МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО, ГЕОДЕЗИЯ И КАДАСТР

УДК 624.131.537; 624.131.524 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-42-56

Напряженно-деформированное состояние и устойчивость бортов карьера Унгличикан

Горшков Н. И.[1]*, Краснов М. А.[1], Жданова С. М.[2]
[1] Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия
[2] Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия
e-mail: fem_soft@mail.ru

Реферат

Цель статьи *– выявить особенности формирования напряженно-деформированного состояния и оценить устойчивость бортов карьера Унгличикан и откосов его отвалов на основе расчетов, анализа и оценок по сертифицированной программе метода конечных элементов GenIDE32.*

Во введении *приводится описание особенностей природно-техногенных условий местоположения объекта исследования и геологической истории слагающих его горных пород.*

Актуальность исследования *определяется сложностью решения проблем проектирования глубоких и высоких горных сооружений, необходимостью учета технологии их возведения, определения их напряженно-деформированного состояния, а также устойчивости их элементов.*

Методология *выполнения численных расчетов, анализа и оценок напряженно-деформированного состояния системы «сооружение–геосреда» заключается в использовании всех средств интерфейса программы: значений, уровней значений, изолиний и графиков различных величин, в том числе графиков траекторий изменения напряженно-деформированного состояния в пространстве инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций.*

Результаты *расчетов представлены как возможности программы в графическом показе последовательного формирования оползневых тел в бортах карьера и откосов отвалов с вертикальными трещинами. Окраска уровней значений величин фиксирует контуры оползневых тел, а соответствующая штриховка конечных элементов – места образования трещин.*

Выводы. *Результаты выполненных расчетов показали устойчивость горных сооружений для подобранных геометрических размеров элементов бортов карьера и откосов отвалов.*

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние; устойчивость; грунтовое сооружение; карьер; отвал; поверхность скольжения; метод конечных элементов.*

Природно-техногенные условия места расположения карьеров.

Природные особенности местоположения объекта исследования. Объект исследования – золоторудный карьер Унгличикан, расположенный в восточной части Амурской области (*Инженерно-геологические условия разработки Унгличиканского месторождения. 2017. 29 с.*). На рассматриваемой площади многолетняя мерзлота имеет островной и редкоостровной характер, мощность многолетнемерзлых пород варьирует от 17 до 145 см. Зоны сквозных таликов приурочены, как правило, к разрывным нарушениям.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой таежное среднегорье с абсолютными отметками 700–1087 м, расчлененное – массивно-грядовые горы с уплощенными широкими водоразделами, со склонами средней крутизны (10°–15°) и полого расчлененными на глубину 200–300 м трапециевидными долинами рек и ручьев.

В геолого-литологическом строении месторождения принимают участие палеозойские метаморфизованные вулканогенно-терригенные образования, представленные переслаивающейся толщей углеродистых слюдисто-кварцевых и серицит-хлорит-полевошпат-кварцевых сланцев златоустовской свиты (C_2zl), прорванные меловыми дайками андезитов.

Раздробленность массива пород обусловлена в основном тектоническими нарушениями различного порядка, проявляющимися в виде многочисленных субпараллельных и ветвящихся зон дробления и интенсивной трещиноватости. Степень дробления пород в ослабленных зонах различна. В зоне интенсивной трещиноватости порода разбита *сетью трещин на обломки размером от 2 × 2 × 2 до 15 × 10 × 7 см и более*. В зоне дробления порода состоит из щебенистого, щебенисто-глинистого материала с прослоями глинки трения мощностью от 1–2 до 5–10 см, реже до 15–50 см.

Степень нарушенности пород резко изменяется с глубиной. В пределах прибортового массива до глубины 40 м от поверхности земли степень распространенности пород, приуроченных к зонам дробления, изменяется от 0,0 до 17,1 %, составляя в среднем 3,3 %, а пород, приуроченных к зонам интенсивной трещиноватости, соответственно от 1,5 до 58,0 %, в среднем 23,8 %. Глубже 40 м распространенность пород зон дробления колеблется от 0,0 до 6,3 %, в среднем 2,7 %, распространенность пород зон интенсивной трещиноватости снижается до 1,3–18,4 %, при среднем значении 11,0 %.

В центральной части карьера в зоне оруденения до глубины 40 м распространенность пород зон дробления изменяется от 0,0 до 41,0 %, составляя в среднем 5,6 %. Породы зоны интенсивной трещиноватости распространены от 4,5 до 48,0 %, в среднем 27,3 %. Глубже 40 м распространенность пород зон дробления снижается до 0,0–10,2 %, в среднем до 3,3 %, распространенность пород зон интенсивной трещиноватости снижается до 1,8–29,8 %, в среднем до 14,3 %.

Трещины разнообразные по форме, преимущественно ступенчатые, меньше волнистые, реже плоские, преимущественно с шероховатой поверхностью, иногда с зеркалами скольжения, с углами наклона к оси керна 30°–60°, реже 10°–30° и 60°–90°. Среднее *расстояние между трещинами от 10 до 30 см, максимальное до 1,0 м*. По стенкам трещин развиты карбонитизация, окварцевание, сульфидизация в виде налета, пленок и корочек толщиной 1–3 мм. На участках, не нарушенных трещинами, модуль трещиноватости изменяется от 3 до 7 тр./м, что характеризует породы как слабо- и среднетрещиноватые.

По генезису выделяется три типа трещин: трещины отрыва, сланцеватости, скола.

Трещины отрыва представлены тремя системами, системы II и III являются сопряженными. По форме трещины волнистые, ступенчатые, сжатые и открытые, часто залеченные прожилками кварца мощностью 1–5 мм. По стенкам повсеместно отмечаются охры лимонита.

Наиболее широко среди трещин скола представлены трещины с азимутом простирания 250° и углом падения 65°, соответствующие залеганию тектонических нарушений зоны Унгличиканского разлома. Зоны дробления представляют собой дресвяно-щебнистые породы, связанные перетертым глинистым материалом, а также темно-серой глиной трения с малопрочной дресвой вмещающих пород. Мощность этих образований составляет *от первых сантиметров до 40–50 см*. Отдельность пород плитчатая и параллелепипедная, *блочность составляет от 2 × 5 × 10 до 60 × 80 × 150 см*.

Раздробленность пород в меньшей степени связана с выветриванием. В кровле скальные породы повсеместно выветрелые на глубину до 5,0–10,0 м.

Физико-механические параметры горных пород. Вмещающими породами на месторождении Унгличикан являются углеродисто-слюдисто-кварцевые сланцы златоустовской свиты, прорванные дайками андезитов. Рудные тела приурочены к брекчиям и метасоматитам.

Все породы участка умеренно и интенсивно метасоматически изменены, часто до серицит-кварцевых метасоматитов. Околорудные изменения проявлены процессами окварцевания, карбонитизации, альбитизации, сульфидизации. Вмещающие породы также умеренно катаклазированы.

По физико-механическим свойствам, в соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2011, на месторождении выделены следующие инженерно-геологические элементы (ИГЭ):

ИГЭ-1. Дресвяно-щебенистый грунт с супесчаным и суглинистым заполнителем делювиально-элювиального генезиса залегает практически повсеместно с поверхности слоем мощностью от 1,8 до 5,6 м. На отдельных участках вскрыт техногенный грунт, представленный щебенистым и глыбовым материалом, используемый в качестве подсыпки под станок слоем мощностью 0,6–2,5 м. На устойчивость бортов влияния оказывать не будет.

ИГЭ-2. Сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые серого, темно-серого цвета, с мелко- и микрозернистой структурой, линзовидно-слоистой, сланцеватой, полосчатой, местами плойчатой текстурой. Плотность изменяется от 2,44 до 2,75 г/см^3 и в среднем составляет 2,66 г/см^3. Предел прочности на одноосное сжатие в сухом состоянии изменяется от 23,0 до 59,9 МПа, в единичном случае 67,5 МПа, в среднем составляет 37,1 МПа, на растяжение – в среднем составляет 10,8 МПа, при водонасыщении прочность на сжатие изменяется от 21,5 до 49,5 МПа, в единичном случае 51,5 МПа, составляя в среднем 29,1 МПа, т. е. снижается на 21,5 %.

В соответствии с ГОСТ 25100-2011 сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые классифицируются как средней прочности, очень плотные, неразмягчаемые, слабовыветрелые. Сланцы относятся к III категории пород по устойчивости.

ИГЭ-3. Сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые окварцованные серого цвета, мелко- и микрозернистой структуры, линзовидно-слоистой, сланцеватой, местами плойчатой текстуры. Плотность изменяется от 2,61 до 2,75 г/см^3, в среднем составляет 2,70 г/см^3. Прочность окварцованных сланцев выше на 13–15 % прочности сланцев ИГЭ-2. Предел прочности на одноосное сжатие в сухом состоянии изменяется от 26,4 до 53,0 МПа, в единичном случае 73,0 МПа, в среднем составляет 44,3 МПа, в водонасыщенном состоянии снижается до 18,6–45,7 МПа, в единичном случае 67,8 МПа, при среднем значении 38,5 МПа. Прочность на растяжение в сухом состоянии в среднем составляет 15,2 МПа, в водонасыщенном состоянии 12,6 МПа.

В соответствии с ГОСТ 25100-2011 сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые окварцованные классифицируются как средней прочности, очень плотные, неразмягчаемые, слабовыветрелые. Сланцы относятся к III категории пород по устойчивости.

ИГЭ-4. Андезит зеленовато-серый встречается в виде отдельных даек. Структура тонкозернистая. Текстура массивная. Объемная масса изменяется от 2,48 до 2,76 г/см^3, в среднем составляет 2,59 г/см^3. Предел прочности на одноосное сжатие в сухом состоянии изменяется от 38,6 до 82,6 МПа, при среднем значении 61,1 МПа, в водонасыщенном состоянии снижается до 24,1–47,8 МПа, при среднем значении 40,4 МПа (снижается на 34 %). Прочность на растяжение в сухом состоянии в среднем составляет 14,3 МПа, в водонасыщенном состоянии 10,6 МПа.

В соответствии с ГОСТ 25100-2011 андезит классифицируется как средней прочности, размягчаемый, плотный, средневыветрелый, среднепористый. Андезит отнесен ко II категории пород по устойчивости.

ИГЭ-5. Брекчия по андезитам тектоническая и брекчия по сланцам на карбонатном цементе близки по физико-механическим свойствам: средней прочности, размягчаемые, плотные, объединены в один инженерно-геологический элемент. Брекчия состоит из обломков пород, развитых на участках. Цемент – кварц-карбонатный или перетертая исходная порода. Прочность брекчии определяется видом и состоянием цемента. Брекчия отнесена к IV категории пород по устойчивости.

ИГЭ-6. Зона интенсивной трещиноватости представлена *крупнообломочным материалом*, размер обломков от 2 до 60 мм и крупнее. Обломочный материал пониженной прочности, сильновыветрелый представлен сланцами, метасоматитами, андезитами. Порода зоны отнесена к IV категории по устойчивости.

ИГЭ-7. Зона дробления представлена также *крупнообломочным материалом* с обломками размером от 2 до 60 мм. В отличие от материала зоны трещиноватости увеличивается содержание фракции размером менее 2 мм до 14 %. Наблюдаются прослойки глинистого материала (глинка трения). Обломочный материал пониженной прочности, сильновыветрелый, представлен сланцами, метасоматитами, андезитами. Порода зоны отнесена к IV категории по устойчивости.

ИГЭ-6 и ИГЭ-7 приурочены к зонам тектонических нарушений и образовались в результате сдвижек массива по этим зонам. При определенных условиях залегания могут служить зеркалами скольжения массива.

Гидрологические и геокриологические условия места строительства карьера. Район работ входит в Джагдинский криогенный гидрогеологический массив Амуро-Охотской гидрогеологической складчатой области.

В зависимости от литологического состава водовмещающих пород и условий залегания в них выделяются:

– пластово-поровые воды аллювиальных образований, развитые в поймах и надпойменных террасах ручьев Ягодный, Унгличикан, Березовый, Крещенский;

– пластово-поровые воды элювиально-делювиальных образований, получившие широкое площадное распространение на склонах сопок в глыбово-щебневых валунных образованиях;

– трещинные и трещинно-жильные воды, приуроченные к зонам интенсивной трещиноватости и дробления метаморфизованных сланцев златоустовской свиты.

На участке месторождения многолетняя мерзлота имеет островной (прерывистый) характер. Для площади характерно сезонное промерзание и оттаивание грунтов, а также широкое распространение склоновых и русловых наледей. Большая часть площади проектного карьера свободна от мерзлоты или имеет мерзлые породы небольшой мощности (0–70 м). Иногда распространение мерзлоты может носить временный характер, в отдельные годы отсутствует («перелетки»). Зоны сквозных таликов приурочены, как правило, к разрывным нарушениям и русловым участкам речных долин.

На площадке месторождения наблюдаются различные мерзлотные условия. В западной части, за пределами проектируемого карьера, многолетнемерзлые породы распространены в интервале глубин от 5 до 110–120 м (скважина У-4). В северо-восточной части (скважина У-5) многолетнемерзлые породы не зафиксированы. В юго-восточной части многолетнемерзлые породы зафиксированы на глубине 30–65 м, так называемый «перелеток», который зависит от температурных условий местности.

В зимнее время в таликовых зонах локализуются очаги разгрузки подземных вод и образуются наледи. Непосредственно в районе проектируемого карьера мощность многолетнемерзлых пород варьируется в пределах 0–70 м.

Геологические процессы и явления. В соответствии со СНиП 11-105-97 по совокупности факторов инженерно-геологические условия следует отнести к

III (сложной) категории. Определяющими факторами являются геоморфологические и геологические условия, зависящие от сильно расчлененного рельефа, наличия разломов и тектонических зон, повышенной сейсмической интенсивности.

Одна из важнейших задач оценки инженерно-геологических условий разработки месторождения – прогнозирование возникновения инженерно-геологических процессов и явлений, осложняющих условия эксплуатации карьера открытым способом.

В процессе разработки карьера возможны проявления следующих геологических процессов и явлений, осложняющих его разработку, имеющие место на разрабатываемом карьере месторождения Албын: наледеобразования, оползни, обвалы, осыпи. По геолого-литологическим и структурно-тектоническим особенностям, а также физико-географическим условиям месторождение Унгличикан аналогично месторождению Албын.

Обвалы и осыпи возникают в основном в результате подрезки склонов и вырубки древесной растительности. Обвалы и осыпи большой мощности неизбежны при вскрытии зон интенсивной трещиноватости и дробления, имеющих мощность более 20 м.

Осыпи формируются в подошве откоса бортов карьера на участках, сложенных элювиальными крупнообломочными разностями, в местах выхода на поверхность выветрелых, сильно трещиноватых сланцев, а также тектонических зон дресвяно-щебенистого состава.

Наледеобразование – процесс образования наледей в зимний период на участках разгрузки подземных вод и послойного их замерзания.

С целью снижения возможных последствий техногенного воздействия необходимо предусмотреть перехват и организацию поверхностного стока, планировку склонов с учетом их оползне- и обвалоопасности, а также устройство дренажа на обводненных участках.

Месторождение Унгличикан расположено в Селемджино-Кербинском блоке Амуро-Охотской геосинклинальной области, характеризующейся *повышенной сейсмичностью*.

Согласно плану *Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР2016* расчетная сейсмическая интенсивность площадки месторождения для средних грунтовых условий (*СП 14.13330.2014*), по картам ОСР-97 А и В определена в 7 баллов, по карте С – в 8 баллов.

Борта карьеров будут сложены сланцами различного состава, частично метасоматически измененными, относящимися к классу слабовыветрелых скальных грунтов средней прочности.

Основные выводы. В целом, горнотехнические и инженерно-геологические условия приемлемы для разработки открытым способом. Это обуславливается следующими особенностями:

– отдельные рудные тела имеют непосредственный выход на дневную поверхность;

– преобладание в строении месторождения скальных пород, что позволяет использовать тяжелую горную технику независимо от сезона;

– породы, вскрываемые при разработке месторождения, не газоносны, не склонны к самовозгоранию, радиоактивность не превышает естественной нормы; экологически вредные, токсичные примеси в рудах отсутствуют.

Осложняющими факторами являются:

– неравномерное распределение полезного ископаемого в пределах контура карьера;

– приуроченность месторождения к скальным породам с наклонным и крутым залеганием;

– наличие зон интенсивной трещиноватости и зон дробления;

– наличие в разрезе протяженных, соизмеримых с размерами карьеров, зон повышенной трещиноватости и зон дробления (*представленных дресвяными разностями*), *существенно влияющих на устойчивость бортов*;

– наличие грунтов разной прочности, плотности и степени размягчаемости в воде в пределах одной литологической разности;

– *наличие трещинных вод на участках, приуроченных к зонам дробления*, что способствует увеличению степени водопроводимости пород и в конечном итоге *влияет на снижение устойчивости бортов карьера на таких участках массива*;

– процесс промерзания и оттаивания совместно с техногенной трещиноватостью, возникающей в ходе горных работ, будут способствовать большему дроблению пород и увеличению их проницаемости.

Таблица 1. Расчетные значения параметров горных пород бортов карьера и откосов отвалов

Table 1. Parameter design values for the rocks building up open pit walls and dumps slopes

ИГЭ и наименование грунта	γ_i, кН/м^3	E, МПа	ν	φ_i (R_c), град (МПа)	C_i (R_t), кПа (МПа)
ИГЭ-1. Дресвяно-щебенистый грунт с супесчаным и суглинистым заполнителем делювиально-элювиального генезиса	18,0	35,0	0,27	33,0	8,0
ИГЭ-2. Сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые	26,6	5000,0	0,14	32,7 (29,1)	195,0 (8,7)
ИГЭ-3. Сланцы слюдистые кварц-полевошпатовые окварцованные	27,0	5500,0	0,55	30,7 (38,5)	284,0 (12,6)
ИГЭ-4. Андезит	25,9	510,0	0,22	35,8 (40,4)	– (10,6)
ИГЭ-5. Брекчия	25,4	270,0	0,35	32,4 (30,1)	– (9,1)
ИГЭ-6. Дресвяно-щебенистый (отвал)	20,0	50,0	0,27	30,0	20,0

γ_i – удельный вес горной породы; E – модуль деформации или упругости; ν – коэффициент относительного поперечного расширения (Пуассона); φ_i (R_c) – угол внутреннего трения (предел прочности на одноосное сжатие); C_i (R_t) – удельное сцепление (предел прочности на одноосное растяжение).

Особенности моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы «сооружение–геосреда».

Состояние вопроса по особенностям проектирования грунтовых сооружений (карьеров и отвалов). Основной проблемой проектирования карьеров и отвалов, как, впрочем, и других инженерных сооружений, является малый объем необходимой геотехнической информации. На весь объем горнотехнических выработок с их информацией о свойствах горных пород как потенциальных полезных ископаемых приходится всего несколько инженерно-геологических выработок (скважин) с информацией о физико-механических свойствах горных пород. Полученные по ним данные необходимо экстраполировать на весь массив горных пород, вмещающих карьеры и отвалы. Расчеты, выполняемые при проектировании инженерных сооружений, включая горные, имеют большую степень неопределенности. Как от-

мечено в статье [1], несмотря на это, аварии системы *сооружение–основание* чрезвычайно редки, что говорит о малой чувствительности (робастности) этой системы к таким неопределенностям.

Построение расчетной схемы модели системы. Геомеханические модели системы создавались на основе разработанной методики анализа и оценки НДС элементов системы *сооружение–геосреда*, основные принципы которой изложены в статьях [2–4]. В качестве средства расчета НДС элементов системы и ее устойчивости принят метод конечных элементов (МКЭ). На его основе разработаны алгоритмы сертифицированного программного продукта GenIDE32 (*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011613111. Расчет взаимодействия сооружений с геосредой методом конечных элементов. Авторы Горшков Н. И., Краснов М. А. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 апреля 2011 года*).

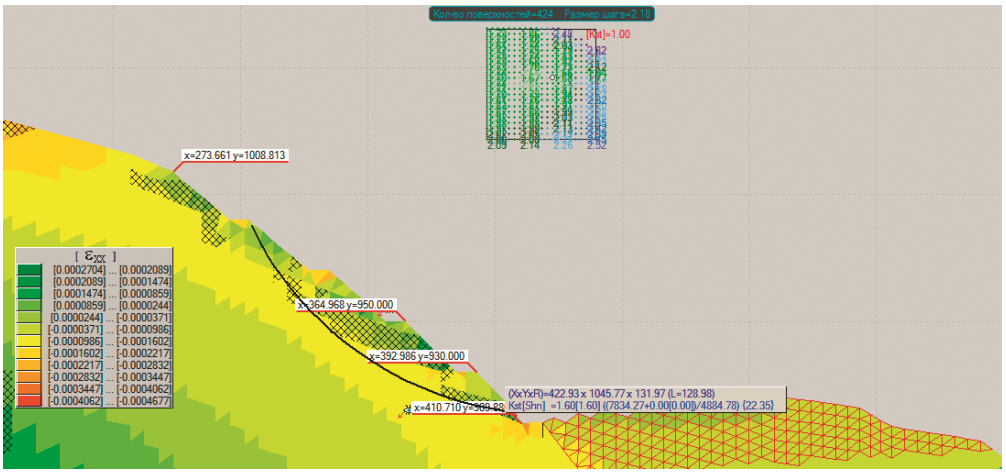


Рисунок 1. Уровни значений горизонтальных относительных деформаций ε_{xx}, зоны *пластичности* и условие устойчивости до моделирования экскавации 5-го слоя: $k_{st\ \min} = 1{,}60 > [k_{st}] = 1{,}20$

Figure 1. Levels of horizontal relative strains ε_{xx} values, zones of *plasticity*, and stability condition before modeling the fifth layer excavation: $k_{st\ \min} = 1.60 > [k_{st}] = 1.20$

Значения деформационных и прочностных параметров природных горных пород, материалов элементов системы приняты по документам, представленным в отчете (*Инженерно-геологические условия разработки Унгличиканского месторождения. 2017. 29 с.*), табл. 1. Значения параметров, которые не определялись в отчете (*Инженерно-геологические условия разработки Унгличиканского месторождения. 2017. 29 с.*), взяты из [5, 6], (*Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. Л.: ВНИМИ, 1965. 164 с.*).

Наиболее проблематичным являлся выбор расчетных значений удельного сцепления для скальных грунтов ИГЭ.

Значение удельного сцепления грунтов в массиве $C_м$ может быть вычислено по формуле:

$$C_м = \frac{C_о}{\left[1 + a \cdot \ln\left(H / l\right)\right]}, \qquad (1)$$

где $C_о$ – значение удельного сцепления грунта в образце (*Методические указания по определению углов*…, табл. 10); *a* – значение коэффициента, зависящего от проч-

ности грунта в монолитном образце (по таблице a = 6); H – высота борта (по разнице отметок на разрезе 312 м); l – средний размер блоков (п. 1.2 отчета: «блочность составляет от 2 × 5 × 10 до 60 × 80 × 150 см», принято 0,40 м).

Расчет $C_м$ = 0,195 МПа по формуле (1) произведен для значений удельных сцеплений образцов горных пород в водонасыщенном состоянии. Это наиболее опасный случай при оценке устойчивости бортов карьеров.

В расчетных схемах разрезов карьеров приняты расчетные значения параметров грунтов ИГЭ № 2 для карьера БП 66 и ИГЭ № 3 для карьера БП 120.

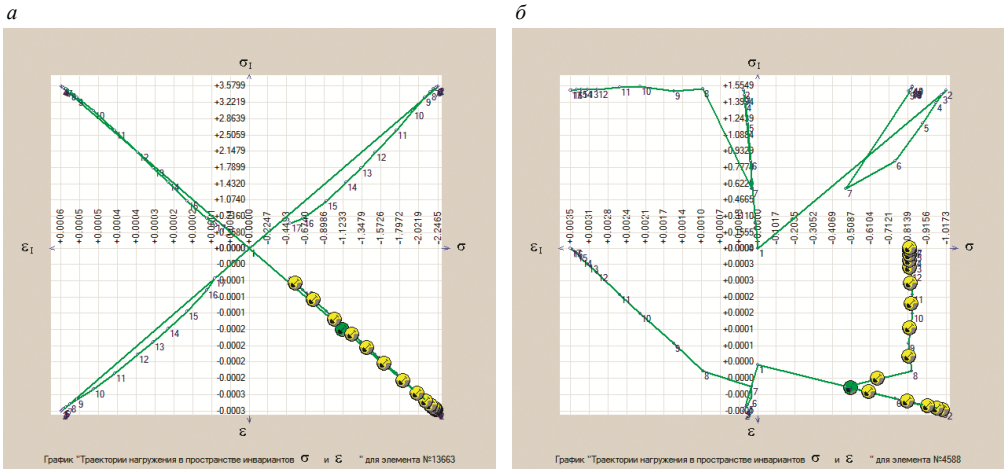


Рисунок 2. Графики траекторий в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} в КЭ:
а – подножия левого борта; *б* – подножия 7-го уступа левого борта
Figure 2. Graphs of trajectories in the space of stress tensor invariants σ_{ij} and relative strains ε_{ij} in the FE:
а – the foot of the left side; *б* – the foot of the 7th bench of the left side

Расчетное значение удельного сцепления в массиве для ИГЭ № 3, вычисленное по формуле (1): $C_м$ = 0,284 МПа. Параметры, входящие в формулу (1): $C_о$ = 11 МПа; H = 215 м; a = 6; l = 0,50 м.

В расчетных схемах отвала для его основания приняты расчетные значения параметров грунтов ИГЭ № 2, а для грунтов отвала расчетные значения параметров из табл. 1.

Организация и особенности вычислительного процесса. В расчетах НДС систем была принята нелинейная модель грунта на основе ассоциированного закона пластического течения с условием текучести по Кулону–Мору [7]. В этой модели, широко применяемой в расчетах грунтовых оснований и массивов горных пород с середины 1970-х гг., используются всего четыре стандартных параметра: E – модуль упругости (деформации), ν – коэффициент Пуассона, C – удельное сцепление, φ – угол внутреннего трения. Они определяются при испытаниях горных пород в стандартных геотехнических приборах.

Эта модель удовлетворительно предсказывает несущую способность оснований инженерных сооружений, а также их устойчивость.

Во всех расчетах учитывалась последовательность строительства сооружения. На каждом этапе моделирования устройства элемента сооружения (уменьшение расчетной области – «экскавация» или ее увеличение – «насыпь») для выполнения условий неразрывности деформаций на границах контакта «нового» элемента с основанием и(или) «старым» элементом вводились компенсационные силы.

На каждом этапе моделирования средствами интерфейса компьютера выполнялись анализ и оценка прочности, несущей способности, устойчивости и деформируемости каждого элемента модели системы и всей системы в целом.

При оценке устойчивости системы от действия сил гравитации вычисление коэффициента запаса устойчивости k_{st} выполнялось по линиям скольжения круглоцилиндрической или произвольной форм с использованием варианта «предельных касательных напряжений»: $k_{st} = \tau_u / \tau$ [8]. В расчетах устойчивости на действие гравитационных и сейсмических сил использовался вариант Г. М. Шахунянца [9].

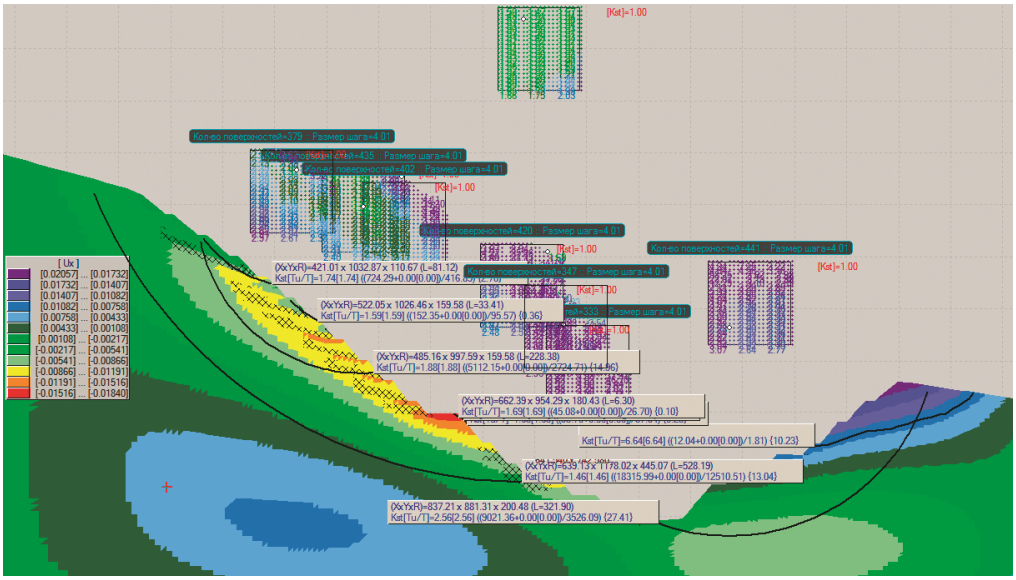


Рисунок 3. Оценка устойчивости бортов карьера (действие объемных сил гравитации) после последнего этапа экскавации; уровни значений горизонтальной компоненты вектора смещений u_x, м (от начального НДС)

Figure 3. Open pit walls stability analysis (the effect of volumetric gravity forces) after the last stage of excavation; value levels of displacement vector horizontal component u_x, m (from the initial stress-strain state)

В расчетах, согласно утверждению заказчика, принято нормированное значение коэффициента запаса устойчивости $[k_{st}] = 1{,}20$, при учете сейсмики $[k_{st}] = 1{,}10$.

Критериальные оценки НДС элементов модели системы. Анализ НДС элементов системы выполнялся на основе теоретических положений литературы [10–14] и всех имеющихся средств интерфейса программного средства GenIDE32: изолиний, уровней, эпюр значений вычисляемых величин, а также результатов мониторинга вычисляемых величин в значимых конечных элементах и узлах (пользовательские графики).

Критериальные оценки для сооружения и его элементов выполнялись на основе условий действующих нормативных документов.

Оценка элементов сооружения по первому предельному состоянию – по прочности и несущей способности – производится по стандартной формуле (*СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* / МРР РФ. М.: Минрегион России, 2016. 220 с.*):

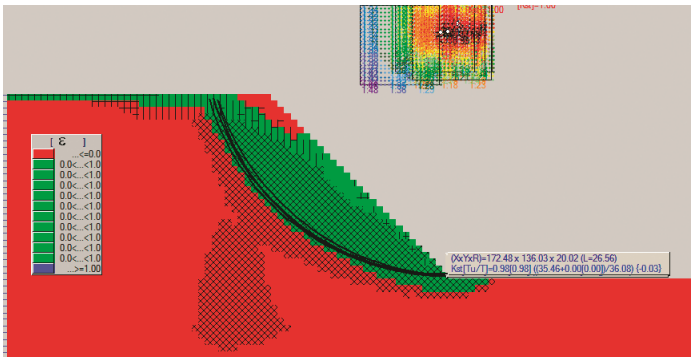
$$\gamma_{\text{lc}} F \le \left(\gamma_{\text{c}} F_u \gamma_{\text{cl}}\right) / \gamma_n, \qquad (2)$$

где F – обобщенное силовое воздействие (расчетные значения усилий, моментов, напряжений и т. п.); F_u – обобщенная несущая способность (значения усилий,

моментов, напряжений, условий прочности или других параметров, устанавливаемых нормами проектирования); γ_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок; γ_c – коэффициент условий работы; γ_{cl} – дополнительный коэффициент условий работы; γ_n – коэффициент надежности сооружения.

Оценка устойчивости модели системы выполняется по известному условию (*СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Актуализированная редакция СНиП 22.02-2003. М.: ОАО ЦПП, 2012. 30 с.*): $k_{st} \geq [k_{st}]$, где k_{st} и $[k_{st}]$ – расчетное и нормированное (допускаемое) значения коэффициента запаса устойчивости.

а



б

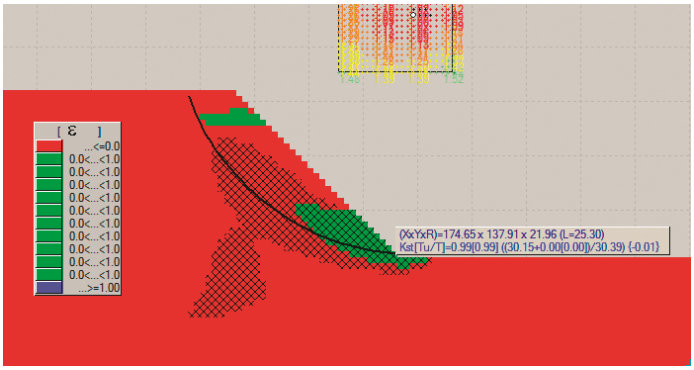


Рисунок 4. Зоны *пластичности* и уровни значений шарового инварианта тензора относительных деформаций ε для систем:
а – выемка–геосреда; б – насыпь–геосреда

Figure 4. Zones of *plasticity* and value levels of the spherical tensor invariant of relative strains ε for systems:
а – cut-geologic environment; б – fill-geologic environment

Анализ и оценка НДС элементов системы «сооружение–геосреда».

Результаты решения для модели системы «карьер–геосреда» на БП 88. Геометрические размеры карьера (заложение бортов) определялись методом последовательных приближений на основе расчетов НДС системы *карьер–геосреда*. В каждом определении сначала выполнялись расчеты начального напряженно-деформированного состояния массива горных пород. По значениям уровня вида деформированного состояния (Надаи–Лоде) ε_v массив горных пород в целом находился в состоянии одноосного сжатия: $\varepsilon_v \approx -1$, нижняя приповерхностная его часть – в состоянии чистого сдвига: $\varepsilon_v \approx 0$.

Далее выполнялось послойное моделирование экскавации горных пород из карьера (рис. 1). При решении задачи на экране компьютера появляются зоны

пластичности–сжатия (одноосное сжатие со сдвигом и наоборот – заштрихованные под углом крестообразно конечные элементы) или зоны *пластичности–растяжения* (заштрихованные вертикально или горизонтально, а также вертикально и горизонтально конечные элементы). Зоны *пластичности* – это зоны предельного состояния.

При экскавации верхняя часть обнаженного левого борта карьера частично приходит в предельное состояние (рис. 1).

На каждом этапе экскавации осуществляется поиск линии скольжения с $k_{st\ \min}$. На рис. 1 представлено поле поиска с количеством линий скольжения (424 шт.) и размерами шага между центрами дуг линий скольжения (2,18 м).

Здесь необходимо отметить, что при моделировании экскавации горных пород из массива в правом нижнем борту карьера зон *пластичности* не возникало.

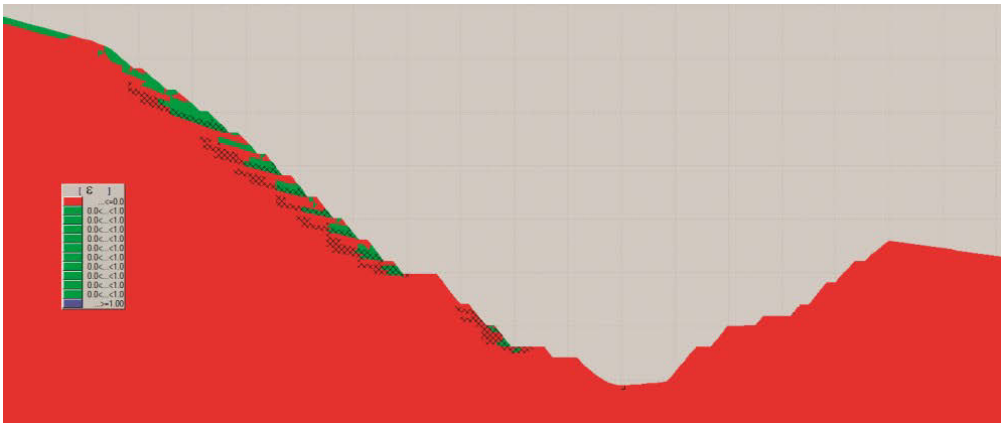


Рисунок 5. Карьер БП 88: зоны *пластичности* и уровни значений шарового инварианта тензора относительных объемных деформаций ε

Figure 5. BP 88 open pit: zones of *plasticity* and value levels of the spherical tensor invariant of relative volumetric strains ε

Интерфейс программы позволяет выводить на экран компьютера поля вектора смещений u_i в виде трех результатов текущего расчета: «абсолютный»; «от начального НДС»; «между этапами изменения» расчетной схемы, как по технологии (экскавации), так и по приложенным нагрузкам. Это позволяет видеть слабоизученное в геомеханике движение кругов «вращения» в массиве горных пород [4, 15].

Изменение НДС элементов системы анализировалось и в мониторинговых конечных элементах и узлах, расположенных на линиях скольжения с $k_{st\ \min}$. Анализ НДС выполнялся на основе графиков траекторий нагружения в пространстве инвариантов тензора напряжений σ_{ij} и относительных деформаций ε_{ij} [3, 4].

На рис. 2 показаны такие графики. В пространстве вторых инвариантов тензора напряжений и относительных деформаций σ_i–ε_i отображаются деформации формы или сдвига, в пространстве первых инвариантов этих тензоров σ–ε отображаются деформации объема. На рис. 2, *а* все траектории разгрузочные, в первую очередь в пространстве σ_i–σ, а деформации формы и объема упругие. На рис. 2, *б* на графиках для приповерхностного конечного элемента (КЭ), расположенного в средней части борта (У = 870 м), характерны более сложные деформации. В пространстве σ_i–σ грунт испытывает сложные траектории гистерезисного типа *нагрузка–разгрузка*, а в пространстве σ_i–ε_i видна значительная по размеру площадка сдвига. Именно в горных породах средней части борта и выше возникли зоны *пластичности*.

На рис. 3 приведены результаты расчета устойчивости после последнего 14-го этапа экскавации. Все условия устойчивости на действие объемных *сил гра-*

витации на линиях скольжения с $k_{st\,\min}$ выполняются: $k_{st\,\min}$ = 1,46–1,88 ≥ [k_{st}] = 1,20 (левый борт) и $k_{st\,\min}$ = 2,56 ≥ [k_{st}] = 1,20 (правый борт).

Для демонстрации возможностей программы, на рис. 4 представлены результаты исследования НДС и устойчивости выемки (d_u = 15,4 м; 1 : m = 1 : 1) и насыпи (h = 15,4 м; 1 : m = 1 : 1), имеющих одинаковые геометрические размеры и значения параметров деформируемости и прочности. Проводилось послойное их моделирование: h_i = 1,05 м. В выемке горные породы борта пришли в предельное состояние по устойчивости при глубине d_u = 15,4 м с образованием вертикальных трещин, что является одним из признаков окончания образования оползневого тела,

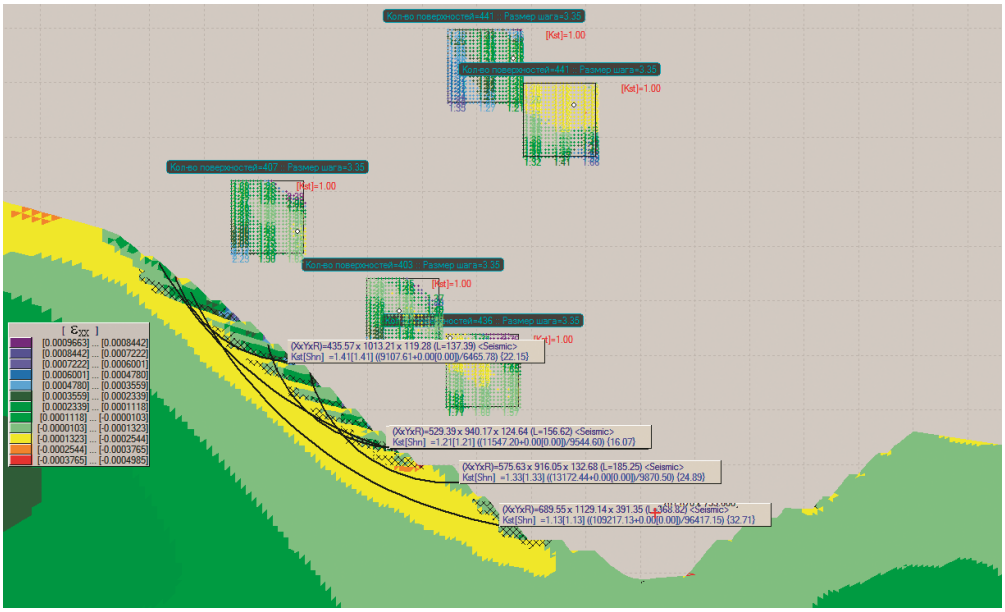


Рисунок 6. Оценка устойчивости левого борта карьера (действие сил гравитации и сейсмика) после последнего этапа экскавации; уровни значений горизонтальной компоненты тензора относительных деформаций ε_{xx}

Figure 6. Open pit left wall stability analysis (action of gravity and seismic forces) after the last stage of excavation; values levels of relative strains tensor horizontal component ε_{xx}

$k_{st\,\min}$ = 0,98. При высоте насыпи h = 15,4 м большая часть горных пород ее откоса перешла в предельное состояние, но без образования вертикальных трещин. Оползневое тело в насыпи полностью проявилось только при высоте насыпи h_u = 19,80 м. В верхней части массива насыпи, за бровкой откоса, появились вертикальные трещины. Контуры призм оползания хорошо проявляют себя при выводе на экран компьютера уровней значений средней относительной объемной деформации ε. Вывод на экран расчетной схемы в двух цветах значений этой величины (ε ≤ 0 – красная или более темная окраска, ε > 0 – зеленая или более светлая окраска) фиксирует контуры оползневого тела, рис. 4, *а*. Логично, что линии скольжения с $k_{st\,\min}$ проходят вблизи границ, где объемные деформации равны нулю: ε = 0.

Для задачи с карьером Унгличикан на рис. 5 видны зародыши оползневых тел, образовавшихся в массиве пород левого борта. В массиве правого борта их нет. Результаты расчета указывают, что имеет смысл иногда устраивать на поверхности борта более широкие бермы с целью прерывания образования зон *пластичности*.

Результаты расчетов показали, что на расчетной схеме карьера БП 88 не возникают зоны *пластичности–растяжения*, там нет мест с вертикальной штриховкой.

Из результатов расчетов становится ясно, что начало круглоцилиндрической линии скольжения с $k_{st\,\min}$, как и некруглоцилиндрической, почти всегда совпадает с нулем значений величины ε_v или максимумами значений на эпюрах выводимых величин относительных смещений: ε_{xx}, ε_{yy} и др. Эпюры строятся в узлах или в КЭ на поверхности массива. По теории механики разрушения при $\varepsilon_v \approx 0$ (параметр вида деформированного состояния) в этом месте могут образоваться вертикальные трещины за счет чистого сдвига, а не растяжения.

Здесь можно отметить, что возникновение вертикальных трещин уменьшает площадь зон *пластичности* и повышает значение коэффициента запаса устойчивости бортов на сотые доли k_{st}.

Кроме того, при расчетах по разрезу БП 88 выполнена оценка устойчивости грунта бортов карьера на действие сил *гравитации и сейсмики* (коэффициент сейсмичности $k_c = 0{,}02$ при 8 баллах). Результаты расчетов показали, что условия устойчивости при таких воздействиях также удовлетворяются (рис. 6).

Заключение. Результаты исследований НДС и устойчивости горных сооружений месторождения Унгличикан имеют следующий вид.

В сечении БП 88 карьера условия устойчивости удовлетворяются на действие сил гравитации: $k_{st\,\min} = 1{,}46–1{,}88 \geq [k_{st}] = 1{,}20$ (левый борт) и $k_{st\,\min} = 2{,}56 \geq [k_{st}] = 1{,}20$ (правый борт), а также на действие сил гравитации и сейсмических воздействий: $k_{st\,\min} = 1{,}13–1{,}41 \geq [k_{st}] = 1{,}10$ (левый борт).

В сечении БП 120 карьера условия устойчивости удовлетворяются на действие сил гравитации: $k_{st\,\min} = 1{,}73–1{,}87 \geq [k_{st}] = 1{,}20$ (левый борт) и $k_{st\,\min} = 2{,}15 \geq [k_{st}] = 1{,}20$ (правый борт), а также на действие сил гравитации и сейсмических воздействий $k_{st\,\min} = 1{,}18–1{,}45 \geq [k_{st}] = 1{,}10$ (левый борт) и $k_{st\,\min} = 2{,}15 \geq [k_{st}] = 1{,}10$ (правый борт).

В сечении отвала условия устойчивости на действие сил гравитации $k_{st\,\min} = 1{,}25–1{,}58 \geq [k_{st}] = 1{,}20$ (правый откос) и сил гравитации и сейсмических воздействий $k_{st\,\min} = 1{,}19–1{,}39 \geq [k_{st}] = 1{,}10$ (правый откос) удовлетворяются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барвашов В. А. Решение «смешанной задачи» и учет влияния разрушения грунта под краями фундамента на поведение сооружения // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 2. С. 2–5.

2. Горшков Н. И., Краснов М. А. Сравнительная оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых сооружений (выемки и насыпи) на основе МКЭ // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5. С. 4–11.

3. Горшков Н. И., Краснов М. А. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость бортов карьера на основе расчетов МКЭ (плоская и осесимметричная задачи) // Горный журнал. 2014. № 5. С. 37–44.

4. Горшков Н. И., Краснов М. А., Юань Ц., Жданова С. М. Особенности напряженно-деформированного состояния систем «выемка–геосреда» и «насыпь–геосреда» в процессе моделирования их возведения // Транспортные сооружения. 2020. № 2. URL: https://t.-s./today/PDF/11SATS220.pdf. DOI: 10.15862/11SATS220

5. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород / М. М. Протодьяконов [и др.]. М.: Недра, 1981. 192 с.

6. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов [и др.]. М.: Недра, 1979. 269 с.

7. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.

8. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов: пер. с англ. В. С. Забавина. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.

9. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с.

10. Terzagi K. Theoretical soil mechanics. New York: Wiley, 1943. 510 p.

11. Ухов С. Б. Расчет сооружений и оснований методом конечного элемента. М.: МИСИ, 1973. 118 с.

12. Zienkiewicz O. C., Humpheson C., Lewis R. W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics // Geotechnique. 1975. No. 4. P. 671–689.

13. Duncan J. M., Dunlop P. Development of failure around excavated slopes // Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. 1970. Vol. 96. No. SM2. P. 471–494.

14. Desai C. S. Some aspects of constitute models for geologic media // Third International Conference of Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, 2–6 April 1979. P. 299–308.

15. Федоровский В. Г., Ильин С. Г. О коэффициентах запаса // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 2. С. 2–7.

Поступила в редакцию 22 июня 2021 года

Сведения об авторах:

Горшков Николай Иванович – доктор технических наук, доцент кафедры мостов, оснований и фундаментов Тихоокеанского государственного университета. E-mail: fem_soft@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7493-4541
Краснов Михаил Александрович – инженер кафедры мостов, оснований и фундаментов Тихоокеанского государственного университета. E-mail: mike_mail@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3550-9654
Жданова Светлана Мирзахановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства Дальневосточного государственного университета путей сообщения. E-mail: mirzahanovna@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7105-3597

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-42-56

Stress-strain state and stability of the Unglichikan open pit walls

Nikolai I. Gorshkov[1], Mikhail A. Krasnov[1], Svetlana M. Zhdanova[2]
[1] Pacific National University, Khabarovsk, Russia.
[2] Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Abstract
Research objective *is to identify the features of stress-strained state development and estimate the stability of Unglichikan open pit walls and dump slopes based on calculation, analysis, and estimation with the certified finite element method GenIDE32.*
The introduction *describes features of research object location natural-technogenic conditions and geological history of rocks building up the research object.*
Research relevance *is due to complex solution to deep and high mountain structures design problems, account for construction technologies, and stress-strained state and elements stability determination.*
Methods *of the stress-strained state numerical calculation, analysis, and estimation for the "structure–geological environment" system consists in using all tools of the program's interface, namely, values, value levels, isolines and graphs for different quantities, including the graphs of stress-strained state behavior trajectories in the space of the stress tensor invariants and relative strains.*
Results *of calculation are presented as the program's capabilities in graphic representation of the sequential development of mudslides in open pit walls and dump slopes with vertical fissures. Colors of magnitude levels specify the contours of mudslides, while the corresponding shading of finite elements indicates the fissure formation sites.*
Conclusions. *Calculation results proved the stability of the mountain structures for the selected size dimensions of open pit walls and dump slopes.*

Keywords: *stress-strained state; stability; soil structure; open pit; dump; glide surface; finite element method.*

REFERENCES

1. Barvashov V. A. Effect of subsoil discontinuities on superstructure behavior. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov = Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018; 2: 2–5. (In Russ.)
2. Gorshkov N. I., Krasnov M. A. Comparative estimate of soil structures (cuts and fills) stress-strained state based on FEM. *Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii = Mechanics of Structures and Analysis of Structures*. 2011; 5: 4–11. (In Russ.)
3. Gorshkov N. I., Krasnov M. A. Stress-strain state and stability of the sides of the pit based on the calculation of the plain and axisymmetric problems. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2014; 5: 37–44. (In Russ.)
4. Gorshkov N. I., Krasnov M. A., Iuan Ts., Zhdanova S. M. Peculiarities of the stress-strain state of the "excavation–geo-environment" and "embankment–geo-environment" systems in the process of erecting them. *Transportnye sooruzheniia = Transport Works*. 2020; 2. Available from: https://t.-s./today/PDF/11SATS220.pdf. (In Russ.) doi: 10.15862/11SATS220
5. Protodiakonov M. M. (ed.) et al. *Distribution and correlation of rock physical properties indicators*. Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)
6. Kartashov Iu. M. (ed.) et al. *Strength and strain characteristics of rocks*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
7. Fadeev A. B. *The finite element method in geomechanics*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
8. Yang H. Huang. *Stability analysis of earth slopes: translation from English*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 1988.
9. Shakhuniants G. M. *Railroad*. Moscow: Transport Publishing; 1987. (In Russ.)
10. Terzagi K. *Theoretical soil mechanics*. New York: Wiley, 1943. 510 p.
11. Ukhov S. B. *Analysis of structures and foundation by the finite element method*. Moscow: MISI Publishing; 1973. (In Russ.)
12. Zienkiewicz O. C., Humpheson C., Lewis R. W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*. 1975; 4: 671–689.

13. Duncan J. M., Dunlop P. Development of failure around excavated slopes. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. 1970; 96(SM2): 471–494.

14. Desai C. S. Some aspects of constitute models for geologic media. In: *Third International Conference of Numerical Methods in Geomechanics. Aachen, 2–6 April 1979*. P. 299–308.

15. Fedorovskii V. G., Iliin S. G. Safety factors. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov = Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 2: 2–7. (In Russ.)

Received 22 June 2021

Information about authors:

Nikolai I. Gorshkov – DSc (Engineering), associate professor of the Department of Bridges, Bases, and Substructures, Pacific National University. E-mail: fem_soft@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7493-4541
Mikhail A. Krasnov – engineer, Department of Bridges, Bases, and Substructures, Pacific National University. E-mail: mike_mail@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3550-9654
Svetlana M. Zhdanova – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Construction, Far Eastern State Transport University. E-mail: mirzahanovna@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-7105-3597

Для цитирования: Горшков Н. И., Краснов М. А., Жданова С. М. Напряженно-деформированное состояние и устойчивость бортов карьера Унгличикан // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 6. С. 42–56. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-42-56
For citation: Gorshkov N. I., Krasnov M. A., Zhdanova S. M. Stress-strain state and stability of the Unglichikan open pit walls. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 6: 42–56 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-6-42-56