

7. Симоненко В.И. Систематизация гранитных и каменных карьеров для исследования ресурсосберегающей технологии их разработки / В.И. Симоненко, Черняев А.В., Мостыка А.В. // Зб. Наук. праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2007. – № 27. – с. 47-51.
8. Симоненко В.И. Оценка технологических решений открытой разработки нерудных месторождений полезных ископаемых / В.И. Симоненко // Сб. научн. тр.– НГА Украины.– №3, Т.4.– Дн-ск: – РИК НГА Украины, 1998. – С. 59-63.

ABSTRACT

Purpose. Research transshipment warehouse is on non-metallic minerals quarries and determination of their applications on criteria specific energy consumption of production processes when shipping products.

The methods of research. Using the analytical method have been calculated specific energy consumption of production processes when shipping products.

Findings. Established rational schemes warehouse handling finished goods in the quarries of non-metallic mineral, which should be used in technological schemes of processing and transport complexes in these quarries..

The originality. Defined scope of various schemes transshipment warehouse is typical nonmetal quarries, the criterion of specific energy processes to shipment of finished products.

Practical implications. The received results are recommended for introduction at designing of technology of development of non-metallic deposits and processing of raw materials for finished products.

Keywords: *open pits, non-metallic quarries, transshipment warehouse, energy production processes*

УДК 622.271.33: 624.131.537

© Б.Е. Собко, А.С. Ковров, А.Ю. Череп

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ КАРЬЕРА В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ОБВОДНЕННОСТИ

© B. Sobko, A. Kovrov, A. Cherep

GEOMECHANICAL JUSTIFICATION OF OPEN-PIT WORKING AREA PARAMETERS UNDER CONDITIONS OF HIGH WATERING

Проанализированы горнотехнические и геологические условия Мотроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения титано-циркониевых россыпных руд и предложены технологические схемы его отработки. Выполнена геомеханическая оценка устойчивости рабочего борта карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и нагрузок от горнотранспортного оборудования.

Проаналізовано гірничотехнічні та геологічні умови Мотронівсько-Анновської ділянки Малишевського родовища титано-цирконієвих розсипних руд і запропоновані технологічні схеми його відпрацювання. Виконано геомеханічну оцінку стійкості робочого борту кар'єру з урахуванням складної структури, властивостей порід і навантажень від гірничотранспортного устаткування.

Актуальность. В настоящее время в Украине открытым способом разрабатывают россыпные месторождения титановых руд, расположенных выше уровня грунтовых вод (Малышевское месторождение). Вскрытие таких месторождений осуществляют комбинированным способом с использованием шагающих экскаваторов и роторных комплексов. Отработка рудной залежи включает погрузку руды на автотранспорт, доставку её к узлу распульповки, размыв гидромонитором, гидротранспорт на обогатительную фабрику. В настоящее время запасы руды выше уровня грунтовых вод близки к исчерпанию. Ставится задача освоения обводненных запасов, в частности отработка Мотроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения. Отработка данной россыпи сильно усложнена большим водопритоком в добычной зоне карьера, который создает неблагоприятные условия для сохранения устойчивости уступов добычной и отвальной части и, следовательно, требует более тщательных исследований в области геомеханики прибортового массива пород для уточнения безопасных параметров рабочей зоны.

Анализ литературы. Безопасная конфигурация параметров откосов открытых горных выработок должна быть рассмотрена на ранней стадии планирования горных работ и требуется в течение всего срока их эксплуатации [1]. Эффективность таких мероприятий зависит, прежде всего, от надежности и точности оценок устойчивости на основе комплексных инженерно-геологической и гидрогеологической оценок. Решить поставленные задачи возможно при условии изменения высоты уступов и результирующих углов откосов карьера.

Откосы уступов карьера предложено рассматривать как геотехнические структуры, поэтому их разработка должна проводиться при соблюдении технических, экономических, экологических факторов, а также безопасности ведения горных работ [2]. Но эти структуры, прежде всего, подвержены природным геологическим и геомеханическим особенностям, влияющим на деформацию и разрушение пород горного массива.

Разработаны модули анализа устойчивости карьерных откосов с использованием геоинформационных систем для обеспечения визуализации их зон устойчивости [3, 4, 7]. Такой подход способствует выбору приемлемых критериев при проектировании результирующих углов откоса карьера и позволяет обеспечивать использование обновления данных по устойчивости при выборе различных вариантов и обеспечивают ощутимые экономические выгоды.

Ранее авторами [5, 6] проведены расчеты параметров устойчивости откосов бортов и уступов карьеров, используя численные методы, которые показали высокую надежность и достоверность.

Применение вышеперечисленных подходов и методов исследований для

определения устойчивости горных пород в массиве, при проведении открытых горных работ на сегодняшний день очень популярно, а также позволяет предоставить результаты с высокой точностью при проектировании и производстве горных работ. Однако необходимо также учитывать технологические особенности разработки того или иного месторождения, расстановку и перемещение горно-транспортного оборудования, способы перемещения вскрышных пород в отвалы (внутренние или внешние), особенно при сильной обводненности месторождения [8, 9].

Целью исследования является поиск комплексного подхода, который позволит наиболее точно рассчитывать рациональные параметры рабочей зоны с учетом факторов устойчивости горного массива и выбора необходимой техники и технологии ведения горных работ в карьере.

В ходе выполнения работы поставлены следующие *задачи*:

1. Проанализировать горнотехнические и геологические условия участка разработки месторождения, изучить физико-механические свойства вмещающих горных пород вскрыши;
2. Выполнить оценку устойчивости рабочего борта карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и нагрузок от горнотранспортного оборудования;
3. Определить значения коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) для рабочего борта карьера с учетом обводненности горного массива.

Методика исследований. Для исследования геомеханической устойчивости борта карьера при отработке месторождения использованы данные инженерно-геологических изысканий, технологические схемы ведения открытых горных работ, маркшейдерская съемка; оценка устойчивости откосов уступов и бортов карьера в программе конечно-элементного анализа *Phase2* компании Rocscience Inc. В геомеханических расчетах для оценки устойчивости откосов принят критерий разрушения Кулона-Мора.

Исходные данные. В качестве исходных данных для выполнения работы были использованы: проектные решения, результаты лабораторного определения физико-механических свойств грунтов, данные ранее выполненных теоретических и экспериментальных исследований для Вольногорского ГМК, материалы отчетов ИППЭ НАН Украины, Криворожского технического университета, института «Кривбасспроект», НПП «Геотехнология», отчет об изучении гидрогеологических условий Мотроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения, проектные проработки института «Горхимпром».

Инженерно-геологическая характеристика Мотроновско-Анновского участка месторождения. Участок расположен в 10 км к северо-западу от действующего Вольногорского карьера. Территория участка представляет собой равнину с отметкой поверхности 170-178 м, расчленённую четырьмя балками глубиной до 60 м. Такие значительные перепады высот рельефа предопределяют неоднородное геологическое строение (рис. 1) [10].

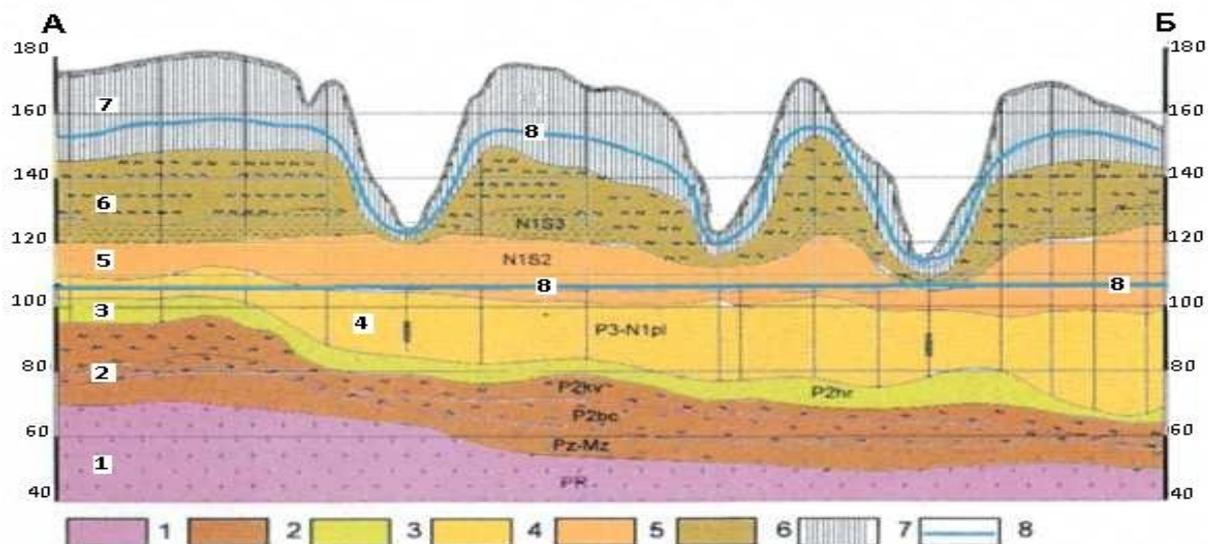


Рис. 1. Геологический разрез Мотроновско-Анновской россыпи:

- 1 – породы кристаллического фундамента; 2 – относительно водоупорные породы коры выветривания, бучацкого и киевского ярусов;
 3 – пески харьковского яруса; 4 – пески полтавского яруса,
 5 – пески сарматского яруса; 6 – водоупорные глины, 7 – лессовидные суглинки и плодородный слой; 8 – уровне грунтовых вод в четвертичных отложениях и в неоген-палеогеновом водоносном комплексе

Дневная поверхность Мотроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения представляет собой равнину, расчлененную овражно-балочной системой. Абсолютные отметки дневной поверхности изменяются в границах от 111 м до 174 м.

Мягкие вскрышные породы месторождения, имеющие слоистую структуру, представлены: лессовидными и плотными красно-бурыми суглинками; красно-бурыми глинами четвертичного возраста; зеленовато-серыми глинами сарматского яруса; мелкозернистыми песками сарматского яруса; тонкозернистыми песками полтавского яруса (рудный слой).

Мощность вскрышных пород изменяется в пределах от 16 м до 70 м.

Рудный слой имеет мощность порядка 10-12 м. Три верхних вскрышных слоя имеют более высокие физико-механические свойства по сравнению с физико-механическими свойствами надрудного слоя мелкозернистых песков и рудного слоя тонкозернистых песков.

Кровля рудного пласта, мощность которого составляет в среднем 11 м, лежит на отметках 100-110 м. Руда представлена преимущественно кварцевым глинистым песком, характерным для отложений шельфа. Над пластом снизу вверх залегают пески сарматского яруса неогена мощностью от 6 до 27 м, верхнесарматские загипсованные пестроцветные глины толщиной 5-12 м. Залегающие выше четвертичные красно-бурые глины мощностью до 25 м распространены только на водоразделах, в балках они размыты. Все отложения покрыты пластом лессовидных суглинков толщиной 5-10 м.

Рудний пласт підстиляють глауконитові піски харьківського ярусу потужністю 15-18 м. Нижче в депресіях фундаменту розповсюджені піщано-глинисті відкладення киевського ярусу. Ще нижче лежать углисті піски бучакського ярусу палеогена. На глибині від 50 до 120 м залягають граніти, верхня частина яких виветрена на глибину до 40 м.

Фізико-механічні характеристики порід Мотроновсько-Анновської россыпи Малышевського родовища представлені в табл. 1.

Гідрогеологічна характеристика Мотроновсько-Анновської россыпи родовища.

Рудні піски і підстиляючі відкладення, включаючи тріщинуваті граніти, включають в себе водоносний комплекс. Рівень води знаходиться на відмітках 100-110 м, тобто практично збігається з кровлею рудного пласта. Інженерно-геологічні умови проведення гірських робіт ускладнюються, в першу чергу, пливунними властивостями рудного пласта.

Ще одним слабким місцем є контакт лесовидних суглинків з підстиляючими глинами. Лесовидні суглинки характеризуються високою пористістю і в їх приподошвенній частині розповсюджені верховодки. Залягаюча під суглинком глина має високу вологість і пластичну консистенцію, тому отримала місцеве названня «маслянка». Контакт суглинків з глиною нахилений в бік балок. При подрезанні схилу гірськими виробками неминуче виникає оползневий процес.

Технологічні схеми відкритих гірських робіт. Принципіальні технологічні схеми обробки Мотроновсько-Анновської россыпи Малышевського родовища представлені на рис. 2. Представлена схема на рис. 2, а передбачає обробку вскрышних порід роторними екскаваторами типу ЭР-5000 з транспортуванням гірської маси в зовнішні отвали системою забойних, торцевих і отвальних конвеєрів і консольного отвалообразователя, розташованого безпосередньо на отвальних уступах.

Таблица 1
Физико-механические параметры пород Могроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения

| Инженерно-геологический слой | Стратиграфический индекс | Наименование грунтов | Абсолютная отметка, м | | Средняя мощность, м | Наименование параметра | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------------|---|-----------------------|---------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------|--|------------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|--|---|---|----|
| | | | Кровля | Подошва | | Природная влажность, W, дол. ед. | Плотность ρ , г/см ³ | Плотность в сухом состоянии, ρ_a , г/см ³ | Коэффициент пористости R, дол. ед. | Степень влажности, Sr, дол. ед. | Влажность на границе пластичности, W _p , пластичности | Число пластичности, I _p | Показатель текучести, I _L , дол. ед. | Модуль деформации, E, МПа | Удельное сжатие, C, КПа | Угол внутреннего трения ϕ , градусы | | | |
| 1 | Q _{IV} | Почвенно-растительный слой | - | - | 0,5-1,5 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 27 |
| 2 | Q _{I-II} | Суглинки красно-бурые | 175 | 145 | 22 | 0,18 | 1,68 | 1,43 | 0,89 | 0,47 | 0,19 | 0,09 | <0 | 4,5 | 1,4 | 25 | | | |
| 3 | Q _I | Глины красно- бурые | 145 | 130 | 14 | 0,25 | 1,91 | 1,53 | 0,79 | 0,86 | 0,25 | 0,23 | 0 | 5,6 | 4,3 | 18 | | | |
| 4 | N _{1S3} | Глины серо- зеленые | 135 | 125 | 8 | 0,25 | 1,91 | 1,53 | 0,79 | 0,86 | 0,25 | 0,23 | <0 | 5,6 | 4,3 | 14 | | | |
| 5 | N _{1S2} | Пески мелкозернистые сла-боглинистые | 125 | 103 | 17 | 0,02 | 1,88 | 1,75 | 0,68 | 0,11 | - | - | - | 2,8 | 2 | 32 | | | |
| 6 | N _{1PI} | Пески мелкозернистые сла-боглинистые рудные | 103 | 85 | 9,5 | 0,03 | 1,97 | 1,76 | 0,68 | 0,12 | - | - | - | 2,6 | 2 | 32 | | | |
| 7 | N _{1Cr} | Пески мелкозернистые гла-уконит-кварцевые | 85 | 60 | 20 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 29 | | | |

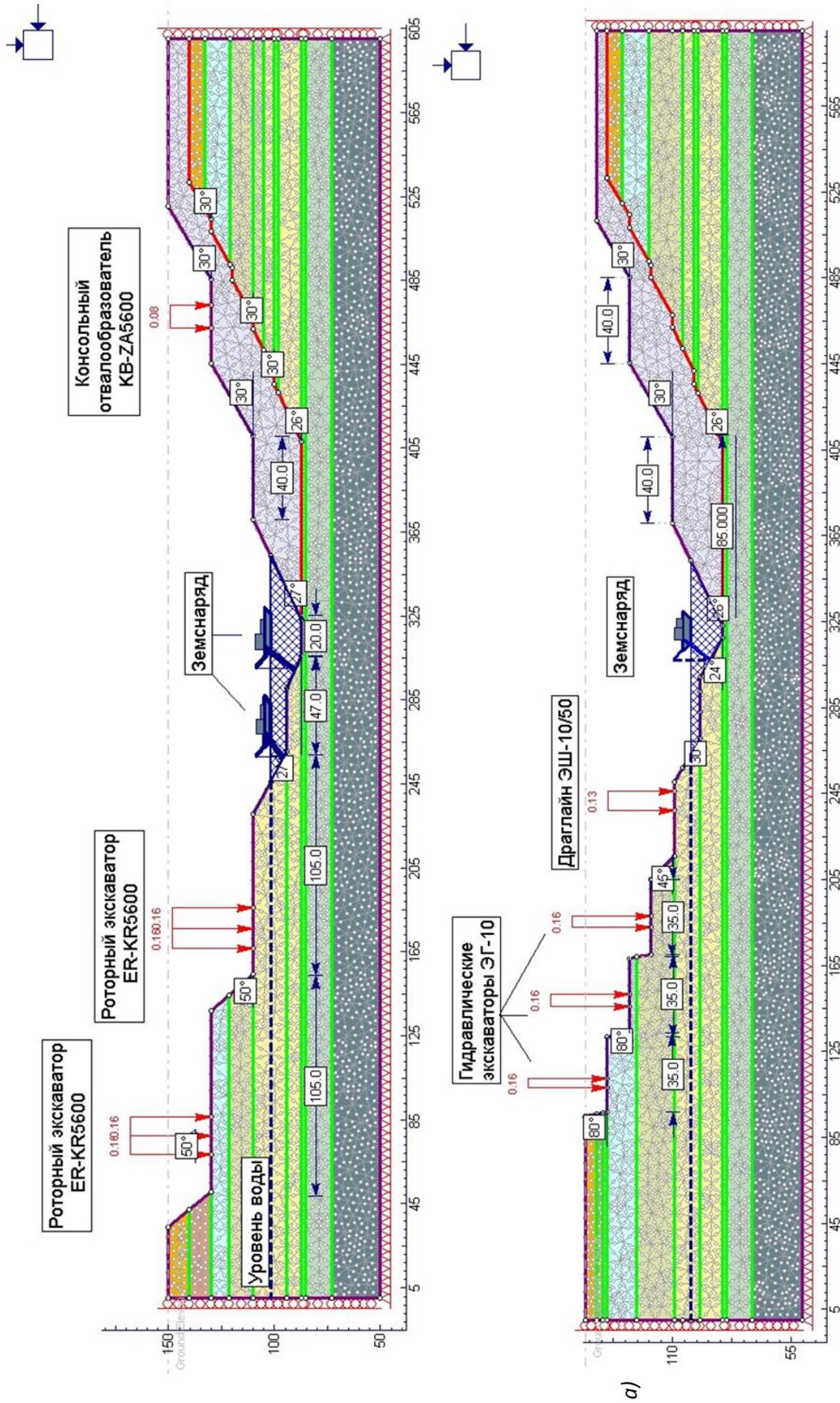


Рис. 2. Технологическая схема разработки Мотроновско-Анновской россыпи Мальшевского месторождения:
 а – роторными экскаваторами типа ЭР-5000 с консольными отвалообразователями (ОК);
 б – гидравлическими экскаваторами типа ЭГ-10 и драглайнами типа ЭШ-10/50

При такой схеме разработка надрудного и рудного уступов может производиться экскаваторами-драглайнами типа ЭШ-10/50, которые располагают на кровле уступа с погрузкой горных пород в автосамосвалы, а также комбинацией оборудования, при которой надрудный уступ разрабатывают драглайном с погрузкой в автотранспорт, а рудный уступ обрабатывается земснарядом в паре с гидромонитором и транспортировкой пород через пульпопровод непосредственно на обогатительную фабрику.

Технологическая схема, представленная на рис. 2, б отличается от схемы изображенной на рис. 2, а применением на вскрышных работах гидравлических экскаваторов типа ЭГ-10 с погрузкой горной массы в автосамосвалы и ее транспортированием во внешние отвалы. Обработка надрудного и рудного уступов идентичны схеме, представленной на рис. 2, а.

Отличительной особенностью обработки рудного пласта является его расположение ниже отметки уровня грунтовых вод, что предусматривает определенные особенности технологии его обработки [10].

Для экскаваторов, представленных в технологических схемах, усредненные показатели удельного давления на грунт составляют:

– для гидравлического экскаватора ЭГ-10 – 127-205 кПа при статических и динамических нагрузках;

– для шагающего экскаватора-драглайна ЭШ 10/50 – 82,84 кПа при статической работе и 133,2 кПа – при шагании;

– для роторного экскаватора ЭР-5000 – 140 кПа.

В данной работе в качестве инструмента моделирования устойчивости откосов и бортов карьеров использована специализированная программа конечно-элементного анализа *Phase2* версии 7.0. Программа позволяет выполнять анализ устойчивости откосов методом конечных элементов, анализируя процесс снижения предела прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction Method) в породном массиве. Функция снижения прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction) в *Phase2* позволяет автоматически выполнять конечно-элементный анализ и вычислять критический коэффициент снижения прочности КСП (SRF, Strength Reduction Factor) для выбранной модели, который по своему смыслу является эквивалентным коэффициенту запаса устойчивости откоса (КЗУ).

Алгоритм расчета коэффициента устойчивости массива включает итерационное вычисление прочностных характеристик во всех элементах массива посредством поэтапного нагружения модели, в результате чего напряжения в откосе достигают предела прочности на сдвиг и возникает сдвижение пород (оползень). Процесс вычислений КСП повторяется до момента потери откосом устойчивого состояния и КЗУ графически выражается в виде наиболее вероятной линии скольжения, по которой происходит сдвижение массива. Если $КЗУ > 1$, то откос находится в устойчивом состоянии, а при $КЗУ \leq 1$ возникают оползневые процессы.

Максимальные сдвиговые деформации в *Phase2* по следующему выражению:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}, \quad (1)$$

где ε_1 и ε_3 – наибольшие и наименьшие главные деформации, которые для плоской задачи соответствуют значениям наибольшего и наименьшего напряжений σ_1 и σ_3 .

Результаты исследования. Для двух возможных технологических схем разработки рассматриваемого Мотроновско-Анновской россыпи Малышевского месторождения выполнена оценка устойчивости бортов карьера.

На рис. 3, а представлены результаты моделирования устойчивости рабочего борта карьера для схемы с использованием роторных экскаваторов ЭР-5000 при разработке вскрышных пород. Согласно результатам численного моделирования для вышеописанной технологии ведения открытых горных работ и заданных физико-механических характеристик вмещающих пород рабочий борт карьера находится в неустойчивом состоянии ($KЗУ = 0,50$). Неустойчивость откосов уступов и развитие оползневых явлений связано, прежде всего, с высокой обводненностью месторождения до отм. +101,5 м, а также с деформационными процессами на контактах слоев водоупорных глин и рудных песков. Учитывая, что уровень воды находится на отм. +101,5 м, имеют место значительные смещения массива на двух вскрышных уступах. Максимальные сдвиговые деформации в откосе уступа с нижележащими рудоносными песками достигают значений $\varepsilon_{\max} = 1,4$, что обусловлено превалирующим действием горизонтальных напряжений массива и их ослабление в направлении выработанного пространства. Максимальные смещения массива в откосе рудного уступа достигают значений $U_x = 0,72$ м. Учитывая высокую обводненность рудных пластов, их разработку целесообразно выполнять земснарядами.

На рис. 3, б представлены результаты моделирования устойчивости рабочего борта карьера для схемы с использованием гидравлических экскаваторов ЭГ-10 и драглайнов ЭШ-10/50. При этой технологической схеме ведения открытых горных работ также имеют место обрушения откосов уступов и нарушение устойчивости рабочего борта ($KЗУ = 0,50$), что также обусловлено преимущественно гидрогеологическими факторами и геометрическими параметрами. Неустойчивость борта карьера обусловлена крутизной откосов вскрышных уступов (80°), однако в условиях динамического подвигания фронта вскрышных работ не является критическим фактором устойчивости. Однако, для надрудного и добычного уступов рабочие углы откосов составляют $30-45^\circ$, а при условии повышенной обводненности этих геологических горизонтов, откосы подвергаются значительным пластическим деформациям и оплывают. В таких условиях ведение добычных работ представляет проблему безопасности ведения работ. По мере углубления горных работ деформации приоткосного массива на уступах возрастают, что в действительности наблюдается на выбранных участках карьера.

Как отмечалось выше, подстилающие рудные пески каолины и синезеленые глины, являются водоупором и первопричиной геомеханических деформаций массива на добычных уступах. Тем не менее, динамические нагрузки от горного оборудования не оказывают существенного воздействия на устойчивость массива пород.

Согласно технологии ОГР угол откоса надрудного и добычного уступов принимаются 40–45°. Однако при естественной влажности каолинизированных песков до 18% и вследствие их замачивания от нижележащих грунтовых вод откосы подвергаются обрушению и оплыванию, при этом $KЗУ = 0,50$ (рис. 3,б).

Анализируя результаты оценки устойчивости борта карьера, представленные на рис. 3, а и 3, б, можно сделать вывод, что наиболее подвержены геомеханическим деформациям откосы уступов от горизонта +130 м до уровня грунтовых вод +101,5 м. Обводненность массива обусловлена эффектами замачивания вмещающих пород от уровня грунтовых вод, атмосферными осадками и паводками.

Используя результаты зависимостей физико-механических характеристик суглинков от степени их влажности [11], можно определить коэффициент запаса устойчивости откосов с учетом обводненности горного массива. Так, зависимость угла внутреннего трения φ от влажности суглинков описывается уравнением:

$$\varphi = -0,06W_0^2 + 0,12W_0 + 39,86, \text{ град.}, \quad (2)$$

где W_0 – влажность, %.

Зависимость сцепления пород в массиве C от влажности описывается уравнением:

$$C = 0,07W_0^2 - 3,87W_0 + 58,78, \text{ кПа.} \quad (3)$$

Согласно зависимостям 2 и 3 рассчитаны физико-механические свойства суглинков и глауконитовых песков сарматского яруса в условиях обводненного массива (рис. 4). Полученные значения принимаем в качестве исходных данных для моделирования устойчивости борта карьера.

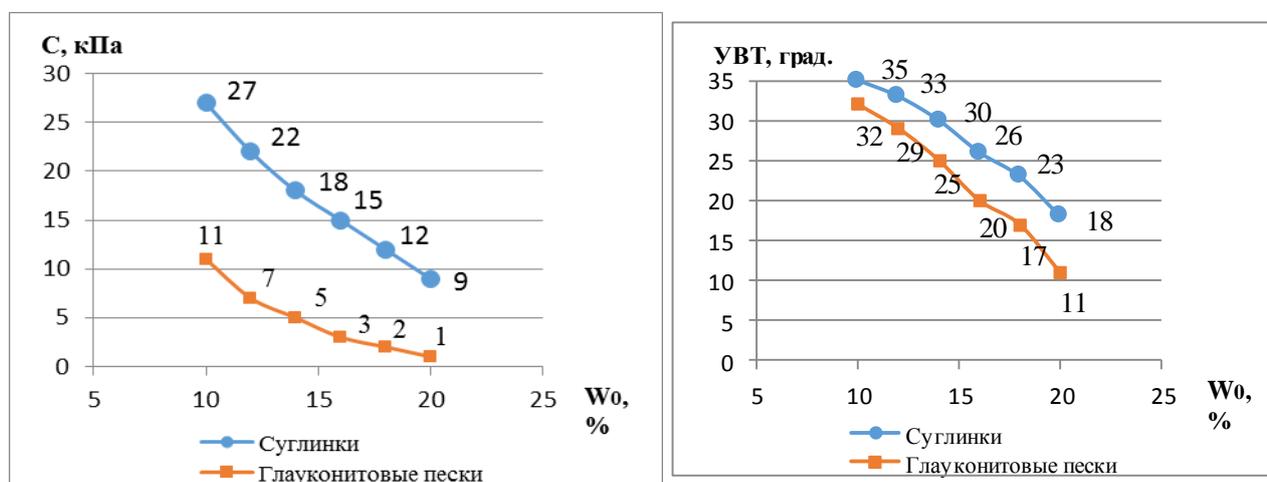


Рис. 4. Расчетные значения сцепления и угла внутреннего трения для суглинков и глауконитовых песков

Зависимость КЗУ борта карьера с учетом обводненности массива, представленная на рис. 5, имеет приблизительно линейный характер. При этом, прогнозируемое обрушение массива ($KЗУ = 1,0$) и развитие оползневых явлений возникает при $W_0 = 16 \%$.

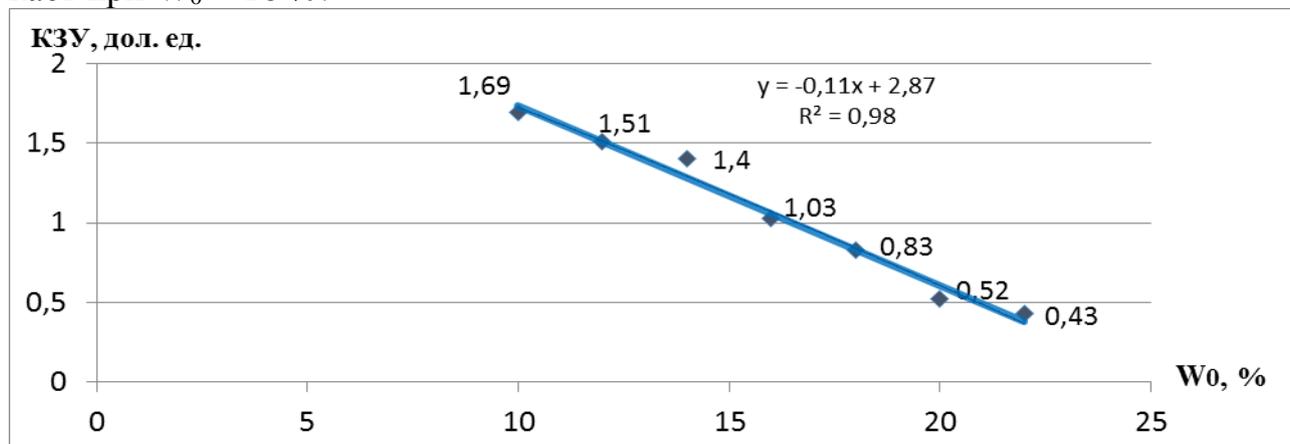


Рис. 5. Результаты расчета КЗУ борта карьера с учетом обводненности массива

Выводы. Обводненность массива пород является ключевым фактором неустойчивости откосов и бортов карьера.

В работе выполнена геомеханическая оценка устойчивости рабочего борта карьера с учетом сложной структуры, свойств пород и нагрузок от горнотранспортного оборудования. Согласно результатам расчета устойчивости рабочего борта карьера при использовании двух альтернативных технологических схем открытой разработки месторождения получены одинаковые значения $KЗУ=0,50$. Неустойчивость откосов уступов и развитие оползневых явлений связано с высокой обводненностью месторождения до отм. +101,5 м, а также с деформационными процессами на контактах слоев водоупорных глин и рудных песков.

На основании зависимостей физико-механических характеристик пород от степени их влажности определены значения КЗУ борта карьера с учетом обводненности горного массива. При этом, прогнозируемое обрушение массива ($KЗУ = 1,0$) и развитие оползневых явлений возникает при $W_0 = 16 \%$.

Полученные результаты оценки геомеханической устойчивости борта карьера могут быть использованы для обоснования параметров рабочей зоны в условиях повышенной обводненности массива горных пород.

Перечень ссылок

1. Resat Ulusay, Mehmet Ekmekci, Ergün Tuncay, Nilsun Hasancebi. Improvement of slope stability based on integrated geotechnical evaluations and hydrogeological conceptualisation at a lignite open pit // Engineering Geology. – Volume 181. – 1 October 2014. – P. 261 – 280.
2. Jean-Alain Fleurisson. Slope Design and Implementation in Open Pit Mines: Geological and Geomechanical Approach // Procedia Engineering. – Volume 46, 2012, P. 27 – 38.
3. Martin Grenon. Integrated structural stability analysis for preliminary open pit design // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – Volume 47. – Issue 3. – April 2010. – P. 450 – 460.
4. Martin Grenon, Amélie-Julie Laflamme. Slope orientation assessment for open-pit mines, using

- GIS-based algorithms // Computers & Geosciences. Volume 37. – Issue 9. – September 2011. – P. 1413 – 1424.
5. M.C. He, J.L. Feng, X.M. Sun. Stability evaluation and optimal excavated design of rock slope at Antaibao open pit coal mine, China // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – Volume 45. – Issue 3. – March 2008. – P. 289 – 302.
 6. V.K. Singh, B.D. Baliga. Slope design of an open pit copper mine // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. – Volume 31. – Issue 1. – February 1994. – P. 55 – 69.
 7. A.R Bye, F.G Bell. Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Volume 38. – Issue 3. – April 2001. – P. 449 – 466.
 8. Ракишев Б.Р. Оценка экономической целесообразности проведения мероприятий по контролю устойчивости откосов уступов на карьерах / Б.Р. Ракишев, К. Сейтулы, А.С. Ковров, А.Ю. Череп // Форум гірників – 2014. – Матеріали міжнародної конференції. 1-4 жовтня 2014 р. – Днепропетровск. – 2014. – Том 2. – С. 62 – 67.
 9. Череп А.Ю. Обоснование технологического обеспечения устойчивости обводненных бортов и отвалов карьера / А.Ю. Череп // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №8. – С. 170 – 176.
 10. Гайдін А.М. Розробка обводнених родовищ титанових руд: Монографія / А.М. Гайдін, Б.Ю. Собко, О.М. Лазніков. – Д.: «Літограф», 2016. – 212 с.
 11. Ковров О.С. Вплив складної геологічної структури та обводнення масиву порід на стійкість укосів кар'єрів / О.М. Шашенко, О.С. Ковров // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2011. – №3. – С. 63 – 68.

ABSTRACT

Purpose. To carry out geomechanical assessment of the slope stability at the Motronovsko-Annovsky open pit of the Malyshevskoe zircon-rutile-ilmenite placer deposit taking into consideration the complex geological structure, rock physical properties and loads of mining equipment.

The methods of the research is based on complex geological and hydrogeological field data, visual observation of the open pit slopes, analysis of technological schemes for the deposit development, and numerical simulation of the open pit edge stability in the finite element analysis software Phase2.

Findings. According to geotechnical analysis and slope stability geomechanical assessment for two considered technological schemes of the deposit development conducting open mining operations is very complicated. The safety factor for open slopes does not exceed 0.50. The instability of the slopes of the pit edge and development of landslide phenomena is primarily due to the high watering of the deposit, as well as to the deformation processes at the contacts of layers of water-resistant clays and ore sands.

Originality. A distinctive feature of the Motronovsko-Annovsky section of the Malyshevskoye ore-field deposit is its location below the groundwater level mark. Two alternative technological schemes for the field development are proposed: with rotary excavators and console spreaders; with hydraulic excavators and draglines.

Practical implications. Complex geomechanical and geotechnical analysis allowed justify rational technological schemes for mining operations with reference to complex hydrogeological conditions of the watered titanium-zirconium ore deposits and variable physical-mechanical properties.

Keywords: *open pit slope stability, landslide, safety factor, Mohr-Coulomb failure criterion*