/uploads> (дата обращения: 06.05.2024).
7. Фисенко Г. Л. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. Минтопэнерго РФ, РАН Гос. НИИ горной геомеханики и маркшейдерского дела, межотраслевой науч. центр ВНИМИ. Санкт-Петербург. 1998 г. 208 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293827/4293827109> (дата обращения: 06.05.2024).
8. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. Москва : Недра, 1965 г. 378 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/8161?ysclid=lvubuonpzw770366985> (дата обращения: 06.05.2024).
9. Коврижных Е. В., Гуца Д. А., Абдуллаева А. А. Качественная оценка геомеханических рисков по результатам долгосрочного мониторинга и 3d модели месторождения, построенной с применением мультикоптера // Московский экономический журнал. 2022. № 2. С. 40–43. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_2_73.
10. Боос И. Ю., Юнаков Ю. Л., Коврижных Е. В., Абдуллаева А. А., Редькин Д. В. Определение сдвиговых характеристик поверхностностей ослабления массива по результатам обратных расчетов // Маркшейдерский вестник. 2022. № 1. С. 41–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49243216> (дата обращения: 06.05.2024).
11. Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces // Géotechnique. 1967. № 17(1). Pp. 11–26. URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1967.17.1.11> (дата обращения: 06.05.2024).
12. Coduto D. P. Geotechnical Engineering Principles and Practices. 2011. Edition: 2nd Publisher: Pearson ISBN: 0-13-236868-4. URL: https://www.researchgate.net/publication/261287253_Geotechnical_Engineering_Principles_and_Practices (дата обращения: 06.05.2024).
13. Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., Boyce G. M. Slope Stability and Stabilization Methods. 2002. URL: https://www.researchgate.net/publication/255222923_Slope_Stability_and_Stabilization_Methods (дата обращения: 06.05.2024).
14. Попов В. Н., Шпаков П. С., Юнаков Ю. Л. Управление устойчивостью карьерных откосов: Учебник для вузов. Москва : Издательство Московского государственного горного университета «Горная книга», 2008 г. 683 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/31733?ysclid=lvuax9lgtm133716685> (дата обращения: 06.05.2024).
15. Rao S. S. The Finite Element Method in Engineering. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323639645> (дата обращения: 06.05.2024).
16. Kaur A. Sharma R. K. Slope stability analysis techniques A review // Sci. Technol. 2016. № 1. Pp. 52–57. URL: <https://www.researchgate.net/publication/331935291> (дата обращения: 06.05.2024).

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Коврижных Егор Владимирович, аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Россия, г. Красноярск, просп. имени Газеты Красноярский Рабочий, 95), e-mail: e.kovrizhnykh@mail.ru

Косолапов Александр Иннокентьевич, профессор кафедры открытых горных работ, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Россия, г. Красноярск, просп. имени Газеты Красноярский Рабочий, 95), доктор технических наук

Гришин Арсений Александрович, аспирант, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660041, Россия, г. Красноярск, просп. имени Газеты Красноярский Рабочий, 95), e-mail: arseniy.grishin.2012@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Коврижных Егор Владимирович – провел анализ существующих подходов и методов расчета устойчивости бортов карьера, а также собрал и систематизировал данные о геомеханических характеристиках массива Горевского месторождения. На основе этих данных был выполнен сравнительный анализ различных программных комплексов для расчета устойчивости, что позволило выделить наиболее эффективные решения для конкретных условий данного месторождения.

Косолапов Александр Иннокентьевич – обеспечил научное руководство исследованием, сформулировал ключевые задачи и подходы, которые были использованы в работе. Научный руководитель также консультировал аспирантов по вопросам применения геомеханических моделей и программных комплексов и принимал участие в интерпретации полученных результатов и формулировке выводов статьи.

Гришин Арсений Александрович – осуществил моделирование устойчивости бортов карьера с использованием выбранных программных комплексов, а также провел расчеты устойчивости различных конструктивных элементов бортов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SUBSTANTIATION OF OPEN PIT BOARD PARAMETERS OF THE GOREVSKY DEPOSIT BASED ON THE RESULTS COMPARATIVE ANALYSIS OF STABILITY CALCULATION

Egor V. Kovrizhnykh *, Aleksandr I. Kosolapov,
Arseniy A. Grishin

Siberian Federal University

* for correspondence: e.kovrizhnykh@mail.ru



Article info

Received:

30 June 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

11 June 2025

Keywords: stability assessment, slope, side, numerical and analytical methods, geomechanics, substantiation.

Abstract.

The relevance of using modern software packages to justify the stability of open-pit slopes is driven by the need to improve safety, forecast accuracy, and the efficiency of mining operations. Despite this, many engineers do not consider such solutions mandatory, which is due to several factors. First, regulatory documents do not always require complex geomechanical calculations using numerical methods. Second, existing software packages are often highly complex and narrowly specialized, which limits their adoption. These factors result in the insufficient dissemination of more precise technologies for predicting rock mass behavior, which could significantly enhance control over the stability of pit slopes. The objective of this study is to explore the capabilities of modern software packages for more accurate justification of slope stability, demonstrated through the example of the Gorevsky lead-zinc deposit. The article examines the main reasons limiting the adoption of advanced mathematical methods in slope stability forecasting practice and analyzes various software solutions that allow for the consideration of lithological differences, rock mass heterogeneity, and the calculation of stability safety factors. Modeling and calculations of stable slope parameters were performed using various software packages. The study's results show that using modern software solutions significantly improves the accuracy of stability calculations, enhances the detail of rock mass models, and improves forecasting. This, in turn, increases mining safety, reduces risks, and enhances the economic efficiency of mining operations, highlighting the necessity of their widespread adoption in engineering practice.

For citation: Kovrizhnykh E.V., Kosolapov A.I., Grishin A.A. Substantiation of open pit board parameters of the gorevsky lead-zinc quarry deposit based on the results comparative analysis of stability calculation in various. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):155-166. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-155-166, EDN: MLPAJM

REFERENCES

1. Yuan G., Jinduo L., Tianhong Y., Wenxue D. Stability analysis of a deep and large open pit based on fine geological modeling and large-scale parallel computing. *Geomatics, natural hazards and risk*. 2023; 14(1). DOI: 10.1080/19475705.2023.2266663.
2. Deliveris A.V., Theocharis A.I., Koukoulas N.C., Zevgolis I.E. Numerical Slope Stability Analysis of Deep Excavations Under Rainfall Infiltration. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022; 8. DOI: 10.1007/s10706-022-02135-4.
3. McQuillan A., Bar N. The necessity of 3D analysis for open-pit rock slope stability studies: Theory and practice. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023; 7. DOI: 10.17159/2411-9717/2425/2023.
4. Bar N. On the importance of three-dimensional analysis of rock slopes in civil and mining engineering projects. Third International Slope Stability in Mining Conference. At: Perth, Australia. Conference: SSIM 2023.
5. Kalyuzhny A.S. Analysis of 2D and 3D estimates of pit wall stability. *Mining Informational and Analytical*

Bulletin. 2022; 10:123–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_123.

6. Ryl'nikova M.V., Alekseev A.B., Esina E.N., Zoteev O.V. [et al.] Guidelines for determining the parameters of the sides and ledges of quarries, cuts and slopes of dumps. M.: IPKON RAS; 2022. 80 p. URL: <http://opst.xn--80apgmdbfl.xn--p1ai/wp-content/uploads>. Date of access: 06.05.2024.

7. Fisenko G.L. Rules for ensuring slope stability in coal mines. Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation, RAS State. Research Institute of Mining Geomechanics and Surveying, interdisciplinary scientific. VNIMI center. Saint Petersburg. 1998. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293827/4293827109>. Date of access: 06.05.2024.

8. Fisenko G.L. Stability of the sides of quarries and dumps. Moscow. Subsoil. URL: <https://www.geokniga.org/books/8161?ysclid=lvubuonpzw770366985>. Date of access: 06.05.2024.

9. Kovrizhnykh E.V., Gushcha D.A., Abdullaeva A.A. Qualitative assessment of geomechanical risks based on the results of long-term monitoring and a 3D model of the field built using a multicopter. *Moscow Economic Journal.* 2022; 2:40–43. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_2_73.

10. Boos I.Yu., Yunakov Yu.L., Kovrizhnykh E.V., Abdullaeva A.A., Redkin D.V. Determination of the shear characteristics of weakening surfaces of a massif from the results of inverse calculations. *Surveyor's Bulletin.* 2022; 1:41–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49243216>. Date of access: 06.05.2024.

11. Spencer E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique.* 1967; 17(1):11–26. URL: <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1967.17.1.11>. Date of access: 06.05.2024.

12. Coduto D.P. Geotechnical Engineering Principles and Practices. Edition: 2nd Publisher: Pearson ISBN: 0-13-236868-4. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/261287253_Geotechnical_Engineering_Principles_and_Practices. Date of access: 06.05.2024.

13. Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S., Boyce G.M. Slope Stability and Stabilization Methods. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/255222923_Slope_Stability_and_Stabilization_Methods. Date of access: 06.05.2024.

14. Popov V.N., Shpakov P.S., Yunakov Yu.L. Managing the stability of quarry slopes: A textbook for universities. Moscow: Publishing house of the Moscow State Mining University "Mining Book"; 2008. 683 p. URL: <https://www.geokniga.org/books/31733?ysclid=lvuax9lgtm133716685>. Date of access: 06.05.2024.

15. Rao S.S. The Finite Element Method in Engineering. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323639645>. Date of access: 06.05.2024.

16. Kaur A., Sharma R.K. Slope stability analysis techniques A review. *Sci. Technol.* 2016; 1:52–57. URL: <https://www.researchgate.net/publication/331935291>. Date of access: 06.05.2024.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Egor V. Kovrizhnykh, Postgraduate Student, Siberian Federal University (660041, Russian Federation, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), e-mail: e.kovrizhnykh@mail.ru

Aleksander I. Kosolapov, professor, Siberian Federal University (660041, Russian Federation, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), Doctor of Engineering Sciences

Arseniy A. Grishin, Postgraduate Student, Siberian Federal University (660041, Russian Federation, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 95), e-mail: arseniy.grishin.2012@mail.ru.

Contribution of the authors:

Egor V. Kovrizhnykh – conducted an analysis of existing approaches and methods for calculating slope stability, as well as collected and systematized data on the geomechanical characteristics of the Gorevsky deposit. Based on this data, a comparative analysis of various software packages for stability calculations was performed, which allowed identifying the most effective solutions for the specific conditions of this deposit.

Aleksander I. Kosolapov – provided scientific guidance for the research, formulated the key tasks and approaches used in the study. The scientific supervisor also consulted the PhD students on the application of geomechanical models and software packages, as well as participated in the interpretation of the obtained results and formulation of the article's conclusions.

Arseniy A. Grishin – carried out slope stability modeling using the selected software packages and performed stability calculations for various structural elements of the slopes.

All authors have read and approved the final manuscript.

