

На правах рукописи

Мельников Никита Ярославович



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
БОРТОВ КАРЬЕРОВ ПРИ КРУТОМ ПАДЕНИИ СЛОЕВ,
НАПРАВЛЕННЫХ В МАССИВ, В УСЛОВИЯХ
КРИОЛИТОЗОНЫ**

*Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение
горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная
теплофизика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском горном университете».

Научный руководитель –

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Цирель Сергей Вадимович

Официальные оппоненты:

Бахаева Светлана Петровна,

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор

Макаров Александр Борисович,

доктор технических наук, профессор, SRK Consulting (Russia) Ltd филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), главный консультант по геомеханике

Ведущая организация – НИТУ «МИСиС»

Защита диссертации состоится 26 декабря 2019 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.06 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



СИДОРОВ
Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Отработка запасов месторождений открытым способом приводит к изменению напряженно-деформированного состояния массива, что влечет за собой опасность возникновения оползней или обрушений. Завышенные углы наклона бортов карьеров могут стать причиной обрушения, а заниженные углы приводят к увеличению объема вскрышных работ.

Многочисленными исследованиями установлено, что горные породы в прибортовых массивах можно охарактеризовать как слоистую трещиноватую среду, а их поведение в некотором приближении можно описать с использованием законов сыпучей среды. Данное допущение позволяет для оценки устойчивости бортов использовать критерий Кулона-Мора, согласно которому предельно-напряженное состояние откоса достигается при определенном соотношении нормальных и касательных напряжений, а разрушение горных пород осуществляется путем сдвига. На сегодняшний день на основании данного подхода было разработано более 150 методов расчетов устойчивости откосов.

Однако в прибортовых массивах со сложным структурным строением существует вероятность возникновения условий, при которых процесс разрушения откосов будет иметь иной характер. Одним из таких примеров являются откосы, в которых крутопадающая слоистость направлена в массив (далее – обратное падение).

Вопросами оценки устойчивости бортов карьеров при обратном падении слоев рассмотрены в работах Афанасьева Б.Г., Пушкарева В.И., Абрамова В.К, Сапожникова, В.Т., Новиковой Л.К., Гудмана Р., Брэя Дж.

Деформирование таких откосов представляет собой сложный процесс, представляющий собой наклон слоев и последующее их опрокидывание с межслоевыми подвижками по контактам, в результате чего по всей поверхности образуются заколы в виде обратных ступенек.

Разработанные на сегодняшний день методы оценки устойчивости бортов карьеров при обратном падении слоев

являются весьма приближенными, зачастую не просто упрощающими, но и в некоторых случаях искажающими физические процессы, происходящие в массиве.

Кроме того, в большей части подходов контактные условия горных пород характеризуются только углом трения, а величина сцепления полностью игнорируется, что особенно недопустимо в условиях криолитозоны.

В условиях криолитозоны прибортовой массив находится в мерзлом состоянии, а контакты горных пород дополнительно сцементированы льдом. В данных условиях прочностные свойства контактов изменяются, и в большей части случаев значительно возрастают по сравнению с талыми условиями, в результате чего может наблюдаться изменение характера деформирования бортов карьеров и увеличение коэффициента запаса устойчивости откосов.

В связи с этим разработка рекомендаций по оценке устойчивости бортов при крутопадающем обратном падении слоев с учетом особенностей поведения деформирования откосов и прочностных свойств по контактам горных пород является весьма актуальной.

Цель работы. Разработка методики оценки устойчивости бортов глубоких карьеров в массивах с крутопадающей несогласной с наклоном откоса слоистостью в условиях криолитозоны.

Основные задачи исследования:

- анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по оценке устойчивости бортов карьеров в условиях крутого падения слоев, направленных в массив;
- испытания физико-механических свойств пород в мерзлом и талом состояниях;
- проведение физического моделирования прибортового массива с крутопадающей несогласной с наклоном откоса борта слоистостью при различных контактных условиях;
- установление характера деформирования бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;
- сопоставление результатов физического моделирования с результатами расчетов устойчивости методами алгебраического сложения сил и конечных элементов;

– разработка способов прогнозирования процессов деформирования бортов карьеров с крутопадающей слоистостью, направленной в массив;

– разработка рекомендаций по определению параметров бортов карьеров при их формировании в массивах с крутопадающей несогласной с наклоном борта слоистостью в условиях криолитозоны.

Идея работы. Оценку устойчивости бортов карьеров с обратным падением слоев необходимо проводить с учётом прочностных свойств по контактам слоев горных пород и величин допустимых деформаций, наблюдаемых в массиве.

Объектом исследования являются борта карьеров, формируемых в осадочных месторождениях с крутопадающей слоистостью.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием комплекса исследований, включающего в себя обобщение и анализ российского и международного опыта оценки устойчивости бортов карьеров с крутым обратным падением слоев; физическое моделирование процессов деформирования откосов с обратной слоистостью; сопоставление результатов физического моделирования с результатами расчетов аналитическими и численными методами и натурными наблюдениями.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соблюдением критериев подобия при физическом моделировании процессов деформирования прибортовых массивов, статистической обработкой полученных результатов, а также сопоставлением с результатами натурных наблюдений, численного моделирования и материалами о проведенном ранее физическом моделировании бортов карьеров при обратном падении слоев горных пород.

Научная новизна:

– установлен характер изменения процессов деформирования и разрушения откосов с обратной крутопадающей слоистостью в зависимости от прочностных свойств на контактах слоев горных пород;

– выявлены закономерности, характеризующие распределение смещений в бортах карьеров с обратной крутопадающей слоистостью в зависимости от характера деформирования откосов;

– выявлен скачкообразный характер снижения скоростей смещений перед потерей устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью.

Защищаемые положения:

1. Процесс разрушения откосов с обратной крутопадающей слоистостью определяется прочностью контактов: с увеличением прочностных свойств контактов слоев горных пород процесс разрушения, представляющий собой опрокидывание слоев, трансформируется в изгибы с их дальнейшим срезом по плавной криволинейной поверхности аналогично изотропному откосу;

2. Прогноз потери устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью должен осуществляться на основе численного моделирования и натурных наблюдений, а критерием смещений, прогнозирующим обрушение, является спад максимальных скоростей смещений в 1,5 раза относительно максимальных скоростей смещений предыдущего этапа ведения горных работ;

3. При обосновании параметров бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью необходимо учитывать как прочностные свойства по контактам горных пород, так и допустимые величины деформаций при различных коэффициентах запаса.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– определены особенности процессов деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;

– установлены критерии прогнозирования процессов деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью;

– результаты исследований рекомендуются к внедрению на осадочных месторождениях с крутопадающей слоистостью, а также

будут полезны в научно-исследовательских и проектных организациях при проектировании карьеров с обратной крутопадающей слоистостью и решении геомеханических и горнотехнических задач, возникающих при эксплуатации таких карьеров.

Апробация и реализация результатов работы. Основные положения и результаты выполненных в работе исследований были представлены на международных конференциях в период 2015-2019 гг.: 56 Konferencija Studenckich Kol Naukowych PionuG orniczego (Польша, г. Краков, AGH, 2015), 68th Berg-und Huttenmannischer Tag 2016 (Германия, г. Фрайберг), VIII Международная научно-практическая конференция «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы» (Россия, г. Пермь), VIII Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Россия, г. Пермь), VIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (Россия, г. Санкт-Петербург), 2018 European Rock Mechanics Symposium (Россия, г. Санкт-Петербург), X Международная конференция «Комбинированная геотехнология» (Россия, г. Магнитогорск). Принято участие в научно-исследовательской работе, проводимой в рамках выполнения соглашения между Российским научным фондом, руководителем проекта и организацией о предоставлении гранта на проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований: Проект № 17-77-10101 от 24 июля 2017 г. «Оценка устойчивости бортов карьеров на основе иерархично-блочной модели скальных массивов и разработки метода расчета коэффициента структурного ослабления».

Разработанная методика полезна для горнорудных предприятий, научно-исследовательских организаций и учебных учреждений. Полученные результаты могут использоваться в строительных и проектных организациях для выполнения расчетов и оценки наблюдаемых процессов.

Публикации. По теме научно-квалификационной работы опубликовано 5 работ, из них 2 в ведущих рецензируемых изданиях,

включенных в перечень ВАК РФ, 1 – включенную в международную базу цитирования Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит 140 страниц машинописного текста, 91 рисунок, 13 таблиц, 13 формул и список литературы из 93 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность, основная цель, идея, методы исследования, задачи, защищаемые положения, научная новизна и научное значение, обоснованность и достоверность научных положений работы, практическая значимость, реализация результатов и апробация работы.

В первой главе оценивается состояние изученности вопроса. Приводится анализ известных отечественных и зарубежных методов расчетов устойчивости бортов с обратной крутопадающей слоистостью и особенностей их деформирования, а также анализ устойчивости бортов в условиях многолетней мерзлоты. Обоснована необходимость разработки методов оценки устойчивости откосов в условиях криолитозоны.

Во второй главе проанализированы исследования прошлых лет по изучению физико-механических свойств пород в условиях криогенного воздействия. Выполнены испытания физико-механических свойств пород по контактам в талом и мерзлом состояниях.

В третьей главе описано физическое моделирование бортов карьеров с обратным падением слоев с использованием методов эквивалентных материалов (далее ЭМ). Осуществлен анализ процессов деформирования и разрушения откосов в зависимости от прочностных свойств по контактам слоев.

В четвертой главе на основании анализа результатов физического моделирования установлена зависимость величин смещений в откосах, а также характер деформирования прибортовой полосы с обратной слоистостью от коэффициента запаса устойчивости. Осуществлено сопоставление результатов физического и численного моделирования. Выявлен признак

обрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью. Предложена методика оценки устойчивости бортов со слоистостью, направленной в массив, в зависимости от прочностных свойств на контактах слоев и допустимых смещений.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты исследования отражены в защищаемых положениях:

1. Процесс разрушения откосов с обратной крутопадающей слоистостью определяется прочностью контактов: с увеличением прочностных свойств контактов слоев горных пород процесс разрушения, представляющий собой опрокидывание слоев, трансформируется в изгибы с их дальнейшим срезом по плавной криволинейной поверхности аналогично изотропному откосу.

Используемые на практике традиционные методы оценки устойчивости бортов карьеров основаны на том, что разрушение откосов представляют собой сдвигение массива горных пород по наиболее ослабленной поверхности скольжения. Исходя из этого, оценка устойчивости откосов осуществляется путем сравнения удерживающих и сдвигающих сил, действующих по наиболее напряженной поверхности скольжения. Однако в условиях обратного крутого падения слоев разрушение откосов представляет собой более сложный процесс, который характеризуется наклоном с последующим опрокидыванием или изгибом слоев с подрезкой в крест наслоения. Поэтому применение традиционных подходов в оценке устойчивости таких откосов являются ненадежными.

Для оценки устойчивости откосов с крутопадающей слоистостью Б.Г. Афанасьевым была разработана методика, вошедшая в нормативные документы. Суть данной методики заключается во введении отрицательной поправки в предельный угол, рассчитанный для изотропного откоса. Величина такой поправки достигает 15-20° и определяется с помощью графиков. Разработанные графики справедливы для откосов высотой не более 200 м.

Однако данный способ не учитывает сцепление по контактам слоев, имеющее не меньшее значение для развития деформаций и реализации тех или иных процессов потери устойчивости бортов карьеров, чем угол внутреннего трения. В связи с этим приближенными являются и оценки предельно возможных углов наклона бортов карьеров.

Недостаток данного метода наиболее характерен при оценке устойчивости откосов с обратной слоистостью в условиях криолитозоны. В мерзлом состоянии прочностные свойства по контактам слоев горных пород, в частности сцепление, могут увеличиваться. Поэтому неучет сцепления по контактам слоев, особенно в данных условиях, может привести к занижению предельных параметров откосов, а соответственно, и к снижению экономической эффективности разработки месторождений.

Изменение величины сцепления на контактах слоев в условиях криогенного воздействия подтверждаются результатами лабораторных исследований прошлых лет и настоящей работы, в ходе которых были проведены испытания на сдвиг по контактам пород в талом и мерзлом состояниях (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты испытаний на сдвиг пород в талом и мерзлом состояниях

Порода	Естественное состояние		Мерзлое состояние		Наличие льда на контактах	
	С, МПа	$\varphi, ^\circ$	С, МПа	$\varphi, ^\circ$	С, МПа	$\varphi, ^\circ$
Результаты прошлых лет (ВНИМИ)						
<i>Испытания на сдвиг вдоль естественной трещины</i>						
Уголь	0,02	15	–	–	0,14	10
Углистый аргиллит	0,02	15	–	–	0,30	15
Углистый песчаник	0,04	20	–	–	0,22	18
Результаты исследований настоящей работы						
<i>Испытания на сдвиг вдоль естественной трещины</i>						
Уголь (2)	0,07	31	0,15	29	0,23	28
Алеврит	0,21	26	–	–	0,30	25
<i>Испытания на сдвиг вдоль плоскости распила</i>						
Уголь (1)	0,01	24	0,27	10	–	–
Уголь (2)	0,05	21	–	–	0,40	15
Алеврит	0,07	28	–	–	0,09	26

В связи с этим были проведены исследования по изучению влияния прочностных свойств на контактах слоев на характер деформирования откосов с обратной слоистостью. Исследования осуществлялись посредством физического моделирования на эквивалентных материалах.

Для анализа процессов деформирования борта карьера с обратной слоистостью моделировался борт высотой 500 м. При моделировании учитывалось:

С использованием данных критериев динамического и геометрического подобия определялись физико-механические свойства ЭМ модели по следующей формуле:

$$N_m = N_n \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_n} \cdot \frac{l_m}{L_n}, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \operatorname{tg} \varphi_i, \quad (2)$$

где: N_m, N_n – физико-механические характеристики модели и натуры, имеющие размерность сила/площадь; γ_m, γ_n – объемные веса в модели и в натуре; l, L – размеры в модели и в натуре; φ_m, φ_n – углы внутреннего трения в модели и в натуре.

В соответствии с расчётными параметрами эквивалентных материалов, по результатам лабораторных испытаний на сжатие, растяжение и сдвиг был выбран следующий состав смеси: чугунная дробь – 60%, кварцевый песок – 38 %, солидол – 2%.

Материал модели укладывался в специальную матрицу поворотного стенда (рисунок 1) путем послойной укатки (7 циклов) с помощью катка с удельным давлением 2,5 Н/см². При моделировании обратной слоистости стенд поворачивался таким образом, чтобы укатка слоев осуществлялась в горизонтальной плоскости. Для моделирования слабых контактных условий между слоями укладывался полиэтилен, для моделирования прочных – слюда.

Для моделирования объемного напряженного состояния, в процессе изготовления модели между слоями устанавливались специальные стяжки с реперными марками (рисунок 2). В процессе моделирования движение всех марок фиксировалось с помощью высокочастотного фотооборудования. По результатам обработки

полученных фотоматериалов с помощью специального программного обеспечения ТЕМА Motion 2D определены смещения реперов, установленные в теле модели.

В ходе физического моделирования был создан ряд моделей с тремя принципиально отличающимися условиями: изотропный откос, а также откосы с относительно низкими и высокими прочностными свойствами по контактам слоев, падающие в массив (далее слоистый откос «слабый контакт» и слоистый откос «прочный контакт» соответственно). Угол падения слоистости был равным 73 градусам. Для эквивалентных материалов модели были приняты следующие прочностные свойства: сцепление (C) – 7,37 г/см², угол внутреннего трения (φ) – 32°. При моделировании слоистых откосов, на контактах слоев были заданы следующие прочностные свойства: для слоистого откоса «прочный контакт» C – 2,86 г/см², φ – 23°; для слоистого откоса «слабый контакт» C – 1,02 г/см², φ – 19°.

Моделирование открытой отработки месторождения проводилось путем поэтапной выемки блоков до полного обрушения модели откоса. Пример схемы извлечения блоков горной массы при моделировании с обратной слоистостью откосов (модель «слабый контакт») представлен на рисунке 3. После каждого этапа выемки блоков осуществлялась фото- и видеосъемка.

В результате проведенного моделирования были зафиксированы следующие процессы деформирования:

- процесс разрушения изотропного откоса характеризуется классическим сдвижением горной массы по плавной криволинейной поверхности скольжения (рисунок 4). Обрушению предшествует резкий скачок деформаций. На рисунке показано, как фактическая поверхность скольжения совпадает с расчетной;

- процесс деформирования слоистого откоса «слабый контакт» начался задолго до наступления предельного состояния и представляет собой совсем иной механизм, нежели движение по поверхности скольжения, свойственное изотропному откосу (рисунок 5). В данном случае процессу разрушения предшествовали поэтапные скачки деформаций, сопровождающиеся небольшими

наклонами слоев. Процесс нарастания деформаций характеризуется увеличением интенсивности наклона слоев, которые впоследствии трансформировались в полное их опрокидывание;

– процесс деформирования слоистого откоса «прочный контакт» совмещает в себе особенности разрушения как изотропного, так и слоистого откоса «слабый контакт» (рисунок 6). Процесс деформирования, также как у слоистого откоса «слабый контакт», характеризуется поэтапными скачками деформаций в виде наклонов слоев, хоть и с меньшей интенсивностью, однако далее процесс деформирования трансформировался в изгиб слоев с подрезкой вкрест наслоения по поверхности аналогичной изотропному откосу.

Отличительной особенностью процессов деформирования откосов являются направления векторов смещений на протяжении всех этапов деформирования. При анализе направлений векторов смещений в качестве критерия было выбрано отношение горизонтальных (ΔX) и вертикальных (ΔY) составляющих максимальных общих смещений в откосе. Характер изменения векторов смещений при различных коэффициентах запаса на этапах близких к предельному состоянию откосов характеризуется зависимостями, представленными на рисунке 7. Для слоистых откосов на рисунке 7 представлены этапы деформирования бортов, от первых скачков деформаций до полной потери устойчивости.

Как показано на рисунке 7, при деформировании слоистого откоса «слабый контакт» отношение горизонтальных и вертикальных смещений уменьшилось с 12 до 2. Угол наклона векторов смещений при этом меняется в пределах $85-65^\circ$. Значительное преобладание горизонтальных смещений над вертикальными и дальнейшее изменение их соотношения обусловлено поворотом слоев, в результате чего форма векторов смещений представляет собой дугу окружности с центром, расположенным на некоторой линии, ограничивающей зону обрушения.

При деформировании слоистого откоса «прочный контакт» характер векторов смещений аналогичен характеру смещений при

разрушении изотропного откоса. Соотношение горизонтальных и вертикальных смещений в процессе деформирования меняется незначительно, и находится в пределах 1,3-0,9. Углы векторов смещений меняются в пределах 49-41°.

Как показывают результаты физического моделирования величина сцепления играет важную роль в процессах формирования напряженно-деформационного состояния в бортах карьерах с обратной слоистостью. С изменением величины сцепления интенсивность наклона слоев, характеризующаяся преобладанием горизонтальных смещений, и период активации процессов трещинообразования до наступления предельного состояния становится меньше, а сам механизм разрушения становится ближе к изотропному, что обусловлено увеличением предельного угла откоса. Такой вывод имеет особенное значение в криолитозоне при оценке предельных параметров откосов с обратной слоистостью в мерзлом состоянии, для которых характерно повешение величины сцепления на контактах слоев.

По результатам физического моделирования установлено, что прочностные свойства по контактам слоев оказывают влияние на процесс деформирования бортов карьеров, и данные параметры необходимо учитывать при оценке устойчивости прибортового массива.

2. Прогноз потери устойчивости откосов с обратной крутопадающей слоистостью должен осуществляться на основе численного моделирования и натурных наблюдений, а критерием смещений, прогнозирующим обрушение, является спад максимальных скоростей смещений в 1,5 раза относительно максимальных скоростей смещений предыдущего этапа ведения горных работ.

В ходе физического моделирования были установлены смещения в моделях откосов на каждом этапе отработки моделей. Для соответствующих этапов выполнялся поверочный расчет устойчивости откоса с использованием метода алгебраического сложения сил и численным моделированием методом конечных элементов. Численное моделирование проводилось при помощи

программного обеспечения «RS2» компании Rocscience. На рисунке 8 представлен пример численного моделирования слоистого откоса «слабый контакт».

По результатам расчетов была получена зависимость величины максимальных смещений (Δl) на каждом этапе деформирования откосов от коэффициента запаса устойчивости (n) (рисунок 9). На рисунке 9 на оси ординат представлена величина максимальных общих смещений (Δl), на оси абсцисс величина коэффициента запаса (n).

Как показано на рисунке 9, при сопоставлении результатов физического и численного моделирования бортов карьеров с обратным падением слоев, а также метода алгебраического сложения сил установлено, что на момент разрушения откосов коэффициент запаса методом алгебраического сложения сил составлял 1,1-1,3, в то время как методом конечных элементов – 0,98-1,03, что более достоверно характеризует предельное состояние откоса. При сопоставлении результатов работ прошлых лет по физическому моделированию откосов с обратной слоистостью по результатам расчетов аналитическим и численным методами были получены аналогичные результаты.

Также в ходе физического моделирования было установлено, что перед разрушением откосов наблюдается спад максимальной величины относительных смещений, что, вероятно, обусловлено накоплением энергии, способствующей в дальнейшем ускорению сдвига и прорастания трещин. При деформировании откосов с обратной слоистостью величина максимальных смещений относительно величин смещений предыдущего этапа уменьшилась в 1,5 раза. Как показывают расчеты и наблюдения, подобное явление встречается и при деформировании изотропных откосов.

Как показывают наблюдения, параметры откосов на этапе спада скоростей смещений близки к предельным, превышение которых приводит к разрушению откосов. По результатам расчетов методом конечных элементов, на этапах снижения скорости относительных смещений коэффициент запаса устойчивости откосов с обратной слоистостью составляет 1,19-1,22. Исходя из этого, с помощью численного моделирования был проведен ряд

расчетов для различных условий по установлению максимального предельного угла откоса с обратной слоистостью, при котором общая устойчивость борта сохраняется, а также допустимо выполнение мероприятий по управлению устойчивостью. В качестве критерия принимался коэффициент запаса 1,25, характеризующий состояние откоса на момент спада скоростей смещения.

Выполнение поверочных расчетов осуществлялось для тех же условий, при которых проводилось численное моделирование, но с различной мощностью слоев ($m=6\div 20$).

По результатам расчетов были установлены зависимости предельных углов наклона откосов с обратной слоистостью перед разрушением (α) от сцепления по контактам слоев (C_k), соотнесенного со сцеплением массива горных пород (C_m) (рисунок 10).

Таким образом, численное моделирование показывает более подробную оценку предельных параметров до разрушения откосов с обратной слоистостью в талых и мерзлых условиях. Однако в каждом конкретном случае данные численного моделирования должны быть проверены и уточнены натурными наблюдениями. Тогда результаты инструментальных наблюдений, указывающие на снижение скорости смещений, является критерием, при котором прекращаются горные работы, или осуществляются меры по управлению устойчивости.

3. При обосновании параметров бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью необходимо учитывать как прочностные свойства по контактам горных пород, так и допустимые величины деформаций при различных коэффициентах запаса.

Одной из основных особенностей процессов деформирования бортов карьеров с обратной слоистостью является раскрытие трещин и образование «обратных ступенек» на поверхности откоса еще задолго до наступления предельного состояния. Традиционные методы оценки устойчивости, приведенные в нормативных и методических документах, основаны на теории предельного равновесия и осуществляют оценку только

по несущей способности откосов, тем самым позволяя установить предельные параметры до их разрушения. Однако данные методы никак не учитывают особенности деформирования откосов с обратным падением слоев.

В отличие от традиционных методов, наиболее точную оценку устойчивости бортов при крутопадающей слоистости дает численное моделирование, охватывающее более широкий спектр решаемых геомеханических задач, чем методы предельного равновесия. Однако данные методы не рассматривают неупругие процессы разрушения, возникающие при коэффициентах запаса 1,2-1,3 и более, особенно при сложных механизмах деформирования, характерных для бортов с обратной слоистостью.

В связи с этим разработана методика определения параметров бортов с обратным падением слоев, учитывающая допустимые смещения в процессе деформирования откосов. В основу методики положены результаты физического моделирования методом эквивалентных материалов. Суть методики заключается в определении необходимого коэффициента запаса устойчивости, исходя из допустимой величины смещений для рассматриваемого откоса.

Величина допустимых смещений в откосе определяется по формуле:

$$S_{доп} = \varepsilon \cdot \Delta l, \quad (3)$$

где: ε – допустимая относительная горизонтальная деформация, при условии проявления в прибортовом массиве упругих деформаций принимается $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$; Δl определяется, исходя из общей расчетной длины наиболее напряженной поверхности скольжения в изотропном откосе.

Приближенная величина длины наиболее напряженной поверхности скольжения можно вычислить по формуле:

$$\Delta l = H \sqrt{1 + (\sin \alpha + (0,2 \div 0,3))^2}, \quad (4)$$

где: α – угол откоса борта карьера, H – высота борта карьера.

Далее на основании анализа результатов, установленных при физическом и численном моделировании, получен график

зависимостей допустимых смещений от коэффициентов запаса устойчивости (рисунок 11).

Допустимые смещения на графике приведены в относительных величинах. Поэтому перед использованием графика необходимо перестроить ось ординат в зависимости от рассматриваемой высоты откоса (Н) в соответствии с геометрическим масштабом. Величина сцепления на контактах слоев, характеризующаяся кривыми, также приведена в долевых соотношениях относительно величины сцепления в массиве. Далее, после масштабирования оси ординат и выбора необходимой кривой, по графику через допустимую величину смещения проводится горизонтальная линия до пересечения с кривой с заданными прочностными свойствами по контакту. Затем от данной кривой опускается вертикальная линия до пересечения с осью абсцисс. Полученный таким образом коэффициент запаса является минимально требуемым для рассматриваемых условий и обеспечивающим заданную величину допустимых смещений.

Предельные параметры бортов карьеров определяются при помощи программного обеспечения «RS2» компании Rocscience путем подбора параметров, исходя из коэффициента запаса, установленного по графику (рисунок 11).

В случае использования высокоточных технологий мониторинга (использования наземных радаров) в режиме реального времени со сплошной зоной покрытия допустимо использовать повышенные значения критической величины относительной деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в научно-квалификационной работе исследования посвящены разработке рекомендаций определения предельных параметров бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью, а также способом прогнозирования их потери устойчивости. Основные результаты выполненных исследований:

1. С увеличением величины сцепления по контактам слоев процессы деформирования и разрушения бортов карьеров с обратной крутопадающей слоистостью, представляющей собой

наклоны и опрокидывания слоев, приближаются к известным механизмам потери устойчивости изотропных прибортовых массивов.

2. Установлен критерий, прогнозирующий характер разрушения откосов с обратной слоистостью, который представляет собой отношение горизонтальных и вертикальных смещений. Процесс деформирования бортов в виде опрокидывания слоев характеризуется преобладанием горизонтальных смещений. В ходе деформирования таких откосов величина отношения горизонтальных и вертикальных смещений на момент появления первых трещин составляет 10-12, и при дальнейшем процессе деформирования это отношение снижается до 2. Однако при больших величинах сцепления по контактам слоев данное отношение на всех этапах деформирования остается в практически постоянном диапазоне и составляет 0,9-1,3, что близко к величинам, характерным для деформирования изотропного откоса.

3. Разработана методика определения предельных параметров бортов с обратной крутопадающей слоистостью, где в качестве критерия оценки состояния является величина относительных смещений.

4. Определены размеры зоны деформирования прибортовой полосы на разных этапах деформирования в зависимости от прочностных свойств на контактах.

5. Выявлен критерий, прогнозирующий разрушения бортов с обратной слоистостью, который характеризуется спадом скорости смещений в 1,5 раза относительно скорости смещений предыдущего этапа. Совместное использование натурных наблюдений по выявлению спада скорости смещений и результатов численного моделирования позволяет прогнозировать предельное состояние бортов карьеров с обратной слоистостью.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. Цирель, С. В. Применение физического моделирования для установления критериев потери устойчивости прибортового

массива / С. В. Цирель, А. А. Павлович, **Н. Я. Мельников** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – №2. – С. 145–152.;

2. Цирель, С. В. Совместное использование физического и численного моделирования при оценке устойчивости бортов карьеров со сложным структурным строением / С. В. Цирель, А. А. Павлович, **Н. Я. Мельников**, М. М. Идиятуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7 (специальный выпуск 21). – С. 3–12. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-7-21-3-12

В изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus:

3. Цирель С. В. Физическое моделирование процессов деформирования прибортового массива карьера с крутопадающей слоистостью горных пород / С. В. Цирель, А. А. Павлович, **Н. Я. Мельников**, Б. Ю. Зуев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск: Изд. Со РАН. – 2019. – №3. – С. 22–30. DOI: 10.15372/FTPRPI20190303

В прочих изданиях:

4. Цирель С. В. Оценка устойчивости бортов карьеров и откосов уступов при крутом несогласном падении слоев / С. В. Цирель, А. А. Павлович, Б. Ю. Зуев, **Н. Я. Мельников** // VIII Международная научно-практическая конференция. Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ. СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. – С.171-182.;

5. Цирель С. В. Совместное влияние сейсмичности и многолетней мерзлоты на устойчивость бортов карьеров / С. В. Цирель, **Н. Я. Мельников** // Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы», Изд-во: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", г. Уфа, 2016. – С. 318-321.



Рисунок 1 – Стенд для моделирования



Рисунок 2 – Модель массива перед началом воспроизведения открытых горных работ

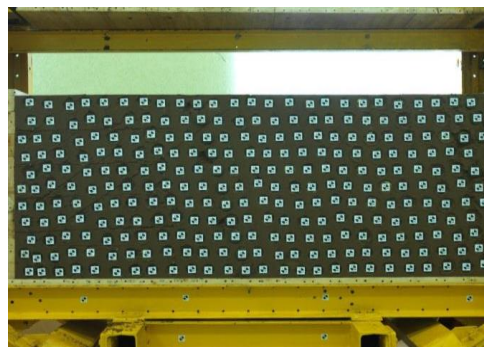


Рисунок 3 – Общая схема отработки моделей

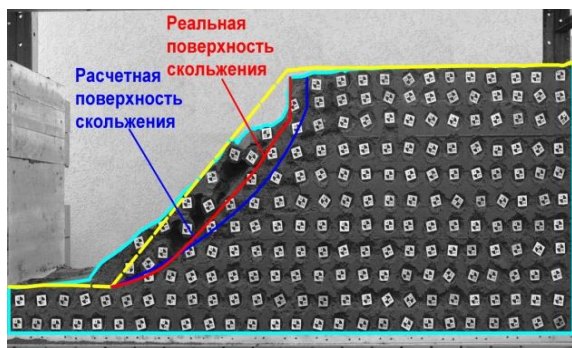


Рисунок 4 – Разрушение изотропного откоса (желтая пунктирная линия – контур до обрушения откоса)

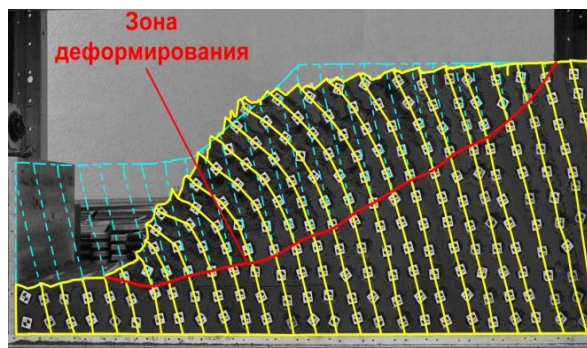


Рисунок 5 – Разрушение слоистого откоса «слабый контакт»

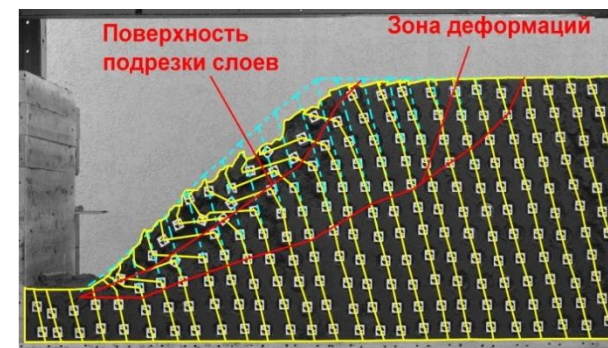


Рисунок 6 – Разрушение слоистого откоса «прочный контакт»

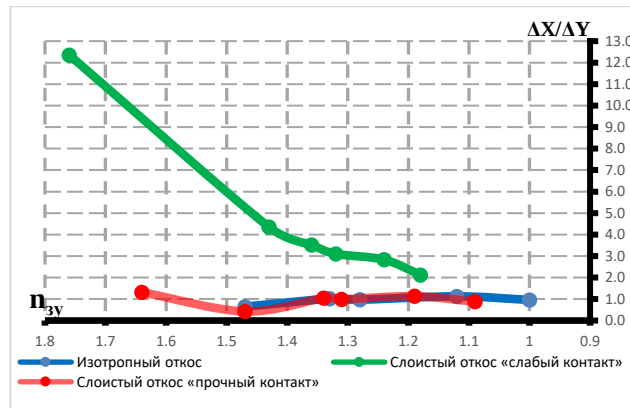


Рисунок 7 – Зависимость отношения горизонтальных и вертикальных смещений от коэффициента запаса устойчивости

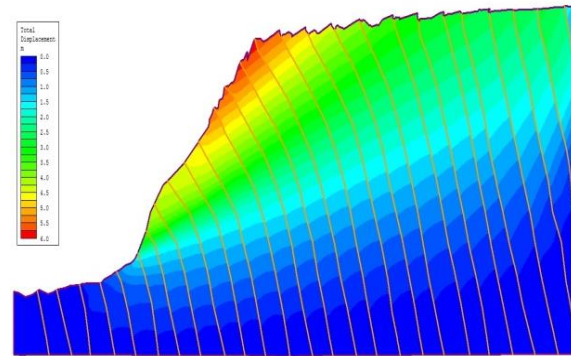


Рисунок 8 – Моделирование борта карьера с обратным падением слоев методом конечных элементов (слоистый откос «слабый контакт»)

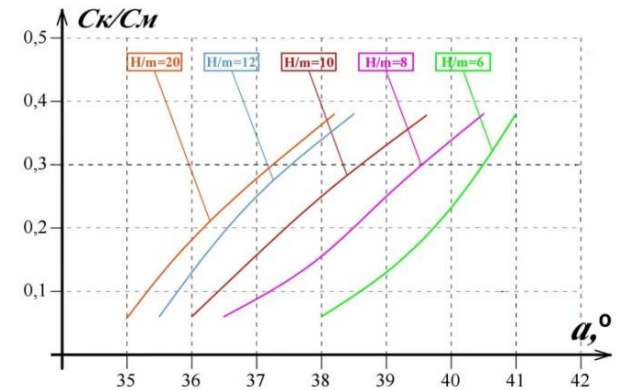


Рисунок 10 – Зависимость предельных углов откосов с обратной слоистостью от величины сцепления на контактах слоев

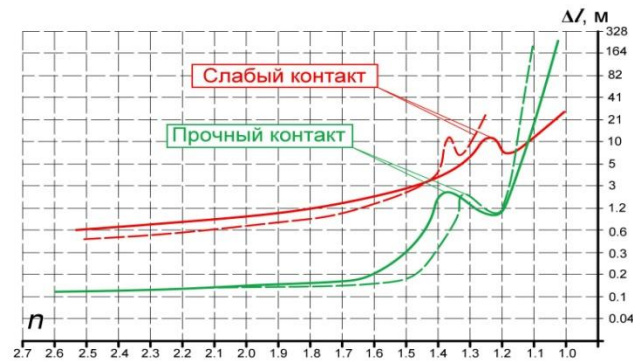


Рисунок 9 – Зависимость максимальных смещений (Δl) от коэффициента запаса (n) на каждом этапе отработки (ось Y имеет логарифмический масштаб; пунктирная линия характеризует результаты расчетов методом алгебраического сложения сил, сплошная линия – метод конечных элементов)

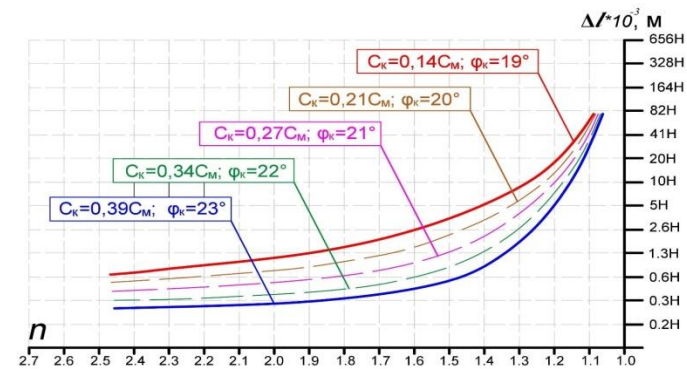


Рисунок 11 – Зависимость максимальных смещений Δl от коэффициента запаса n на каждом этапе отработки; ось Y (относительные смещения) имеет логарифмический масштаб