

УДК 622.271.333

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ КАРЬЕРОВ, СЛОЖЕННЫХ ОСАДОЧНЫМИ ПОРОДАМИ

Ефремов Евгений Юрьевич¹,
Efremov-eu@mail.ru

Обогрелова Полина Игоревна²,
p.obogrelova@icloud.com

¹ Институт горного дела УрО РАН,
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

² Уральский государственный горный университет,
Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Актуальность. Анализ устойчивости горных пород при решении геомеханических и инженерно-геологических задач сталкивается с рядом трудностей при отображении физико-механических свойств массива горных пород на расчетных моделях. Среди них основными являются: широкий диапазон свойств, структура массива, отсутствие достаточного количества исходных данных. Исходные параметры имеют существенную важность при математическом моделировании, что выражается в принципе GIGO (англ. Garbage In, Garbage Out, «Мусор на входе – мусор на выходе»).

Целью работы является изучение влияния разброса физико-механических свойств горных пород, слагающих борта карьеров, на их устойчивость. Объектом исследования является верхняя часть массива, сложенная комплексом пород мезо-кайнозойского возраста. Полигоном исследования выступает Соколовское железорудное скарновое месторождение, разрабатываемое одноименным карьером в сложных инженерно-геологических условиях.

Методы. Исследование проводилось в рамках гипотезы предельного равновесия с помощью расчетных методов Филлениуса, Спенсера, Бишопа. Изучалась чувствительность модели борта карьера к прочностным параметрам горных пород: сцеплению и углу внутреннего трения. Анализ чувствительности осуществлялся с помощью перебора значений параметров в пределах диапазона свойств, полученных в ходе испытаний.

Результаты и выводы. Результаты исследований позволили установить зависимости коэффициента устойчивости бортов карьера от изменчивости физико-механических свойств мезо-кайнозойских отложений. Для инженерно-геологических условий Соколовского карьера выявлены породы, представляющие наибольшие риски с точки зрения устойчивости бортов. Применяемый подход является разновидностью сценарного прогнозирования и наряду с решением обратных задач, необходимых для калибровки моделей, является подходящим методом для оценки геомеханических условий.

Ключевые слова:

Анализ устойчивости бортов, борт карьера, гипотеза предельного равновесия, инженерно-геологические условия, осадочные породы, горный массив, коэффициент устойчивости бортов карьера.

Введение

В современной практике анализа устойчивости бортов карьеров наибольшее распространение получили различные варианты математического моделирования – численные и аналитические подходы. Примерами первых являются конечно-элементные и конечно-дискретные модели, примерами вторых – модели в рамках гипотезы предельного равновесия. Модели функционально связывают входные параметры (исходные данные, определяемые во время предварительных испытаний, или предполагаемые) с величинами, отражающими устойчивость массива. Соответственно, при математическом моделировании большую важность имеет качество исходных данных, что выражается в известном принципе GIGO (англ. Garbage In, Garbage Out, «Мусор на входе – мусор на выходе»).

При этом решение задач геомеханики, связанных с анализом устойчивости массива пород, при проектировании как подземных, так и открытых горных выработок, сопровождается рядом трудностей:

Во-первых, естественные массивы горных пород обладают широкой изменчивостью физико-механических параметров даже в пределах одного инженерно-

геологического элемента (ИГЭ) [1]. Во-вторых, прочностные свойства протяженных участков массива размерами, сравнимыми с размерами бортов карьера и очистных подземных выработок, определяются структурой массива, а не свойствами отдельных пород. На устойчивость массива влияют: трещиноватость, наличие тектонических нарушений, разломов, а также ширина раскрытия трещин и состав заполнителя, обводненность и т. д. В-третьих, отбор и проведение множественных испытаний образцов, необходимые для исчерпывающего описания пространственного распределения прочностных параметров пород, требуют значительных затрат. Различные подходы к определению устойчивости массивов для практики геомеханики с учетом приведенных трудностей предлагали L. Muller, E. Hoek, M.B. Pač, J.C. Jaeger, Z.T. Beniaowski К. В. Рупенейт [1–5] и др.

В данной статье предложен один из возможных подходов решения практических задач устойчивости бортов карьера – изучение влияния диапазона физико-механических свойств отдельных составляющих массива (инженерно-геологических элементов) на устойчивость борта карьера. Исследование проводилось в рамках модели предельного равновесия.

Инженерно-геологические условия

В качестве полигона исследования использовалось Соколовское железорудное скарновое месторождение, отрабатываемое одноименным карьером. Месторождение входит в Тургайскую железорудную провинцию, одну из крупнейших в Евразии, наряду с Сарбайским, Ломоносовским и Качарским месторождениями, и разрабатывается ССПО. Фактические размеры карьера составляют около 3000 м в длину и 2000 м в ширину, глубина карьера – 550 м. Добыча осуществляется с 1964 г., на данный момент карьер находится в стадии доработки прибортовых запасов. Буровые работы производятся с помощью станков СБШ 190/250, приведение борта в предельное состояние – с помощью станков СБУ 125. Погрузка породы осуществляется экскаваторами с прямой лопатой с объемом ковша от 5 до 12 м³. Транспортировка руды и пород осуществляется комбинированным способом в два этапа: на глубоких горизонтах, от забоя до станций перегрузки, с применением автосамосвалов, от станций перегрузки до отвалов и рудных складов с применением железнодорожного транспорта.

Инженерно-геологические условия отработки карьера считаются сложными. Сложность условий определяется комплексом факторов: физико-механическими свойствами пород (характеристики приведены в таблице), геологическим строением (схема строения приведена на рис. 1), склонностью пород к выветриванию и присутствием подземных вод.

Геологический разрез месторождения сложен осадочно-вулканогенными породами нижнего карбона (палеозойской эры) и перекрывающим их горизонтально залегающим комплексом осадочных пород мезо-кайнозойского возраста. Таким образом, на месторождении выделяются два отличающихся инженерно-геологических комплекса.

Первый комплекс сложен палеозойскими породами: от крепких устойчивых до среднеустойчивых (на рис. 1 обозначены цифрами 1–3), второй комплекс, представленный покровными мезо-кайнозойскими породами и глинистыми породами коры выветривания палеозойских пород общей мощностью 80–150 м и расположенный выше первого, состоит из слабых и средней крепости пород (на рис. 1 комплексу соответствуют породы, обозначенные цифрами 4–11).

Комплекс крепких и средней крепости палеозойских пород представлен эффузивными, метаморфическими и осадочно-вулканогенными породами: порфиритами, скарнами, туфами, туффитами, известняками и рудами. Породы палеозойского комплекса до глубины 50–100 м и в тектонических зонах характеризуются выветрелостью, сильной трещиноватостью и раздробленностью (на рис. 1 обозначены 2 и 3). В породах этого участка выделяются трещины, совпадающие со слоистостью вулканогенно-осадочной толщи, субширотные крутопадающие трещины, трещины отдельности меридионального простирания.

Второй комплекс, осадочная толща мезо-кайнозойских пород, залегает горизонтально на глинах коры выветривания мощностью 10–30 м, местами

напрямую на палеозойских породах. В разрезе осадочного комплекса основными являются слабые песчано-глинистые разности с преобладанием меловых песков мощностью 50–80 м. Выше меловых песков находятся породы средней крепости: кремнистые и глинистые опоки. В кровле опок залегают пластичные чеганские глины мощностью 20–30 м, являющиеся региональным водоупором, выше них расположены пески олигоценового возраста, четвертичные супеси и суглинки.

Осадочные отложения характеризуются высокой обводненностью и вмещают несколько водоносных горизонтов. Грунтовые воды, приуроченные к четвертичным отложениям суглинков, образуют первый водоносный горизонт. Наибольшее значение имеет второй водоносный горизонт, заключенный в песках верхнего мела. Этот горизонт занимает большую площадь и имеет значительную мощность, водоприток из этого горизонта составляет 70 % от общего водопритока в карьер. Третий водоносный горизонт развит в трещиноватых палеозойских породах, гидравлически связан с меловым горизонтом.

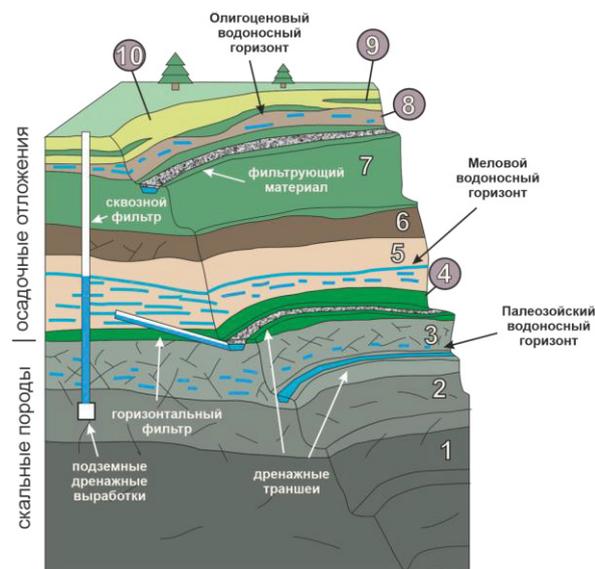


Рис. 1. Схема инженерно-геологических условий Соколовского месторождения: 1 – монолитные скальные палеозойские породы; 2 – нарушенные скальные палеозойские породы; 3 – сильно нарушенные скальные палеозойские породы; 4 – кора выветривания палеозойских пород; 5 – пески меловые; 6 – опоки эоценовые; 7 – глины чеганские; 8 – пески олигоценовые; 9 – четвертичные суглинки; 10 – четвертичные супеси

Fig. 1. Scheme of engineering and geological conditions of the Sokolovskoe ore deposit: 1 – monolithic paleozoic rocks; 2 – fractured paleozoic rocks; 3 – badly fractured rocky paleozoic rocks; 4 – weathering crust of paleozoic rocks; 5 – chalk sands; 6 – eocene flasks; 7 – chegansky clays; 8 – oligocene sands; 9 – quaternary loams; 10 – quaternary sandy loams

Как показывает практика разработки Соколовского, Сарбайского и Качарского месторождений (расположенных относительно недалеко, в схожих геологи-

ческих условиях, разрабатываемых крупными карьерами), описанные выше геологические условия определяют риски опасных инженерно-геологических процессов. По каждому месторождению фиксируются сотни нарушений устойчивости бортов, связанных с вывалами и оползнями. Размер нарушений составляет от единиц до сотен метров вдоль борта и от единиц до десятков метров в высоту.

Так, с точки зрения устойчивости бортов наибольшую опасность представляет комплекс осадочных пород. Негативным сочетанием факторов являются пластичность чеганских глин, трещиноватость палеогеновых опок и обводненность меловых песков.

Толща песков верхнемелового водоносного горизонта водонасыщена, пески проявляют свойства плывунов, что делает необходимым опережающее осушение. Сланцеватые, опоквидные глины (чеганской свиты низкой влажности 19–46 % и большой пластичности 25–64 %), песчаники и опоки эоцена делают слагаемые ими откосы при выветривании склонными к обрушениям и осыпям. Олигоценые пески в обводненном состоянии образуют оплывины. Неогеновые пестроцветные глины при смачивании склонны к набуханию и оползанию, что нарушает устойчивость вышележащих пород. Четвертичные суглинки и супеси в сухом состоянии устойчивы и способны держать угол откоса в предельном положении, но подземные воды четвертичного и средне олигоценового водоносных горизонтов негативно влияют на их устойчивость.

Водопонижение карьера осуществляется посредством дренажной галереи, окружающей карьер, пройденной в верхней выветрелой зоне палеозойских пород и дренирующей меловой горизонт с помощью скважин и сквозных фильтров (рис. 1). Открытый дренаж карьера представляет собой траншеи, дренирующие олигоценый и меловой водоносные горизонты, и горизонтальные фильтры, дренирующие меловой горизонт.

В рамках данной работы анализировалась устойчивость верхней части карьера, сложенной осадочными отложениями. Устойчивость бортов в случае Соколовского месторождения определяется в т. ч. режимом подземных вод, т. к. физико-механические свойства пород, слагающих борта в обводненном состоянии, значительно изменяются.

Расчет проводился для типового участка верхней части борта карьера, сложенного мезо-кайнозойскими отложениями. Высота уступа на участке составляет 10 м, ширина берм безопасности – 10 м, ширина транспортных берм – 25 м. Перепад отметок исследуемого участка составил 132 м (12 уступов), результирующий угол борта карьера на участке составляет 26°.

Упрощенно геологический разрез мезо-кайнозойских отложений (сверху вниз) можно представить в следующем виде:

- четвертичные отложения, глины, суглинки, супеси (сред. мощность ~7 м);
- пески олигоценые (~2–6 м);
- глины чеганской свиты (~10–30 м);

- опоки Эоценовые (~20–45 м);
- пески Меловые (~15–35 м);
- коры выветривания Палеозойских пород (~2–15 м).

Методика исследования

Цель исследования – оценить влияние разброса прочностных характеристик горных пород на устойчивость массива горных пород, слагающих борта Соколовского карьера. Рассматривается наиболее опасный участок, расположенный в верхней части разреза, сложенный мезо-кайнозойскими отложениями.

Методика исследования базируется на анализе составляющих физико-механических параметров в соответствии с моделью предельного равновесия.

Теория предельного равновесия широко применяется в геотехнических и геомеханических расчетах на объектах гражданского строительства и горных разработках при оценке устойчивости откосов авто- и ж/д дорог, отвалов, бортов карьеров и др. [6–9]. В рамках теории потеря устойчивости склона происходит, когда сумма сил внешних воздействий, действующих на участок склона, превышает реактивные силы сопротивления сдвигу [10]. Смещение массива при этом происходит вдоль поверхности скольжения. Определяющими прочностными параметрами массива выступают: удельный вес, сцепление и угол внутреннего трения.

Характеристикой устойчивости в рамках теории является коэффициент устойчивости. Если он принимает значение единицы, уравнение равновесия не выполняется, что определяется как потеря устойчивости.

На основе теории существует несколько математических моделей устойчивости склонов, различающихся тем, какие уравнения статики применяются, учитываются ли (и как учитываются) силы взаимодействия между отсеками, на которые разбивается склон, как учитывается сила реакции основания в отсеке и т. д. Наиболее распространенными являются модели Феллениуса, Бишопа, Morgenштерн-Прайса, Спенсера, Касательных сил и др. Ключевыми физико-механическими параметрами в рамках модели являются: удельный вес пород, сцепление, угол внутреннего трения. Примеры решения задач, связанных с устойчивостью карьера, описаны в работах [11–18].

Методика исследований состоит из двух этапов:

На первом этапе произведен расчет устойчивости типового участка верхней части борта карьера, сложенного осадочными породами. В качестве исходных расчетных параметров использовались средневзвешенные характеристики грунтов и средняя мощность отложений (таблица).

На втором этапе для каждого ИГЭ производилась серия расчетов с перебором параметров, соответствующим разбросу физико-механических свойств данного элемента, с шагом 2° для угла внутреннего трения и 20 кПа для сцепления. Остальные параметры соответствовали исходному расчету. Прочностные параметры пород приведены в таблице.

Расчет устойчивости проводился с применением методов Феллениуса, Спенсера, Бишопа для круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Реализа-

ция расчетной модели осуществлялась в программном комплексе Geostab. Устойчивость массивов грунта оценивается сопоставлением действительного рас-

четного напряженного состояния с предельно возможным. За основу берется понятие о *коэффициенте запаса устойчивости* [19–21].

Таблица. Физико-механические характеристики
Table. Physical and mechanical characteristics

ИГЭ (Инженерно-геологический элемент) EGE (Engineering-geologic element)	Наименование пород Rocks	Мощность слоя, м Layer thickness, m	физико-механические характеристики пород physical and mechanical properties of rocks				
			в образце/piece			в массиве/rock mass	
			ср. плотность γ , т/м ³ density, t/m ³	Сцепление C_{CP} , кПа Shear strength, kPa	Угол внутр. трения φ° Friction stress φ°	C , кПа C , kPa	φ°
ИГЭ 1/EGE 1	Суглинки четвертичные Quaternary loams	7	2	50	15	20–80	10–20
ИГЭ 2/EGE 2	Глины чеганские Chegansky clays	10	1,88	64	12	20–90	7–17
ИГЭ 3/EGE 3	Опоки палеогеновые Paleogen gaize	42	1,75	127	24	80–160	20–30
ИГЭ 4/EGE 4	Пески меловые Cretaceous sands	38	1,94	36	25	0–80	15–35
ИГЭ 5/EGE 5	Кора выветривания Crust of weathering	6	1,88	77	21	40–120	15–25

Результаты

Результаты анализа устойчивости приведены на рисунках в виде диаграмм, связывающих прочностные характеристики инженерно-геологических элементов с коэффициентом устойчивости борта карьера (рис. 2, 3). Результаты демонстрируют, что для большинства инженерно-геологических элементов при данной конфигурации бортов (выположенные борта, средний угол верхней части борта карьера около 15°), изменчивость физико-механических показателей не

оказывает значительного влияния на устойчивое состояние бортов. Коэффициент запаса устойчивости даже при наихудших значениях параметров остается превышающим нормативные значения. Одним из факторов низкого влияния ИГЭ 1 (четвертичных суглинков) и ИГЭ 2 (олигоценых песков) на устойчивость является расположение в верхней части разреза. В связи с этим вес вышележащей части массива оказывается недостаточным, чтобы вывести борт из устойчивого состояния.

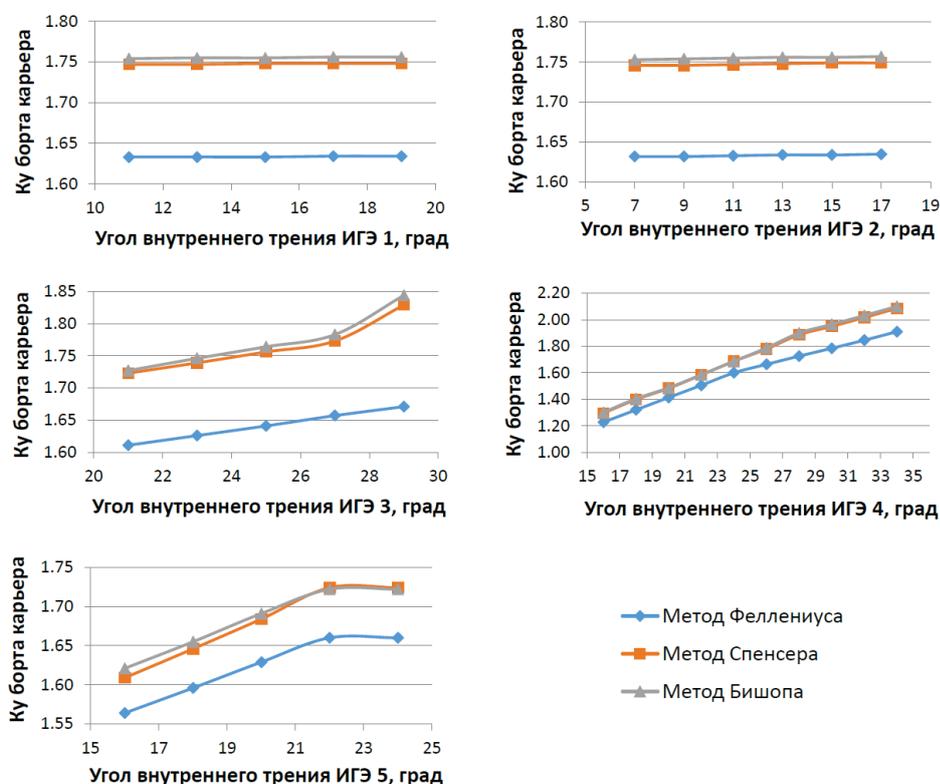


Рис. 2. Зависимости коэффициента устойчивости борта карьера от угла внутреннего трения инженерно-геологических элементов

Fig. 2. Relationship between safety factor of pit slope and angle of friction of rocks

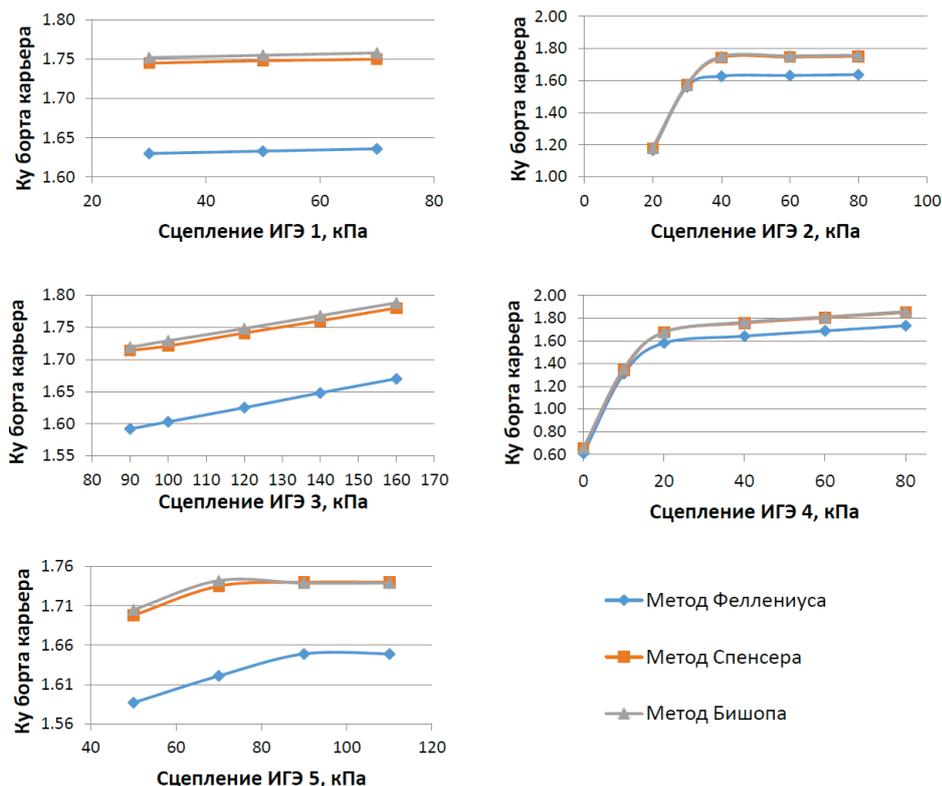


Рис. 3. Зависимости коэффициента устойчивости борта карьера от величины сцепления инженерно-геологических элементов

Fig. 3. Relationship between safety factor of pit slope and cohesion of rocks

Вместе с тем для нижерасположенных пород – меловых песков и коры выветривания – имеется диапазон прочностных показателей, соответствующий увлажненному состоянию, в котором происходит значительное снижения коэффициента устойчивости. Для ИГЭ 2 и ИГЭ 4 значениями, представляющими опасность, являются снижение величины сцепления ниже 15 кПа, а для ИГЭ 4 – угол внутреннего трения меньше 16° . Таким образом, анализ чувствительности модели показывает, что в условиях Соколовского месторождения устойчивость бортов карьеров, сложенных осадочными отложениями, определяется, в первую очередь, изменчивостью свойств меловых песков, при этом меловой водоносный горизонт является основным водоносным горизонтом. В связи с этим практически выводом исследования является важность поддержания работы дренажной системы на протяжении всего цикла работы карьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мюллер Л. Механика скальных массивов. – М.: Мир, 1971. – 257 с.
2. Рац М.В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. – М.: Наука, 1968. – 108 с.
3. Jaeger J.C. Fundamentals of rock mechanics. – USA: Wiley-Blackwell, 2007. – 488 p.
4. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. – Canada: Wiley-Interscience, 1989. – 250 p.
5. Рупнейт К.В. Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. – М.: Недра, 1975 – 223 с.
6. Ким М.С., Ким В.Х. Основы механики грунтов. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. – 143 с.
7. Bell J.M. General slope stability analysis // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. – 1968 – V. 94. – № 6. – P. 1413–1431.
8. Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques / F. Tschuchnigg, H.F. Schweiger, S.W. Sloan, A.V. Lyamin, I. Raissakis // Géotechnique. – 2015. – V. 65. – № 4. – P. 249–257.
9. Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods // Computers and Geotechnics. – 2007. – V. 3. – № 3. – P. 137–150.
10. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Наука, 1965. – 280 с.
11. Slope stability analysis using elastic finite element stress fields / L. Shiyl, S. Zhenning, L. Ming, S. Longtan // Engineering

- Geology. – 2020. – V. 273. – P. 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105673>
12. Liu X., Wang Y., Li D. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods // *Computers and Geotechnics*. – 2019. – V. 111. – P. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104203>
 13. Исследование устойчивости уступов верхних горизонтов стационарного борта разреза «Богатырь» / О.В. Старостина, В.Н. Долгонос, С.Б. Алиев, Е.В. Абуева // *Уголь*. – 2019. – Т. 1138. – № 1. – С. 27–32.
 14. Бабец Д.В. Развитие классификации горных пород по степени устойчивости с учетом их естественной нарушенности // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. – 2016. – Т. 97. – № 2. – С. 44–51.
 15. Геомеханическое обеспечение устойчивости бортов карьера при увеличении глубины отработки / Б.С. Мухаметкалиев, Е.С. Калужный, С.А. Съедина, Н.К. Абдибеков // *Горный журнал*. – 2018. – № 4. – С. 27–31.
 16. Saqubba P., Moraci N. Residual strength parameters from a slope instability // *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. – St. Louis, Missouri, 1993. – Paper no. 2.58.
 17. Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history // *Computers and Geotechnics*. – 2015. – V. 70. – P. 178–189.
 18. Lam L., Fredlund D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis // *Canadian Geotechnical Journal*. – 1993. – V. 30. – № 6. – P. 904–919.
 19. Руководство пользователя GeoStab 7.0.10 Расчет устойчивости склонов и откосов. – 2020. – 139 с. URL: <https://malininsoft.ru/GeoStab-UserGuide> (дата обращения 10.06.2022).
 20. Nasvi M.C.M., Krishnya S. Stability Analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) using finite element and limit equilibrium methods // *Indian Geotechnical Journal*. – 2019. – V. 49. – P. 620–634.
 21. Singh S.K., Negi M.S., Singh J. Strengthening of slope by soil nailing using finite difference and limit equilibrium methods // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. – 2021. – V. 7. – P. 64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00308-4>

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Ефремов Е.Ю., научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.

Обогрелова П.И., студент Уральского государственного горного университета.

UDC 622.271.333

SLOPE STABILITY ANALYSIS FOR OPEN PIT SIDES COMPOSED OF SEDIMENTARY ROCKS

Evgeniy Yu. Efremov¹,
Efremov-eu@mail.ru

Polina I. Obogrelova²,
p.obogrelova@icloud.com

¹ Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamin-Sibiryak street, Yekaterinburg, 620219, Russia.

² Ural State Mining University,
30, Kuibyshev street, Yekaterinburg, 620144, Russia.

Relevance. Rock mass stability analysis faces a number of difficulties when modelling the mechanical conditions of rocks, these are a wide range of strength properties, the structure of the rock mass, and the lack of a sufficient amount of input data. The input parameters are of significant importance for mathematical modelling, which is expressed in the GIGO principle (Garbage In, Garbage Out).

The purpose of the research is to determine the influence of the strength properties scatter of sedimentary rocks in the open pit side. The object of research is the upper part of the open pit side, composed of the complex of the Mesozoic and Cenozoic rocks. The research site is the Sokolovskoe ore deposit, developed by the mine of the same name.

Research methods. The study was carried out using the of limit equilibrium method. The models of Fellenius, Spencer, Bishop were used. The sensibility of the pit slope model to the strength parameters (cohesion and angle of internal friction) of soils was studied. Sensibility analysis was carried out by exhaustive search method in a range of properties obtained using the failure tests.

Conclusions. The relationship of the safety factor and variability of the strength properties are obtained. For the conditions of the Sokolovskoe deposit, rocks have been identified that pose the greatest danger to the stability of the open pit sides. The applied approach is a kind of scenario analysis, and along with inverse problems, is a suitable method for evaluation of the geological factors.

Key words:

Slope stability analysis, open pit side, limit equilibrium method, geological factors, soils, rock mass, safety factor of open pit slope.

The research was carried out within the State assignment of IM UB RAS, subject 075-00412-22 IIP, subject 2 (2022 –2024) (FUWE-2022-0002) pez. No.1021062010532-7-1.5.1.

REFERENCES

- Muller L. *Mekhanika skalnykh massivov* [Rock mass mechanics]. Moscow, Myr Publ., 1971. 257 p.
- Rats M.V. *Neodnorodnost gornyykh porod i ikh fizicheskikh svoystv* [Inhomogeneity of rocks and their physical properties]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 108 p.
- Jaeger J.C. *Fundamentals of rock mechanics*. USA, Wiley-Blackwell, 2007. 488 p.
- Beniawski Z.T. *Engineering rock mass classifications*. Canada, Wiley-Interscience, 1989. 250 p.
- Ruppeneit K.V. *Deformiruemost massivov treshinovatykh gornyykh porod* [Deformability of fractured rock mass]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 223 p.
- Kim S., Kim V.Kh. *Osnovy mekhaniki gruntov* [Fundamentals of soil mechanics]. Voronezh, Voronezhskiy gosudarstveniy tekhnicheskii universitet, 2017. 143 p.
- Bell J.M. General slope stability analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, vol. 94, no. 6, pp. 1413–1431.
- Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W., Lyamin A.V., Raissakis I. Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques. *Geotechnique*, 2015, vol. 65, no. 4, pp. 249–257.
- Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics*, 2007, vol. 3, no. 3, pp. 137–150.
- Fisenko L. *Ustoychivost bortov karyerov i otvalov* [The stability of the sides of boats and dumps]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 280 p.
- Shiyi L., Zhenning S., Ming L., Longtan S. Slope stability analysis using elastic finite element stress fields. *Engineering Geology*, 2020, vol. 273, p. 105673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105673>.
- Liu X., Wang Y., Li D. Investigation of slope failure mode evolution during large deformation in spatially variable soils by random limit equilibrium and material point methods. *Computers and Geotechnics*, 2019, vol. 111, pp. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104203>.
- Starostina O.V., Dolgonosov V.N., Aliev S.B., Abueva E.V. Issledovanie ustoychivosti ustupov verkhnikh gorizontov statsionarnogo borta razreza «Bogatir» [Investigation of the stability of the ledges of the upper horizons of the stationary side of the Bogatyr section]. *Coal scientific journal*, 2019, vol. 1138, no. 1, pp. 27–32.
- Babets D.V. Razvitiye klassifikatsii gornyykh porod po stepeni ustoychivosti s uchotom ikh estestvennoy narushennosti [Development of classification of rocks on degree of stability taking into account their natural disturbance]. *Bulletin of Mikhail Ostrogradsky KrNU*, 2016, vol. 97, no. 2, pp. 44–51.
- Mukhametkaliev B.S., Kalyuzhny E.S., Syedina S.A., Abdibekov N.K. Geomekhanicheskoe obespechenie ustoychivosti bortov karyera pri uvelichenii glubini otrabotki [Geomechanical ensuring stability of the pit walls with increasing mining depth]. *Mining Journal*, 2018, no. 4, pp. 27–31.
- Carrubba P., Moraci N. Residual Strength Parameters from a Slope Instability. *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. St. Louis, 1993, paper no. 2.58.
- Tschuchnigg F., Schweiger H.F., Sloan S.W. Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 70, pp. 178–189.
- Lam L., Fredlund D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, vol. 30, no. 6, pp. 904–919.
- Rukovodstvo polzovatelya GeoStab* [GeoStab User Guide 7.0.10 Calculation of the stability of slopes and slopes]. 2020. 139 p. Available at: <https://malinsoft.ru/GeoStab-UserGuide> (accessed 10 June 2020).
- Nasvi M.C.M., Krishna S. Stability analysis of Colombo–Katunayake Expressway (CKE) using finite element and limit equilibrium methods. *Indian Geotechnical Journal*, 2019, vol. 49, pp. 620–634.
- Singh S.K., Negi M.S., Singh J. Strengthening of slope by soil nailing using finite difference and limit equilibrium methods. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2021, vol. 7, pp. 64.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Evgeniy Yu. Efremov, researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Polina I. Obogrelova, student, Ural State Mining University.