Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Валькова Евгения Олеговна

B

# МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА

Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель доктор технических наук, доцент Мустафин М. Г.

Санкт-Петербург – 2025

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА
УСТОЙЧИВОСТЬЮ БОРТОВ КАРЬЕРОВ9
1.1 Общие сведения о мониторинге деформаций бортов карьеров
1.2 Обзор исследований и нормативно-методической документации по обеспечению
устойчивости бортов карьеров17
1.3 Анализ методов расчета устойчивости бортов карьеров
1.3.1 Натурные способы оценки геомеханического состояния горных пород
1.3.2 Методы моделирования на эквивалентных материалах
1.3.3 Расчетные методы: метод конечных элементов и другие
1.4 Организация маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров
1.5 Цифровое моделирование открытых горных выработок
1.6 Существующая методика моделирования рельефа по облакам точек
1.5 Выводы по главе 1
ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ
МОДЕЛИ КАРЬЕРА
2.1 Проведение комплекса полевых работ для тестирования современных методов построения
цифровой модели карьера
2.2 Разработка алгоритмов уточнения цифровых моделей карьеров по облакам точек
2.5 Создание растров высокой информативности
2.5 Выводы по главе 2
ГЛАВА З МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИБОРТОВОГО МАССИВА
3.1. Определение потенциально оползнеопасных зон
3.2 Объемное моделирование напряженно-деформированного состояния прибортового массива
горных пород71
3.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния прибортового массива горных
пород (плоская модель)
3.4 Моделирование различных сценариев оползневого процесса
3.4 Расчет запаса устойчивости и сравнение с классическим подходом
3.5 Выводы по главе 3102
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ
<b>БОРТОВ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ СЦЕНАРИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА</b> 103
4.1 Схема маркшейдерских наблюдений при сценарии развития оползня «сверху-вниз»103

4.1.1 Программа для ЭВМ «Деформация»	106					
4.2 Схема маркшейдерских наблюдений при комбинированном сценарии развития оползня109						
4.2.1 Проверка стабильности опорной сети111						
4.2.2 Создание сети ПВО лидарной съемки112						
4.2.3 Связь реперов на земной поверхности и на подошве карьера	114					
4.2.3.1 Объединение в единую систему координат реперов на земной поверхности и на по	дошве					
карьера тахеометрическим способом	115					
4.2.3.2 Использование спутниковых определений	119					
4.2.4 Наземное лазерное сканирование	124					
4.2.4.1 Наземные лазерные сканеры для открытых горных работ	126					
4.2.4.2 Полевые работы	128					
4.2.4.3 Камеральные работы	132					
4.2.4.4 Сопоставление разновременных данных лазерного сканирования	135					
4.3 Выводы по главе 4	140					
5 ГЛАВА ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕ	нию					
РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ	I HA					
КАРЬЕРАХ	141					
5.1 Характеристика объекта исследования	141					
5.1.1 Состояние горных работ в карьерах рудоуправления	142					
5.1.2 Инженерно-геологическая характеристика	144					
5.2. Устойчивость нерабочих бортовых массивов карьеров рудоуправления	145					
5.3 Подходы к мониторингу деформаций откосов уступов и бортов ка	рьеров					
рудоуправления	149					
5.3.1 Визуальное обследование прибортового массива горных пород	149					
5.3.2. Маркшейдерские инструментальные измерения по профильным линиям	149					
5.3.3. Площадной мониторинг	155					
5.4 Реализация схем наблюдений за деформациями бортов карьеров	162					
5.5 Выводы по главе 5	166					
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	167					
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	168					
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения	181					
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы	ы для					
ЭВМ	182					
ПРИЛОЖЕНИЕ В Карта геомеханических рисков	184					

## введение

**Актуальность темы исследования.** Эффективная разработка месторождений полезных ископаемых напрямую зависит от обеспечения устойчивости бортов карьера. Наибольшую опасностью при этом представляют оползни, которые наносят значительный материальный ущерб горному предприятию и могут привести к гибели людей.

Регламентация эффективной и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом в целом содержится в нормативном документе «Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» от 13 ноября 2020 г. N 439. В «Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов» (М.: ИПКОН РАН, 2022. – 90 с.) приведено обобщение разработок по этому направлению. Вместе с тем на сегодня практически отсутствуют методики по выделению потенциально оползнеопасных зон борта карьера в плане, что снижает эффективность наблюдательных станций, вследствие непокрытия очага оползня. То же можно сказать об оценке ширины возможного оползня (призмы сползания). Весьма мало освещен вопрос о возможных сценариях протекания оползня для углов откоса борта карьера. Указанные неопределенности не позволяют разных совершенствовать технологии наблюдений за деформациями борта карьера с привлечением современных средств измерений.

Степень разработанности темы исследования. Изучению устойчивости бортов карьеров посвящено большое количество научных трудов, среди них можно выделить ученых, внесших значительный вклад в развитие методов оценки и прогноза оползней: Фисенко Г.Л., Афанасьев Б.Г. Звонарев Н.К., Зотеев В.Г., Бишоп А., Голушкевич С.С., Борщ-Компаниец В.И., Маслов Н.Н., Попов И.И., Гудман Р.Э., Сапожников В.Г., Пушкарев В.И., Галустьян Э.Л., Окатов Р.П. Пустовойтова Т.К, Туринцев Ю.И., Попов В.Н., Мочалов А.М., Шпаков П.С., Певзнер М.Е., Токмурзин О.Т., Низаметдинов Ф.К., Макаров А.Б., Мустафин М.Г., Жабко А.В., Бахаева С.П., Симонян В.В. и др.

Большой вклад в теорию и практику оценки оползневых процессов с акцентом на изучение инженерно-геологических условий внесли такие ученые, как Мироненко В.А., Норватов Ю.А., Дашко Р.Э., Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А. и др.

Результаты исследований перечисленных авторов составляют основу для проработки данных вопросов. Кроме того, наличие средств моделирования деформационного процесса борта карьера и существенное развитие базы маркшейдерско-геодезических приборов, а также программных комплексов по визуализации и обработке измерений значительно способствуют решению обозначенных задач. **Цель работы:** повышение безопасности ведения горных работ на карьерах за счет разработки усовершенствованной методики натурных наблюдений за деформациями прибортового массива пород.

**Идея работы:** разработка методики наблюдений за деформациями борта карьера предусматривает анализ стадий напряженно-деформированного состояния пород, характеризующих формирование оползня, что дает обоснование для выделения потенциально опасных зон и сценариев его возможного развития, а также учитывается при заложении наблюдательных станций.

#### Задачи исследований:

1. Анализ изученности вопроса о маркшейдерском обеспечении наблюдений за деформациями прибортового массива для оценки устойчивости бортов карьеров;

2. Разработка алгоритмов построения и уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок;

3. Оценка напряженно-деформированного состояния бортов карьеров с целью выделения потенциально опасных зон и сценариев формирования оползневого процесса;

4. Разработка методики маркшейдерских наблюдений за процессом деформирования бортов карьеров и практических рекомендаций для конкретных натурных условий.

**Объект исследования** – прибортовой массив борта карьера и его напряженнодеформированное состояние.

**Предмет исследования** – методы оценки устойчивости борта карьера и наблюдений за деформациями.

# Научная новизна:

1. Разработан алгоритм уточнения цифровых моделей карьеров, позволяющий осуществлять контроль построения по характерным точкам;

2. Разработана методика выделения потенциально оползнеопасных зон на карьерах и классифицирования оползней по сценариям проявления;

3. Разработана методика маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьера, включающая определение мест заложения станции в плане и специфику наблюдений в зависимости от прогнозного сценария развития оползня.

## Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр:

3. Технические средства, технологии и методики маркшейдерских геометрических измерений горных выработок, подземного пространства городов, сдвижения и деформации

земной поверхности и породных массивов, наблюдения и контроля геомеханического состояния породных массивов, бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, выделение и классифицирование зон разной степени опасности.

4. Методы оценки устойчивости подземных выработок, бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, а также подземных и наземных сооружений под воздействием горных работ.

9. Методы и системы обработки геологической, маркшейдерской и геофизической информации, а также методы моделирования месторождений, прогнозирования горногеологических условий, явлений и процессов.

# Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы состоит в определении по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива сценариев оползневого процесса, что существенно расширяет представления о природе техногенных оползней. Практическая значимость заключается в разработке методики маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров, включающей их проведение с учетом прогнозного сценария оползня в потенциально оползнеопасной зоне карьере.

Полученные результаты могут быть использованы профильными организациями при планировании и проведении работ по мониторингу устойчивости объектов горной промышленности. Изложенные в работе теоретические и методические положения внедрены в учебный процесс при изучении студентами специальных дисциплин в рамках направления подготовки «Горное дело». Результаты диссертационной работы используются в производственной деятельности ООО «НПП «Бента», что подтверждено соответствующим актом о внедрении от 10.03.2025 г. (Приложение А).

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с применением отечественного программного обеспечения по моделированию напряженнодеформированного состояния бортов карьеров, основанного на методе конечных элементов, методов математической статистики, цифрового трехмерного моделирования открытых горных выработок, современных средств маркшейдерско-геодезических измерений и обработки результатов.

# Положения, выносимые на защиту:

1. Наблюдения за деформациями прибортового массива следует проводить в потенциально оползнеопасных зонах, которые определяются на основе моделирования деформированного состояния массива горных пород с использованием 3D модели, построенной с контролем характерных точек борта карьера.

2. При прогнозной оценке устойчивости бортов карьеров параметр ширины зоны оползня, в дополнении к традиционному подходу, основанному на теории предельного

равновесия, целесообразно определять на основе решения плоской задачи теории упругости по условию минимума деформаций сдвига.

3. Маркшейдерские наблюдения следует выполнять с учётом трёх разработанных прогнозных сценариев проявления оползня: «сверху-вниз» для крутых откосов, «снизу-вверх» для пологих и «комбинированный», при котором оползень реализуется частично по 1 и 2 сценарию.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается корректной постановкой цели и задач диссертационной работы; использованием при моделировании деформаций пород бортового массива протестированных при решении разнообразных задач отечественных программных комплексов (ПК «Плотина», свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020667291, ПК «Котлован», свидетельство RU 2021613311); положительной оценкой основных результатов исследования на научных конференциях; согласованностью экспериментальных данных на реальных объектах с теоретическими исследованиями; применением современных методов сбора и обработки геопространственной информации (программа для ЭВМ «Деформация», свидетельство RU 2023666272); удовлетворительным согласованием результатов исследований с выводами, полученными другими отечественными и зарубежными исследователями.

#### Апробация результатов:

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: IV всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022 Международная г.), 9-я научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (Донецк, 2023 г.), XI Международная научнопрактическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.), ХХ Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

**Личный вклад автора** заключается в: участии в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении маркшейдерских инструментальных наблюдений на карьерах; проведении моделирования напряженно-деформированного состояния прибортового массива; анализе и систематизации полученных экспериментальных данных; создании трехмерных моделей открытых горных выработок; разработке алгоритмов уточнения цифровых моделей рельефа по облакам точек; анализе и обобщении результатов экспериментальных исследований;

апробации результатов исследований на научных конференциях; написании научных публикаций по теме диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах (пункты списка литературы № 8 - 10, 13, 50 - 51), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение Б).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста, содержит 144 рисунка, 40 таблиц, список литературы из 120 наименований и 3 приложения.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., доценту Мустафину М.Г. за ценные советы и наставления; преподавателям и сотрудникам кафедр инженерной геодезии и маркшейдерского дела Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за всестороннюю помощь на каждом этапе исследования.

# ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ВОПРОСА О НАБЛЮДЕНИЯХ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

#### 1.1 Общие сведения о мониторинге деформаций бортов карьеров

Открытый способ разработки месторождений полезных ископаемых является наиболее эффективным при освоении недр. Это объясняется рядом преимуществ. Производительность труда на карьерах в несколько раз выше, чем при подземной разработке, что вызвано более безопасными условиями работы. Финансовые затраты на строительство карьеров ниже, чем шахт при одинаковой производственной мощности. Потери полезного ископаемого при открытой разработки меньше, а процесс раздельной добычи различных сортов руд проще. Возможностей увеличения производственной мощности предприятия гораздо больше при открытой разработке месторождений, нежели при разработке подземным способом.

Безопасность при разработке месторождений - важнейшая задача профильных специалистов, которые обеспечивают комплексное регулирование состояния производственных рисков. Наиболее опасным вариантом является развитие деформационных процессов массива горных пород, которое может повлечь за собой не только убытки для предприятия, но и огромную угрозу человеческим жизням.

В соответствие с классификацией Фисенко Г.Л., существует 5 видов деформаций: обрушение, осыпь, просадка, оплывина и оползень. Из представленных разновидностей большой интерес с точки зрения их изучений и прогнозирования представляют оползни, являющиеся наиболее сложными, трудоемкими и многофакторными явлениями. Они развиваются в течение длительного периода времени, вследствие чего создают огромные риски для горнотехнического предприятия. Оползни захватывают прибортовой массив объемом от тысяч до миллионов кубических метров и являются самым крупным нарушением устойчивости откосов.

Накопившийся опыт и стремительное развитие технологий создают предпосылки к проведению исследований для совершенствования существующих способов борьбы с оползневыми явлениями. Большим шагом в этом направлении являются вышедшие в 2020 году Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов", в которых подчеркивают важность данного вопроса и регламентируются меры борьбы с оползнями [89].

Классификационные признаки открытых разработок представлены в таблице 1.1

Классификац ионные признаки	Открытые горные выработки													
Разновидност ь	Колодцы Разр		оезы Кан		навь	авы Тј		Тра	раншеи		Карьеры			
Положение залежи относительно земной поверхности	Поверхностн ый вид		стн	Глубинный			H	Нагорный вид		ід І	Нагорно- глубинный вид		Подводный вид	
Основные геометрическ ие параметры	Дли Глубина поло поло у (д		Длин по поло у (дн	на гн у)	Ширина п полотну (ді			Іп	Ширина Уго по верху (		Гол отк бортон (стенок	оса з с)	лощадь оперечн ого сечения	
Виды карьерных полей (полей разреза)	кај	Обширные карьерные поля			Вытянутые карьерные пол					ля	Округлые карьерные поля			
Вилы	Весьма Ма Ма			Maj	алые Ср			едние		Большие		Весьма большие		
карьерных полей	Поверхностн ый	Нагорный	Поверхностн	ЫИ	Нагорный и глубинный	Поверхностн	ый	Нагорный и	глубинный	Поверхностн	ый	Нагорный и глубинный	Поверхностн ый	Глубинный
по размерам в плане	до 0,4 км <sup>2</sup>	до 0,3 км <sup>2</sup>	0,4–2 км²	,0	0,3–1,5 км <sup>2</sup>	2,: 6, КМ	5— ,0 M <sup>2</sup>	1,5- км	-5,0 M <sup>2</sup>	4—2 км	20 1 <sup>2</sup>	4—12 км²	10–40 км²	10–30 км <sup>2</sup>
по конечной глубине	До 20 м	До 40 м	До 4 м	0	40–100 м	До м	60 л	100- м	-200 1	Д 80	O M	100– 250 м	До 120	200- 800 м
по объему горной массы	До млн	10 1. м <sup>3</sup>	]	10— млн	-100 100 н. м <sup>3</sup> мл			)—500 500—2000 н. м <sup>3</sup> Млн. м <sup>3</sup>			2000 1. м <sup>3</sup>	2000–10000 млн. м <sup>3</sup>		
Классы опасности	оі (гор вн выбр газа	I класс II пасности оные удары, п незапные росы пород, а или пыли)			I класс опасности (разработка горной массы 1 миллион куб. метров в год и более)			III класс опасности (разработка горной массы от 100 тысяч до 1 миллиона куб. метров в год)			сти ной яч до б.	IV класс опасности (разработка горной массы менее 100 тысяч куб. метров в год)		
Характеристи ка горных пород	Скальные (прочные)		Нескальные (глин грунти			глини рунты	инистые породы, нты)				Сыпучие (раздельно- зернистые)			
Свойства горных пород	Деф ирус т	Деформ ируемос ть Прочно сть		Твердоо	Гвердость По		Тористос Вла ть нос		паж ость	Пластичное		ность	Полз учест ь	

Таблица 1.1 – Классификационные признаки открытых разработок

В Российской Федерации насчитываются сотни карьеров, крупнейшие из них приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Крупнейшие действующие карьеры Российской Федерации

Название и местоположение	Глубина	Размеры карьерного поля	Открытие	Добыча	Проектная мощность
Карьер «Удачный», г. Удачный, Якутия	640 м	2х1,6 км	1955	Алмазы	4,5 млн. карат в год
Карьер Лебединского ГОКа, г. Губкин, Белгородская обл.	450 м	5х4 км	1967	Железная руда	20 млн тонн в год
Бородинский угольный разрез, г. Бородино, Красноярский край	100 м	7х2 км	1950	Бурый уголь	20 млн тонн в год
Асбестовский карьер, г. Асбест, Свердловская обл.	350 м	11х2 км	1889	Хризолит- асбест	12 млн тонн в год
Карьер "Центральный", г. Кировск, Мурманская обл.	590 м	3,5 км	1954	Апатит- нефелиновые руды	12 млн тонн в год
Карьер «Восточный» ГОК Олимпиада, пос. Еруда, Красноярский край	880 м	1,8х1,7 км	1975	Золоторудное сырье	32,8 млн тонн в год
Карьер «Железный» Ковдорского ГОКа, г. Ковдор, Мурманская обл.	450 м	2,3х1,6 км	1953	Комплексные бадделеито- апатито- магнетитовых руды	16 млн тонн в год
Карьер Юбилейный (п. Айхал, Якутия)	435 м	1,3х0,7 км	1975	Алмазы	5.1 млн. карат в год
Оленегорский карьер, г. Оленегорск, Мурманская обл.	400 м	2,8x1 км	1949	Железная руда	15-16 млн тонн в год
Карьер Медвежий Ручей, г. Норильск, Красноярский край	400 м	Диаметр более 1 км	1945	Медно- никелевые руды	9 млн тонн в год
Коршуновский карьер, г. Железногорск- Илимский, Иркутская обл.	512 м	2,2х2,5 км	1957	Железная руда	600 тыс. тонн в год
Учалинский карьер, Респ. Башкортостан, г. Учалы	360 м	1,8х0,9 км	1954	Медно- колчеданные руды	6 млн тонн в год
Карагайский карьер, Челябинская обл., г. Сатка	370 м	1,5х1,1 км	1900	Магнезит	5 тыс. тонн в год

Проблемой возникновения аварийных деформаций бортов карьеров, в частности оползней, занимаются с начала открытия разработки месторождений полезных ископаемых. Но до сих пор проблема не решена. Несмотря на достигнутые успехи в изучении вопроса, развитие программных и приборных средств, оползни продолжают происходить.

Приведем несколько примеров оползней, происшедших в последние годы. По данным [23] на северо-западном борту Коршуновкого карьера (рисунок 1.1), периодически, начиная с 1975 года, происходят крупные оползни при углах наклона борта 22°. По всем расчетным оценкам скальные осадочные породы, слагающие этот борт, должны обеспечивать его устойчивость при углах 28 – 30° с нормативным запасом устойчивости 1,3.



Рисунок 1.1 – Оползень на Коршуновском карьере (ПАО «Коршуновский ГОК») [23]

В 2015 году оползень произошел на карьере Martha Mine в Новой Зеландии (рисунок 1.2). По данным сайта [55] оползень произошел быстро без каких-либо традиционных признаков, например, смещений на земной поверхности.



Рисунок 1.2 – Оползень, произошедший в карьере Martha Mine на Северном острове Новой Зеландии в 2015 году [55]

В дальнейшем в 2016 году оползень вновь произошел, после чего работы на карьере были остановлены.

Оползни происходят по всему миру. Нельзя не упомянуть один из крупнейших оползней, произошедший 10 апреля 2013 года в Бингем-Каньон, США (рисунок 1.3). При этом приблизительно 65–70 млн. мЗ породы съехало на дно карьера. Причинами послужили сложное геологическое строение и произошедшие толчки землетрясений. Системы раннего оповещения, которые были установлены в карьере, позволили избежать человеческих жертв, но было потеряно большое количество техники, оборудования, подъездных путей и производственных зданий.



Рисунок 1.3 – Оползень, произошедший в карьере Бингем-Каньон в штате Юта (США) в 2013 году [15]

Таким образом, при открытой разработке полезных ископаемых подвижки грунта в виде оползня приводят к разрушению откоса, что влечет за собой риски для персонала, оборудования и инфраструктуры, и в конечном итоге к увеличению производственных затрат и возможному прекращению производства. Единственным решением является совершенствование комплексных программ мониторинга, включающих моделирование поведения откоса, что позволит повысить безопасность горных работ [10, 11, 12, 36].

Прогнозирование и предотвращение опасных деформаций бортов карьера - сложная задача, успешное решение которой зависит от ряда специалистов, работающих на горнодобывающем предприятии:

– Специалистов маркшейдерской службы [70], в обязанности которых входит определение мест проявления и размеров деформаций пород, систематические наблюдения за нарушениями бортов карьеров, прогноз опасности деформационного процесса и разработка на этой основе методов оценки их устойчивости;

– Специалистов геомеханической службы, в обязанности которых входит решение задач, связанных с обследованием карьера для оценки текущей геомеханической ситуации, сбор геомеханических данных о составе откоса с оценкой физико-механических свойств пород, расчет напряженно-деформированного состояния бортов карьера, оценка рисков развития деформаций;

 Специалистов геологических и гидрогеологических служб, занимающихся изучением структуры и условий залегания массива горных пород, слагающих уступы; проводящих по мере отработки месторождения всё более углубленные исследования различных свойств неоднородных пород;

– Специалистов инженерно-технической службы, занимающихся разработкой и выполнением противодеформационных мероприятий.

Отмеченные службы выполняют свои обязанности, однако проблема предотвращения оползней остается нерешенной.

С развитием современного оборудования стало возможным осуществление сбора данных о нестабильности бортов в дистанционном режиме, что делает безопасным сами наблюдения за деформациями опасных зон. Кроме того, передовые компьютерные технологии привели к возможности трехмерного моделирования, которое дает полную и интуитивно понятную визуализацию состояния недр.

Наблюдения за оползневыми очагами делятся на два основных этапа:

1. Выявление оползнеопасных участков.

2. Наблюдения оползневых очагов и разработка мероприятий по их ликвидации.

По первому этапу можно заметить, что выявление на сегодняшний день состоит в выделении участков, которые подвергаются смещениям. При этом заблаговременного зонирования пока не разработано. Особенность наблюдений за деформациями бортов определяется подвижностью зоны наблюдения, что небезопасно. Поэтому большую ценность приобретает организация маркшейдерских наблюдений без нахождения людей в этих зонах.

Существуют два типа наблюдений:

1. Наблюдение за видимыми деформациями бортов, что дает возможность установить размер и форму оползня, а также определить его характер и развитие с течением времени.

2. Наблюдения участков пород без видимых оползневых признаков.

Каждое наблюдение маркшейдером имеет весьма важное значение для накопления опыта и обобщения результатов для последующего обоснования прогноза оползней. По результатам необходимо установить следующие характеристики деформационного процесса:

- характер сдвижения;

- размеры сдвигающего массива;

- поверхность скольжения;

- стадии процесса сдвижения: начальная, активная, затухающая;

- степень опасности деформаций для горных работ.

Контроль деформаций бортов карьеров проводят путем закладки наблюдательных станций. Наблюдения по ним включают в себя нивелирование всех реперов, в том числе опорных, а также измерение расстояний между ними, съемку отдельных уступов, трещиноватости и образовавшихся смещений.

Требования к созданию опорных маркшейдерских сетей, маркшейдерских сетей для наблюдения за деформациями горных выработок отражены в Приказе Ростехнадзора от 19.05.2023 N 186 Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности.

Как известно, пункты маркшейдерской опорной сети, используемые в качестве исходных для определения опорных реперов наблюдательных станций при наблюдениях за устойчивостью бортов карьеров, следует располагать в местах, обеспечивающих их устойчивость на период проведения наблюдений.

Наблюдение за деформациями бортов карьеров с использованием маркшейдерскогеодезических методов в общем виде предполагает закрепление на местности опорных реперов, относительно которых выполняются наблюдения рабочих реперов, по которым судят о величинах сдвижений. Кроме того, выделяют исходные реперы, находящиеся за пределами предметной области и служащие основой для передачи координат на опорные пункты.

Ввиду возможного проявления природных и техногенных факторов влияния [37, 38, 94], вопросу стабильности опорных реперов следует уделять пристальное внимание перед каждым циклом наблюдений за деформациями.

В случае использования линейных, угловых или линейно-угловых измерений проверяется неизменность плановой основы в пределах точности измеренных значений горизонтальных углов и/или линий между опорными пунктами. При выполнении спутниковых измерений контролю подвергается неизменность положения (в пределах погрешностей измерений) уравненных координат пунктов. Контроль устойчивости высотной основы осуществляется измерением превышений внутри кустов реперов и между кустами или сравнением превышений между реперами свободной сети [84]. Известен ряд способов оценки стабильности реперов опорных сетей на основе анализа превышений между реперами по циклам наблюдений: методы В. Карпенко с корреляционным и дисперсионным анализом; методы с принципом неизменной отметки одного из наиболее стабильных реперов опорной сети (методы Костехеля А., Ганьшина В.Н., Стороженко А.Ф., Ботяна Г.К.); методы с принципом неизменной средней отметки всех реперов опорной сети, либо группы наиболее стабильных реперов (методы Черникова В.Ф., Марчака П.). В работе [53] предложено выполнять оценку вертикальных смещений реперов по величине отклонений нормалей элементов деформационной сети текущего и предыдущего циклов наблюдений с вычислением отметок относительно неподвижных элементов сети. В то же время плановой стабильности уделяется меньшее внимание [30]. Упомянутые методы предназначены для оценки стабильности реперов опорных сетей путем в одномерном пространстве.

Маркшейдерские наблюдения выполняют в основном по методике, изложенной в бывшем нормативном документе: «Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости» [32]. В настоящее время активно применяют различные системы мониторинга, включающие перманентные тахеометрические наблюдения, лазерное сканирование и ГНСС-определения.

Одной из важнейших задач маркшейдерской службы является определение положения поверхности скольжения оползня и возможности сползания пород.

Существует ряд теоретических и практических разработок по определению параметров поверхностей скольжения [5, 44, 64]. В основном используют кругло-цилиндрическую поверхность. Возможно также по маркшейдерским наблюдениям на профильных линиях, расположенных в менее устойчивых местах бортов, по векторам перемещений отдельных точек на поверхности системы «откос - земная поверхность» определить расположение плоскости скольжения.

Вместе с тем, на сегодняшний момент вопросы уточнения расположения профильных линий и что предпочтительнее наблюдений откоса или земной поверхности остаются открытыми. Так, например, известно много случаев, когда наблюдательную станцию (профильную линию) располагают в одном месте, а оползень происходит в другом. В научной среде этот факт именуют недостаточным покрытием наблюдений. Такие случаи имели место на отечественных карьерах [3, 33, 34, 75, 98, 100] и на зарубежных. Так, ярким примером может считаться Карьер "Бингем-Каньон" (Юта, США) (рисунок 1.3). На этом карьере мониторинг активнее проводился на южном борту, однако в 2013 году оползень произошёл в зоне, которая считалась подвижной, но не критичной. Тем не менее, наблюдения позволили вовремя предупредить людей и избежать человеческих жертв.

Настоящее исследование опирается на вышеизложенные результаты и ставит целью совершенствование методики наблюдения за деформациями бортов карьеров с учетом результатов изучения стадий протекания оползя.

# 1.2 Обзор исследований и нормативно-методической документации по обеспечению устойчивости бортов карьеров

Созданием отечественной научной школы и многолетнего задела по данному вопросу научная общественность обязана, прежде всего, трудам Фисенко Г.Л. [45, 90]. Его исследования продолжили многочисленные соратники и последователи, в числе которых необходимо выделить таких ученых как: Попов И.И., Ревазов М.А., Певзнер М.Е., Сапожников В.Т., Борщ-Компониец В.И., Туринцев Ю.И., Зотеев В.Г., Шпаков П.С., Окатов Р.П., Низаметдинов Ф.К., Мочалов А.М., Ермаков И.И., Бахаева С.П., Жабко А.В., Мустафин М.Г. и др.

Первые нормативные документы, посвященные устойчивости карьерных откосов, были созданы в 1962 году по результатам исследований геометрических параметров бортов карьеров и откосов отвалов специалистами Всесоюзного научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела (ВНИМИ) под руководством Фисенко Г.Л. В Инструкции по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости [32] впервые был предложен комплекс маркшейдерских и инженерно-геологических наблюдений с учетом технологий и существующих методов, развитых на тот момент времени. Рекомендуемый состав работ позволял предотвращать нарушения устойчивости откосов и обеспечивать безопасность работ на действующих карьерах. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов совершенствовалась, в 1987 году вышел ее вариант, содержащий в себе аспекты, касающиеся современных методов наблюдений, которые не были учтены ранее [31]. Оценка устойчивости бортов предусматривала следующий порядок:

 определение прочностных и деформационных характеристик горного массива, а именно сцепления и угла внутреннего трения;

- определение величин смещений по реперам;

 вычисление коэффициента запаса устойчивости борта по наиболее напряженной поверхности, как отношение суммы удерживающих сил к сдвигающим;

– сравнение наблюдаемых деформаций с деформациями пород массива.

Последним нормативом, разработанным во ВНИМИ, являлись «Правила обеспечения устойчивости на угольных разрезах» [66]. Ими пользовались специалисты не только угольной промышленности, а всей горнодобывающей отрасли при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом вплоть до 2020 года. На сегодняшний день основным действующим документом, регламентирующим оценку устойчивости бортов карьеров, является приказ N 439 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» от 13 ноября 2020 года (ФНП) [89]. Они включают в себя весь комплекс маркшейдерских, технологических, инженерно-геологических, гидрогеологических наблюдений, необходимых для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, а также описание противодеформационных мероприятий [72, 73].

В документе представлены требования к расчету устойчивости бортов, включающие в себя определение параметров уступов и откосов известными методами, а именно: метод предельного равновесия; метод численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород; вариационный метод. Допускается апробация новых средств и технологий, отличных от предписанных в проектной документации, после проведения опытно-промышленных испытаний, а также распространение результатов на объект эксплуатации с учетом его районирования.

В правилах к составу работ по мониторингу устойчивости бортов обозначен комплекс маркшейдерских работ, который должен включать в себя инструментальные наблюдения для выявления зон деформаций. Допускается определение участков ослабления методами фотограмметрии, лазерного сканирования и дистанционной съемки. По результатам съемки данные участки недр, границы которых обладают одинаковыми инженерно-геологическими характеристиками, должны быть выделены на плане либо на трехмерной модели.

При обосновании безопасности ведения работ на открытых горных выработках следует учитывать прочностные и деформационные свойства пород, изменение углов откосов с течением времени, выявление локальных участков деформаций в бортовых массивах.

Применительно к открытым горным выработкам, как указано в «Правилах охраны сооружений природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях» [61] при строительстве карьеров в зонах влияния ранее пройденных выработок следует учитывать возможные изменения физико-механических свойств пород [19, 68, 85]. Также в документе отмечается необходимость выявления зон опасного влияния при ведении горных работ под оползневыми откосами, а также определения основных факторов, влияющих на размеры зон влияния подземных разработок, величины и характер деформаций, скорости роста деформаций и продолжительность процесса сдвижения горных пород и земной поверхности. Нормативный документ раскрывает основные правила подработки оползневых откосов. Если подземные горные работы подрабатывают оползневой склон со стороны падения, а граница зоны опасного влияния подземных разработок со стороны восстания находится в пределах оползневого откоса, то за границу зоны опасного влияния со стороны восстания

принимается точка выхода на поверхность плоскости скольжения оползня. Если подземные горные работы подрабатывают оползневой склон со стороны восстания и граница зоны опасного влияния подземных горных разработок со стороны восстания находится вне оползневого тела, то границы зоны опасного влияния от подземных выработок определяются независимо от влияния оползня.

Анализируя нормативно-методическую литературу, касающуюся устойчивости бортов карьеров, можно сделать вывод, что научные исследования в основном касались вопросов, связанных с двумерным массивом данных. В то время, как проблема состоит в определении мест, где возможны проявления оползней, требуются решения уже с точки зрения трехмерного пространства. В Методических указаниях 2022 года [44, 46] рекомендуется использование трехмерного моделирования для оценки устойчивости бортов карьеров в тех случаях, когда существуют сложные и нестандартные горнотехнические и инженерно-геологические условия [41, 74, 91]. Вместе с тем нет практических рекомендаций по местам заложения комплексных наблюдательных станций.

Методы трехмерного мониторинга представлены в Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов (2022 г.) и включают в себя:

- Системы лазерного сканирования, которые предназначены для определения изменения геометрических параметров бортов карьеров с течением времени, трещиноватости массива, а также мониторинга смещений горных пород в автоматическом режиме;

- Фотограмметрический мониторинг, который также позволяет определить изменение геометрии бортов со временем;

- Радарный мониторинг предназначен для контроля оседаний больших площадей земной поверхности и отличается от выше представленных методов более высокой точностью.

Многие прикладные вопросы, связанные с использованием методов обработки измерений, цифровым моделированием, прогнозированием опасных явлений, отнесены на выбор исполнителя. Поэтому актуальность совершенствования методики наблюдений и оценки устойчивости бортов карьеров не вызывает сомнений.

Как отмечено ранее, нередко наблюдают за деформациями в одном месте, а оползень происходит в другом. С этим, несомненно, связан и тот факт, что в Методических указаниях 2022 [46] предлагаются методы регионального характера, такие как радарный мониторинг. Однако здесь следует сделать несколько замечаний. Радарный мониторинг может себе позволить не каждый карьер ввиду дороговизны методики, необходимости использования специального программного обеспечения и достаточного количества космоснимков. В этой связи представляется перспективным более традиционный подход, связанный с изучением особенностей прибортового массива и выделением наиболее опасных зон. Их локализация возможна на основе объемной модели, что предусматривается в настоящих исследованиях.

Другим важным моментом при рассмотрении вопроса об оценки устойчивости борта карьера и совершенствовании наблюдений является разделение оползней по механизму протекания. На это обстоятельство обращали внимание многие исследователи [21, 27, 95, 96]. Их выводы сводятся к изучению устойчивости откосов на основе геомеханического анализа. Ряд оползней протекает по традиционному сценарию, то есть с образованием отрыва на земной поверхности и сползанием тела оползня по плоскости скольжения. При этом на начальных стадиях откос у нижних уступов деформируется незначительно. Примером может служить оползень на карьере Бингем-Каньон (рисунок 1.3). На рисунке видны площадки отрыва и сформированная перемещением тела оползня плоскость скольжения, а также показан вид поверхности уступа, обуренного скважинами для проведения взрывных работ. На практике наблюдается также и другой сценарий: откос борта карьера на нижних уступах испытывает большие деформации, которые как бы «подрезают» борт снизу и далее ситуация переходит к первому (традиционному сценарию), но при этом оползень реализуется значительно быстрее и в этой связи практически не прогнозируется по результатам измерений смещений реперов на земной поверхности. Примерами могут служить оползни, происходящие на северо-западном борту Коршуновского карьера и карьере Martha Mine (рисунки 1.1, 1.2). Безусловно, сценарий этих оползней отличается традиционных представлений, поэтому требуется проведение дополнительных исследований для объяснения и учета этих сценариев при прогнозной оценке.

Современные методы мониторинга деформаций бортов карьеров, включающие использование электронных средств, таких как ГНСС-технологии, радарная интерферометрия, лазерное сканирование, БВС (беспилотные воздушные судна) и роботизированные тахеометры, широко применяются при открытых горных работах [46], однако геомеханическая интерпретация полученных результатов и обоснование их использования требуют усовершенствования. Важные вопросы обеспечения устойчивости бортов, такие как выявление потенциально оползнеопасных зон (ПООЗ) борта карьера, которые позволят уточнить места расположения наблюдательных станции, установление характера формирования оползня (сценарий развития, механизм), изучены пока не в достаточной мере. Продвижение исследований в вопросе механизма протекания оползня, с одной стороны, позволит внести уточнения по размерам возможного оползневого массива, как по нормали к борту, так и по простиранию. При этом размер по нормали к борту (ширина призмы обрушения [44]), безусловно, следует определять по результатам оценки напряженно-деформированного

состояния (НДС) прибортового массива, в которой интегрально учитываются как геометрические параметры, так и его физико-механические свойства. Другим не менее важным вопросом следует считать определение характера формирования оползня или сценария разрушения пород, определяющего деформации и чувствительные зоны борта карьера, которые эффективно использовать для оценки и контроля при маркшейдерских наблюдениях. Отмеченные обстоятельства представляются весьма актуальными в связи с постоянной опасностью аварий, которые при оползнях приносят огромный ущерб производству [24].

Своевременное прогнозирование оползня - достаточно сложная задача, решению которой посвящено много исследований. Павлович А.А. в своих работах [6, 48, 57, 92] приводит факторы, влияющие на прочностные свойства массива горных пород и дает прогноз вероятных деформаций. В его исследованиях приведены результаты моделирования и оценки на основе метода конечных элементов границ распространения относительных горизонтальных деформаций с учетом структурных особенностей массива, а также прочностных и деформационных свойств различных литологических разностей, слагающих борт карьера. Панченко А.В. [58, 59, 60] разработал методику оценки устойчивости борта карьера с учетом криволинейности его границ. В его работах проведен анализ трехмерного напряженнодеформированного состояния прибортового массива пород и качественно определены зоны возможных оползней. Санникова А.П. [22, 76] свои исследования посвятила разработке методики оценки устойчивости бортов карьеров на основе их трещиноватости. Исследования Чебакова А.В. [93] основаны на изучении устойчивости бортов глубоких карьеров, а также влияния инженерно-геологических и гидрогеологических условий на деформирование бортов. Автор приходит к выводу о возможном разнообразии плоскостей скольжения, что представляется важным и направляет к продолжению изучения вопроса о сценариях оползневого процесса.

В работах [1, 2, 21, 27, 28, 95, 96] приводится достаточно полное описание развития маркшейдерских методик по оценке устойчивости бортов карьеров. Указывается на недостаток оценки устойчивости борта карьера на основе теории предельного равновесия, состоящий в том, что ширина призмы оползня определяется несколько с заниженными значениями. В работах [47, 48] показаны альтернативные подходы ее определения, которые позволяют получить иные значения заданного параметра. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть данный вопрос на основе оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Вместе с тем вышеперечисленные работы, несмотря на их значимость и вклад в изучение устойчивости бортов карьеров, не содержат конкретных рекомендаций по

наблюдениям за деформированием прибортового массива, включающих выделение потенциально опасных зон и учет сценария оползневого процесса.

#### 1.3 Анализ методов расчета устойчивости бортов карьеров

В нормах проектирования карьеров [44] решению вопросов обеспечения устойчивости большое внимание. В них откосов уделяется подчеркивается, что организация, эксплуатирующая объект ведения открытых горных работ, должна обеспечить контроль за соблюдением проектных параметров бортов и уступов карьера; проводить визуальные и инструментальные наблюдения за состоянием бортов, уступов и откосов; выявлять зоны и участки возможного проявления разрушающих деформаций; организовывать на этих участках стационарные инструментальные наблюдения и (или) дистанционный мониторинг; изучать выявленные нарушения устойчивости бортов, уступов, откосов; документировать нарушения; устанавливать характер нарушений, степень опасности, причины возникновения и др.

Направления решений обозначенных вопросов во многом представлены в Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов [46]. Приведены примеры проведения маркшейдерских наблюдений по профильным линиям, а также организация мониторинговых наблюдений всего карьера со стационарных тахеометрических станций.

В национальном стандарте Российской Федерации [20] предлагается использовать численные методы для решения задачи устойчивости откосов, что позволяет оценивать ее как в дифференциальной форме (через напряжения в точке), так и в интегральной (через усилия по поверхности скольжения).

Накопленный за многие годы опыт решения проблем нестабильности откосов привел к разработке нескольких методов устойчивости бортов карьеров и разрезов на различных этапах их проектирования и отработки. Эти методы разделяют на теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Теоретические методы основываются на математическом моделировании поведения горных пород и учитывают множество факторов, таких как геометрия склона, свойства пород, нагрузки и т.д.

Эмпирические методы основываются на опыте и наблюдениях за реальными объектами. Они используются для оценки устойчивости склоновых систем на основе статистических данных и опыта прошлых работ.

Полуэмпирические методы сочетают в себе элементы теоретических и эмпирических методов. Они используются для моделирования поведения горных пород в различных условиях и оценки устойчивости склонов на основе экспериментальных данных.

В целом, выбор метода зависит от конкретной задачи и доступности данных. Комбинация различных вариантов может дать наиболее точную оценку устойчивости склона и рисков, связанных с горными работами.

Методы, представленные в нормативно-технической документации, включают в себя: методы аналогий; методы, основанные на теории предельного равновесия; численные и вариационные методы; методы физического моделирования и специальные исследования.

Определение параметров бортов и уступов методом аналогий допускается на этапе предпроектных работ по решению специализированной организации. При помощи данного метода определяются физико-механические свойства массива горных пород, параметры бортов и уступов карьеров. Из основных требований к аналогии выделяют сопоставление одних и тех же признаков; необходимость разделения признаков по значимости (весу); их разнообразие и разносторонний характер и т.д. Признаки зависят от следующих показателей: регионального положения, условия образования месторождения, типа полезного ископаемого, описания пород (тип, прочность пород и т.д.), строения месторождения, геометрических характеристик и т.д.

Методы, основанные на теории предельного равновесия, используются для обнаружения поверхностей ослабления и определения прочностных свойств горных пород. Данный метод носит обязательный характер на всех этапах проектирования месторождения, исключая лишь предпроектные работы. В настоящее время существуют сотни способов приема расчета устойчивости бортов, основанных на методе предельного равновесия, это связано с многообразием горно-геологических и горнотехнических условий.

В нашей стране наибольшую апробацию прошли методы алгебраического или векторного сложения сил (многоугольник сил), а также методы, удовлетворяющие трем уравнениям равновесия (сил и моментов).

В отличие от методов предельного равновесия численные и вариационные методы охватывают большую область интересов при решении горнотехнических задач. Численным моделированием допускается определять параметры напряженно-деформированного состояния прибортового массива.

Метод физического моделирования основывается на теории подобия. Предусмотренная схожесть модели с натурой по физической природе, но с изменением масштаба, позволяет определять прочностные и деформационные свойства горных пород.

Специфика горнотехнических и горно-геологических условий при открытой разработке повлекла за собой создание многочисленных методов расчета устойчивости бортов. К настоящему времени их насчитывается более 150 [62, 63, 64]. Эти методы классифицируются по общим признакам, приведем некоторые из них:

Способ расчета зависит от формы поверхности скольжения [90];

– Выбор метода опирается на подходы к решению задач (эмпирических и теоретических) и способу их решения, а также по способу определения поверхности возможного обрушения;

 Методика паспортизации деформаций откосов, основанная на анализе существующих видов деформационных процессов на карьерах;

– Методы, включающие в себя определения параметров устойчивости откосов.

Наиболее широкое применение на практике получил метод Г.Л. Фисенко, основанный на представлении поверхности скольжения в виде сочетания отрезков, окружностей и прямых. При данном расчете оценка устойчивости по поверхности скольжения представляется в плоской постановке. Данный метод учитывает такие параметры, как геометрическая форма борта карьера, условия деформационных процессов, величина и направление действующих сил.

Важным параметром при расчете устойчивости прибортового массива служит ширина призмы сползания – т. Расчет сил, сдвигающих горный массив (призму) по ней, напрямую зависит от объема призмы, на который значительно влияет данный параметр т.

Выражение, по которому определяется m включает угол откоса, его высоту, размер возможного закола и угол внутреннего трения пород. В методических указаниях [44] m рассчитывается по формуле (1.1):

$$m = \frac{2H\left[1 - ctg\alpha * tg(\frac{\alpha + \varphi_n}{2})\right] - 2H_{90}}{ctg(45 - \frac{\varphi_n}{2}) + tg(\frac{\alpha + \varphi_n}{2})},$$
(1.1)

где:

 $\alpha$  – угол откоса, град;

Н – высота откоса, м;

*H*<sub>90</sub> – вертикальная трещина отрыва, м;

 $\varphi_n$  – угол внутреннего трения с введенным коэффициентом запаса.

Поверхность скольжения для однородного откоса принимают близкой к круглоцилиндрической.

Схема построения плавной криволинейной поверхности скольжения представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Схема построения плавной криволинейной поверхности скольжения ( $\alpha$  – угол откоса, град.; Н – предельная высота откоса, м;  $H_{90}$  – вертикальная трещина отрыва, м;  $\varphi_n$  – угол внутреннего трения, град)

Анализируя представленную формулу, можно сделать вывод, что расстояние, на котором возможно формирование закола (-ов) вычисляется по одному физическому параметру углу внутреннего трения пород. С точки зрения теории предельного равновесия все выглядит довольно корректно, в особенности к формированию площадок скольжения у земной поверхности под давлением веса пород. Вместе с тем по Методическим указаниям площадка у нижней бровки откоса формируется под углом 45- $\varphi$ /2 от поверхности откоса в сторону массива. При этом важно знать направление действия сил, определяющих эту площадку, так как по ней выделяется плоскость скольжения и параметр т. Автором представляется, что т более надежно определять по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород. На альтернативное определение параметра т указывается в и других работах [25, 47, 95].

# 1.3.1 Натурные способы оценки геомеханического состояния горных пород

Натурные способы оценки являются неотъемлемой частью изучения геомеханического состояния горных пород, поскольку данные методы достоверно выявляют процессы и факторы, влияющие на механизм изменения поведения массива. Они помогают выяснить механизм изучаемых процессов, выделить доминирующие факторы и оценить важные параметры. При выборе натурных способов учитываются природные и горнотехнические условия, типы деформаций, скорости и масштабы их развития. Определяется также периодичность и точность проведения наблюдений.

Разнообразные методы контроля состояния горных массивов применяются в различных условиях эксплуатации горнодобывающих предприятий [65]. Основным назначением этих

систем является получение информации для расчетов и оценки устойчивости горных выработок и безопасного проведения технологических работ. Одной из первых таких систем стала информационно-вычислительная машина оперативного контроля и прогнозирования горного давления, разработанная Ленинградским горным институтом и институтом ВНИМИ. Система находится в опытно-промышленной эксплуатации на руднике Каула-Котсельваара (ГОК "Печенганикель") с 1973 года и выполняет функции сбора и регистрации оперативной информации о напряженно-деформированном состоянии горного массива, передачи результатов измерения параметров горного давления в вычислительный центр, обработки полученных данных на ЭВМ и передачи на рудник результатов оценки и прогнозирования состояния горных выработок, а также рекомендуемых мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации выработок на разных стадиях их деформации.

Для оперативного мониторинга геомеханического состояния массива используются две группы методов: прямые деформационные методы, которые измеряют деформации пород и их производные, такие как перемещения, наклоны, кривизну, конвергенцию, нагрузки или напряжения; и косвенные методы, основанные на геофизических измерениях, в основном сейсмических и сейсмоакустических, а также электрометрических, ультразвуковых, радиометрических и гравиметрических.

К прямым методам можно отнести инструментальные маркшейдерско-геодезические наблюдения. Они включают в себя тахеометрические наблюдения, спутниковую съемку, лидарную съемку, съемку с помощью БВС. Инструментальные маркшейдерские наблюдения позволяют выявлять зоны сдвижения и их геометрические характеристики.

Визуальные наблюдения также относятся к натурным способам и являются важным инструментом для изучения процессов геомеханики в горных породах. Они позволяют получить первоначальные данные о формах проявления изучаемых процессов и оценить механизм их развития. В сочетании с другими методами, такими как инструментальные измерения и аналитические расчеты, визуальные наблюдения позволяют получить полную и достоверную информацию о состоянии горных пород, а также принять правильные решения по их использованию и эксплуатации.

# 1.3.2 Методы моделирования на эквивалентных материалах

Метод моделирования на эквивалентных материалах (МЭМ) был предложен сотрудником ВНИМИ Кузнецовым Г.Н. в 1936 году и основывался на создании физических моделей горных массивов, которые по своим плотностным и прочностным характеристикам соответствовали бы горным породам в массиве при принятом геометрическом масштабе.

МЭМ позволяет проводить эксперименты на моделях горных массивов в лабораторных условиях и получать данные о поведении пород при различных нагрузках и условиях, что дает

возможность спрогнозировать поведение массива и вовремя организовать противодеформационные мероприятия непосредственно на реальном горнотехническом объекте.

Основными условиями, которые должны быть выполнены для создания моделей, являются условия геометрического, кинематического и динамического подобия. Геометрическое подобие - это условие, при котором геометрические размеры модели и реального объекта должны иметь одинаковые пропорции. Кинематическое подобие - условие, при котором движения модели и реального объекта должны быть подобными. Это означает, что скорости и ускорения всех точек модели и реального объекта должны быть пропорциональны друг другу. Динамическое подобие - это условие, при котором массы, жесткости, демпфирования модели и реального объекта должны иметь одинаковые пропорции.

Лабораторные исследования направлены на поиск материалов, которые могут быть легко обработаны и имеют физико-механические свойства, сходные с горными породами. Важно также, чтобы безразмерные константы, такие как коэффициент Пуассона и угол внутреннего трения были одинаковыми для эквивалентного материала и натурных горных пород.

Существует четыре группы эквивалентных материалов на основе различных связующих веществ. Первая группа обладает упруго-пластичными свойствами, вторая группа имеет хрупкий характер разрушения, третья группа сочетает в себе упруго-пластичные и хрупкие свойства, четвертая группа основана на смолах естественного происхождения и наделена свойствами хрупких материалов.

Для контроля состояния горных массивов в различных условиях эксплуатации горнодобывающих предприятий используются разнообразные методы. Один из таких методов - построение функциональных зависимостей изучаемых параметров от изменения горногеологических и горнотехнических условий. Представление этих зависимостей в виде относительных показателей позволяет обработать результаты исследований и сравнить их с результатами натурных наблюдений. Одним из преимуществ метода является возможность проведения экспериментов в контролируемых условиях для изучения различных аспектов поведения горных пород, таких как деформация, трещинообразование и разрушение.

Однако метод МЭМ также имеет свои ограничения. В частности, он не учитывает все факторы, которые могут влиять на поведение реальных горных пород, такие как геометрия массива, геологические процессы, обводненность, стихийные бедствия и т.д. Кроме того, создание физических моделей может быть дорогостоящим и требовать больших затрат времени.

Тем не менее, метод МЭМ остается важным инструментом для изучения поведения горных пород и может быть использован в сочетании с другими методами моделирования для получения более точных результатов.

## 1.3.3 Расчетные методы: метод конечных элементов и другие

Для анализа напряженно-деформированного состояния в горных породах используются различные численные методы, такие как метод конечных разностей и метод граничных элементов. Они позволяют создавать точные модели объектов с разной геометрической структурой и проводить расчеты НДС массива горных пород, в том числе вмещающих карьер [4, 18, 28, 69, 120].

Метод граничных интегральных уравнений [29] основывается на формулировании граничных условий и решении задачи о НДС внутри рассматриваемой области. Этот метод эффективно применяется для анализа напряжений и деформаций с ограниченным количеством границ. При большом количестве границ, например включения, дефекты, выработки и т.д. необходимо сформулировать для каждой границы интегральное уравнение. Понятно, что это не простая задача.

Метод конечных разностей основывается на дискретизации области расчета на сетку и численном решении уравнений НДС в каждой точке этой сетки. Данный метод применяется для анализа деформаций и напряжений в горных породах при различных условиях нагружения [25, 68, 69]. Ограничения метода состоят в строгой прямоугольной сетке модели и следовательно сложности описания объектов сложной формы.

Метод конечных элементов (МКЭ) [18, 97] основывается на разбиении объекта на конечное число элементов. Составляется уравнение НДС для каждого элемента и далее система уравнений. Этот метод позволяет моделировать сложные геометрические формы объектов и анализировать их поведение при различных условиях нагружения. Кроме того, МКЭ позволяет учитывать неоднородности материала и различные типы граничных условий, что делает его очень гибким инструментом для анализа поведения объектов в различных условиях.

На сегодняшний момент метод конечных элементов стал стандартом при решении задач о НДС. Существует ряд программных комплексов (ПК) по реализации МКЭ для разных инженерных задач: PLAXIS, Cosmos, Nastran, Ansys и др. [17, 18]. Надо заметить, что в основном эти ПК зарубежного производства. В работе используется отечественная разработка ПК «НЕДРА» [49].

# 1.4 Организация маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров

По сей день основной методикой для мониторинга устойчивости бортов карьеров являются наблюдения по профильным линиям, которые закладываются на наиболее ослабленных участках борта [44]. Профильные линии состоят из опорных и рабочих реперов и

проводятся по всему карьеру, включая как противоположные борта, так и подошву. Протяженность профильной линии при предельно допустимых углах наклона бортов (коэффициент запаса устойчивости 1,2–1,3) и без учета опорных реперов на поверхности должна быть не менее 1,5H, где H – глубина карьера.

Опорные реперы закладываются вне зоны деформаций, их количество должно быть не менее двух на каждой стороне профильной линии. Расстояние между опорными реперами не менее 20 м.

Закладка опорных реперов осуществляется исходя из требований безопасности нахождения наблюдателя в зоне деформаций. На каждой площадке уступа должно быть заложено не менее двух реперов – один вблизи бровки уступа, второй – у подошвы вышележащего уступа. Расстояние между реперами на участке призмы возможного обрушения – 5 - 10 - 15 м, при удалении от верхней бровки карьера – от 15 до 30 м.

Исходные реперы, к которым привязываются все опорные реперы, должны быть заложены одновременно с закладкой наблюдательных станций. Количество исходных реперов должно быть не менее трех. Закладка производится в местах, которые смогут обеспечить неизменность их положения в течение эксплуатации карьера, таким образом реперы должны находиться за пределами зон оседания земной поверхности под влиянием горных работ.

В настоящее время для этих задач используют маркшейдерско-геодезическое оборудование для избирательных наблюдений с высокой точностью. Применяют цифровые нивелиры, электронные тахеометры, спутниковые приемники. Перспективной альтернативой в ряде случаев представляются методов на основе инклинометров, тензодатчиков и т.д.

Как указано в [44] на выбор метода мониторинга влияют как масштабы прогнозируемых деформаций, так и скорость их протекания. Для малых масштабов (до 1000 куб. м) и быстрых смещений (часы, дни) достаточно визуальных наблюдений, в дополнение к которым применяется радарный мониторинг. Для крупных масштабов (более 1000 куб. м) и относительно медленных смещений (дни, недели, месяцы) мониторинг осуществляется инструментальными методами наблюдений.

При проведении спутникового мониторинга реперы располагают в деформационной зоне и периодически осуществляют контроль их пространственного положения относительно базовой станции.

Призменный мониторинг заключается в определение трехмерных векторов смещений при наблюдениях электронным тахеометром стационарно установленных отражательных призм.

Основные сведения о маркшейдерском мониторинге устойчивости бортов карьеров сведены в таблицу 1.3

Цель мониторинга	Объект мониторинга	Тип деформаций	Методы мониторинга	Периодичность и точность наблюдений
<ol> <li>Обеспечение безопасности ведения горных работ;</li> <li>Заверка проектных параметров;</li> <li>Обнаружение первичных признаков развития деформаций;</li> <li>Разработка мероприятий по локализации деформаций для исключения или снижения вредных и опасных воздействий этих деформаций</li> </ol>	Борта карьеров, участки бортов, уступы, отвалы, откосы отвалов	Обрушения, просадки, оползни, осыпи, комбинирован ные обрушения	<ol> <li>Визуальный;</li> <li>Инструмента льный:</li> <li>спутниковый;</li> <li>линейно- угловых измерений, призменный;</li> <li>лазерный;</li> <li>упрощённый</li> </ol>	1. Ежемесячно, с записью в журнале; 2. В зависимости от скоростей смещения бортового массива, но не реже 2-х раз в год с точностью не ниже ±15 мм для бортов карьеров, ±30 мм для отвалов и не ниже ±5 мм на 20-метровом интервале – для упрощённых.

Таблица 1.3 – Методы мониторинга устойчивости

Периодичность инструментальных наблюдений в зависимости от скоростей смещений

представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Периодичность наблюдений за состоянием откосов карьеров

Скорость смещения, мм/сут	Периодичность наблюдений, сут
0,1-0,5	365 (1 раз в год)
0,5 - 1,0	180 (2 раза в год)
1,0 – 2,0	90 (ежеквартально)
2,0-5,0	45
5,0-10,0	15
10,0 – 20,0	7-8
20,0 и выше	3-4

Обнаружение и идентификация возможных предвестников быстрых оползневых событий (начальный наклон оползня, ускорение движущихся масс, псевдоожижение) требует высокочастотного мониторинга и очень высокой точности измерений перемещений. Для мониторинга смещения поверхности наземные методы позволяют получать данные с точностью на уровне первых миллиметров. Однако эти методы обеспечивают только локальное измерение деформации и, следовательно, низкое пространственное разрешение. В этом контексте наблюдения с помощью ГНСС-приемников могут рассматриваться в качестве

эталонного метода из-за возможности высокой точности определения местоположения за небольшие временные затраты в любые погодные условия.

В то же время существуют возможности расширения области исследования за счет более современных методов анализа пространственного положения в трехмерном пространстве [51, 54, 55]. К ним относят лидарные съемки, цифровую фотограмметрию, радарную интерферометрию.

# 1.5 Цифровое моделирование открытых горных выработок

Перечень маркшейдерско-геодезических работ на современном этапе ориентирован на применение высокопроизводительных приборных средств и программного обеспечения (ПО). В последние годы существенно изменился вид выходной продукции при отображении рельефа и ситуации местности. Все более востребованным становится их представление в виде цифровых моделей, что позволяет наиболее реалистично изображать исследуемую территорию, а также решать различные актуальные задачи: контролировать геометрические параметры объектов съемки, получать цифровые топографические планы, создавать геоинформационные системы (ГИС), анализировать площади поверхностей и считать объемы, вести планирование дальнейших работ и т.д [101, 102, 103, 104, 105, 106].

Анализ геопространственных данных, из которых необходимо извлекать полезную информацию об открытых горных выработках становится все более необходимым по мере увеличения объема добычи полезных ископаемых. Трехмерные модели объектов на сегодняшний день предоставляют информацию высокого качества, точности и детализации, которая важна для решения проблем, связанных с уменьшением опасностей на карьерах, управлением ресурсами, разведкой полезных ископаемых, рассеиванием загрязняющих веществ и другими вопросами. Кроме того, современная нормативно-методическая документация регламентирует выполнение районирования открытых горных выработок по степени возникновения оползнеопасных процессов. Данная процедура также должна выполняться на основании актуальной трехмерной модели объекта [46].

Для решения большинства тематических задач используются следующие варианты моделей: нерегулярная триангуляционная сеть (TIN), регулярная сеть (GRID), контурное представление в виде набора изолиний и растровый вид.

При наличии топографических планов горнотехнических объектов их можно преобразовать в трехмерную модель путем включения в нее изолиний, блоков высотных отметок, структурных линий и других объектов чертежа. Для этого сейчас широко используется соответствующее программное обеспечение, например NanoCAD/Autodesk AutoCAD Civil 3D.

Однако, с учетом постоянной эксплуатации карьера меняется и его геометрический облик, что важно учитывать при моделировании. В этой связи, возникает необходимость

использования систематических маркшейдерско-геодезических измерений. Дополнительно детально отслеживается процесс развития горных работ, что важно для решения вопросов эффективного планирования и обоснования корректировок. Но больший вес имеет оценка безопасности условий освоения недр и зонирование горнотехнического объекта по степени опасности на предмет разрушений различного рода, в первую очередь, возникновения оползней [39, 77, 79, 94].

Вместе с тем, многие прикладные вопросы, связанные с использованием выбора методов измерений, цифрового моделирования, прогнозирования опасных явлений отнесены на выбор исполнителя.

В Приказе Ростехнадзора от 19.05.2023 N 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности» согласно пункту 48 [67], съемка горных выработок (элементов системы разработки) месторождения (россыпи) производится в масштабе не мельче 1:2000. Если площадь разрабатываемой за месяц части россыпи не превышает 3000 м<sup>2</sup>, съемка выполняется в масштабе 1:1000.

Плотность и детальность съемки при использовании избирательных измерений (тахеометрических или спутниковых) традиционно учитывались исходя из требований нормативной документации:

- каждые 20-30 м по бровкам для масштаба 1:1000 и 30-40 м для масштаба 1:2000;

- погрешности нанесения пикетов на план не должны превышать 0.5 мм в масштабе плана, т.е. 50 см для масштаба 1:1000 и 100 см для масштаба 1:1000;

- средние погрешности съемки рельефа относительно ближайших точек съемочного обоснования не должны превышать 1/3 от принятой высоты сечения рельефа, так для сечения 0,5 м это 17 см, для сечения 1.0 м - 33 см.

На выбор метода съемки для последующего моделирования открытых горных выработок обычно влияют следующие критерии: оперативность сбора данных, точность измерений, возможность трехмерной визуализации, вариативность результатов, экономическая составляющая, простота камеральной обработки.

Традиционно координаты характерных элементов карьеров получают с помощью спутниковых определений и тахеометрическим методом. Данные технологии, являясь обязательными в повседневной работе маркшейдера, позволяют избирательно фиксировать точки и структуры рельефа, что способствует однозначной трактовке результатов, то есть «полевик» при съемке визуально оценивает важность того или иного пикета. ЦМР тогда включает ограниченный набор точек с известными координатами в трехмерном пространстве. По своей сути модель будет основываться на минимализме возможной интерпретации результатов измерений.

В то же время, ручные методы съемок активно вытесняются автоматизированными. К последним относятся: наземное лазерное сканирование (НЛС), воздушное лазерное сканирование с беспилотных воздушных судов (БВС), стереофотограмметрическая съемка с БВС. Несмотря на неизбирательный, а сплошной характер измерений, перечисленные методы позволяют собрать данные об объекте значительно быстрее и детальнее. Несмотря на определенные технологические различия, у них есть общее свойство, ведь в результате предварительной обработки данных получается облако точек – наиболее информативный и оперативный вариант получения цифрового дубликата объекта исследования.

# 1.6 Существующая методика моделирования рельефа по облакам точек

Сложившаяся общая методика моделирования рельефа объектов горной промышленности по данным автоматизированных методов съемки представлена на рисунке 1.5. Опишем ее основные моменты, важные для дальнейшего совершенствования.



Рисунок 1.5 – Схема общей методики моделирования рельефа по автоматизированным методам

Для всех автоматизированных методов съемки методически важно выделять этап предварительной обработки [52]. Он занимает промежуточное положение между полевыми и камеральными работами. На этом этапе производятся такие операции, как конвертация данных, фильтрация, приведение в единую систему координат, регистрация (уравнивание) съемочных блоков, классификация точек, пересчет в нужную систему координат, построение ортоизображений и ЦМР, нарезка на участки, экспорт данных и др. Важность выделения этого этапа состоит в следующем: несмотря на то, что это некий набор автоматизированных операций, его выполнение тесно связано с полевыми работами и во многом зависит от компетенции оператора. В результате предварительной обработки данных получаются

материалы в общепринятых форматах, которые служат основой для моделирования объектов съемки. Представляется, что повышение качества цифровой модели рельефа должно особенно относиться к этому этапу.

Классификация точек лазерных отражений – наиболее важный этап автоматизированной обработки облака. Он подразумевает разделение точек на классы по вероятной принадлежности к определенному типу объектов. Чаще всего для классификации используется исключительно анализ взаимного положения (геометрии) точек относительно соседей [103, 107, 108]. Важнейшим этапом классификации является выделение точек класса «земля». В этом случае сначала отбраковываются шумы, а затем модель разбивается на равные полигоны, в каждом из которых точки с наименьшими высотными отметками принимаются, как принадлежащие земной поверхности. Далее, к этим наборам добавляются новые точки с увеличением значений высот. Основным параметром при данной классификации является определение максимального угла наклона рельефа. Для установления количества классифицируемых точек задаются величины итерационного угла и итерационного расстояния. Итерационный угол – это максимальный угол между линией, соединяющей предполагаемую точку с ближайшей вершиной треугольника и ее проекцией на плоскость треугольника, а итерационное расстояние – перпендикуляр, опущенный из предполагаемой точки на плоскость треугольника. Данные параметры в общем виде определяют, насколько близко к плоскости треугольника должна находиться точка, чтобы считаться принадлежащей земной поверхности (рисунок 1.6).





Вместе с тем, официальных сертифицированных программ, осуществляющих классификацию точек, не так много. Наиболее популярными решениями в России на сегодняшний день являются TerraSolid (модуль TerraScan) на базе САПР Microstation, Global Mapper (LiDAR Module), КРЕДО 3D СКАН.

Несмотря на то, что современное оснащение персональных компьютеров хоть и позволяет моделировать рельеф по всему набору соответствующих точек, это редко оправдано, так как наряду с затрачиваемыми ресурсами создает лишние неудобства при работе заинтересованного специалиста камеральной группы. Так, например, при дальнейшем использовании нерегулярных триангуляционных моделей число формирующих полигонов (граней) окажется сильно избыточным, а изолинии, построенные по ним, будут весьма подробными. По этой причине приходится применять сглаживание результатов классификации точек класса «земля» в соответствии с требованиями генерализации рельефа для данного масштаба [83].

Ввиду избыточности точек «земли», для дальнейшей работы используют лишь самые важные или «ключевые точки» (синонимы: точки модели, key-points, model key-points и др). Отбор происходит по следующему условию: отклонение поверхности, построенной по ключевым точкам от поверхности, построенной по всем точкам, не должно превышать заданной величины. Данное значение обычно принимается исходя из требований к точности ЦМР. В большинстве случаев число точек такой выборки не превышает 5% точек класса «земля». Схема типичного расположения «ключевых» точек на вертикальном сечении облака показана на рисунке 1.7. В областях структурных линий их плотность возрастает.

**⊙**∙⊙ · · · · · · · ⊙ ·⊙· · · · · · ⊙· ⊙ · 

Рисунок 1.7 – Выделение «ключевых» точек на примере вертикального сечения На рисунке 1.8 представлено облако точек класса «земля» фрагмента карьера.



Рисунок 1.8 – Точки лазерных отражений при съемке борта карьера с визуализацией по цвету и высоте

Исходная выборка включает 169767 точек, после классификации ключевых осталось 7747 точек (рисунок 1.9), то есть наблюдается уменьшение на 95 процентов.



Рисунок 1.9 – Точки класса «земля» и ключевые точки модели (справа)

Само облако точек обычно малоинтересно для конечного потребителя. При решении конкретной задачи должна быть построена правильная цифровая модель рельефа, поэтому на заключительном этапе точечная трехмерная модель переходит в поверхностную (рисунок 1.10). Зачастую, по ключевым точкам строится триангуляция по условию Делоне.



Рисунок 1.10 – Триангуляционная модель борта карьера по ключевым точкам

Практика показывает, что создаваемые автоматически и полуавтоматически цифровые модели рельефа часто являются некорректными и неправильно воспроизводят особенности местности в некоторых зонах, в частности элементы бортов карьеров (откосы, уступы, бермы). ЦМР приходится редактировать путем удаления, перемещения и добавления вершин, поворота рёбер и заполнения разрывов, согласования со структурными линиями и прочими действиями.

Рассмотрим пример создания поверхности по 15 «ключевым» точкам (рисунок 1.11). Предположим, что вдоль красной линии проходит линия перелома. Слева показана модель, построенная по принципу Делоне, а справа – с перестановкой ребра в двух треугольниках. Очевидно, что второй вариант точнее отражает объект.


Рисунок 1.11 – Пример перестановки ребра триангуляции

Вместе с тем, автоматический этап создания поверхности обычно не учитывает «лишние» (не вошедших в «ключевые») 95% точек, а ведь их можно принять в качестве избыточных и использовать для оптимизации модели.

#### 1.5 Выводы по главе 1

1. Несмотря на значительный объем выполненных исследований по всему миру, оползни происходят с неснижаемой частотой. С учетом обстоятельства, что глубина горных выработок увеличивается, катастрофичность данных явлений также растет. В этой связи настоящая работа, посвященная совершенствованию методов оценки устойчивости бортов карьеров на основе изучения стадий проявления оползня, представляется актуальной.

2. Анализ рассмотренных работ показал, что существует необходимость решения вопроса о выделении на карьере потенциально оползнеопасных зон (ПООЗ), где независимо от структуры массива возникают благоприятные условия для деформирования. Их локализация позволит выполнить дальнейшее уточнение этих зон, например, за счет более глубокого изучения геологических условий возможно выявить зоны пониженной прочности пород, геологические нарушения залегания или разрывные нарушения, что ограничит ПООЗ рамками наиболее опасных процессов.

3. Из проведенного рассмотрения также следует, что важным вопросом остается дальнейшее изучение сценариев протекания оползней, в связи с чем предлагается изучить его с привлечением отечественного программного комплекса по моделированию напряженнодеформированного состояния прибортового массива.

4. Организацию наблюдений за деформациями прибортового массива необходимо согласовать с прогнозным сценарием оползня. На практике нередко наблюдательные станции располагают в одном месте, а оползень возникает в другом. Кроме того, наблюдения на земной поверхности должны выполняться в дистанционном режиме, а нахождение людей в

потенциально опасной зоне следует минимизировать. Использования лишь профильных линий на взгляд автора недостаточно, поэтому необходимо покрыть деформационными реперами всю опасную зону.

5. При решении вопроса определения потенциально опасных зон возникает необходимость построения трехмерной модели карьера. Наиболее перспективными вариантами ее создания являются технологии лазерного сканирования и аэрофотосъемка. Замечено, что при облегчении исходного облака точек возникают дальнейшие ошибки моделирования. В этой связи, при интерпретации результатов целесообразно выполнять уточнение цифровой модели на предмет соответствия её элементов полным результатам съемки.

6. По результатам проведенного анализа сформулированы задачи исследований: разработать алгоритм построения и уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок; выполнить оценку геомеханического состояния бортов карьеров с целью выделения потенциально-опасных зон и сценариев формирования оползневого процесса; разработать методику маркшейдерских наблюдений за процессом деформирования бортов карьеров, ориентированную на прогнозный сценарий развития оползня; разработать практические рекомендации по реализации предлагаемой методики.

### ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КАРЬЕРА

При организации наблюдений за деформациями массива горных пород как было отмечено в первой главе необходимо определение потенциально оползнеопасных зон (ПООЗ), которые в дополнении к профильным линиям полностью следует покрыть точками (марками, реперами) для прогнозирования и исключения возникновения аварийных ситуаций, связанных с проявлением оползня.

Выделение ПООЗ связано с проведением оценки НДС прибортового массива пород, для чего необходимо наличие модели карьера. Ее построение связано с проведением съемочных работ определенной точности. В настоящей главе рассмотрены модельно-ориентированные методы съемки, результатами которых являются облака точек. При этом надо заметить, что существующие программы по обработке результатов измерений и созданию моделей не в должной степени осуществляют построение по характерным точкам объекта, ввиду чего разработаны алгоритмы учета этого важного фактора.

# 2.1 Проведение комплекса полевых работ для тестирования современных методов построения цифровой модели карьера

В рамках работы обозначился вопрос определения эффективности модельноориентированных маркшейдерско-геодезических методов при топографической съемке карьеров для задач их цифрового моделирования [8]. В качестве тестового объекта был выбран карьер по добыче нерудных материалов в Ленинградской области (рисунок 2.1). Его длина составляет 1200 м, ширина варьируется от 370 м до 600 м, а глубина достигает 32 м. При разработке месторождения постоянно выполняется углубка карьера продольными и поперечными заходками с образованием уступов.



Рисунок 2.1 – Карьер по добыче нерудных материалов

Исходя из структурных особенностей карьера и требований к плотности съемки для создания плана масштаба 1:2000, число наиболее значимых пикетов для объекта составляет около 600. При использовании электронных тахеометров или спутникового оборудования в режиме кинематики в реальном времени производство полевых работ для такого объема заняло бы не менее одной рабочей смены (8 часов).

В качестве альтернативы задействовалось оборудование, обеспечивающее площадное зондирование всего объекта с большей производительностью. В ходе полевых работ в мае 2022 года выполнены (рисунок 2.2):

- наземное лазерное сканирование с помощью лазерного сканера Riegl VZ-400;

- воздушное лазерное сканирование с беспилотного воздушного судна DJI Matrice 300 RTK Combo, снабженного лидаром Zenmuse L1;

- цифровая аэрофотосъемка с использованием беспилотного воздушного судна Autel Robotics EVO II;

- спутниковые наблюдения с использованием оборудования South Galaxy G1 Plus;

- измерения с помощью тахеометра Sokkia FX-102.

Для координатно-временного обеспечения всех работ использовалась сеть дифференциальных геодезических станций «ГЕОСПАЙДЕР», а также пункты существующей опорной маркшейдерской сети.

Для сопоставления результатов и их сравнения на местности были равномерно размещены 16 специальных марок, сделанных из органического стекла с нанесением чернобелого изображения песочных часов на самоклеющейся основе. Положения их центров определялись как на основе спутниковых наблюдений в режиме реального времени с использованием станций «Геоспайдер», так и с помощью измерений на отражатель электронным тахеометром от пунктов опорной маркшейдерской сети. Отметим, что перед этим каталожные значения пунктов ОМС также подтверждались статическими спутниковыми наблюдениями. Результаты сравнения координат марок показали расхождения в плане и по высоте не более 2 и 3 см соответственно.



Рисунок 2.2 – Выполнение маркшейдерских наблюдений

В рамках аэрофотосъемки тестового участка площадью 21 га и глубиной до 30 м было получено 450 изображений, высота полета составила 80 м, разрешение съемки выдерживалось на уровне 1.8 см/пикс. Летносъёмочные работы заняли 29 минут. Камеральная обработка аэрофотосъемки осуществлялась в программе Agisoft Metashape. По набору снимков были выполнены их взаимное и внешнее ориентирование. Среднеквадратическое отклонение (СКО) по 10 опорным точкам составило 2,9 см, а СКО по 6 контрольным точкам 2,6 см. В результате обработки в тот же день были получены: плотное облако точек, полигональная поверхность и ортофотоплан (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Результаты обработки аэрофотосъёмки

ВЛС в сочетании с цифровой аэрофотосъемкой того же участка было выполнено в течение 20 минут. Обработка данных выполнялась в ПО DJI Terra и программе TerraSolid (модуль TerraScan) на базе системы автоматизированного проектирования Microstation. Вычисление координат ТЛО выполнялось путём обработки текущих координат воздушного носителя, ориентации лазерного сканера в пространстве и измерений расстояний до объектов на поверхности месторождения. Траектория полета БВС была получена с учетом показаний базовых станций и инерциального блока, после чего выполнялся расчет итоговых координат облака точек (рисунок 2.4). Значение СКО на указанных опознаках составило 8 см.



Рисунок 2.4 – Результаты обработки воздушного лазерного сканирования (раскраска ТЛО по реальному цвету)

Для НЛС использовался лидар импульсного типа, осуществляющий сбор данных с точностью на уровне 5 мм на расстояния до 600 м. Однако, с учетом атмосферных условий и отражающей способности объектов данной местности в режиме увеличенной дальности выбранный прибор должен обеспечивать измерение расстояний до 450 м, что учитывалось при размещении станций. Всего сбор данных осуществлялся с 8 позиций. Значение шага сканирования выбиралось близким к максимальному и составляло 0,003 градуса, что примерно соответствует 5 мм на расстоянии 100 м или 24 мм на расстоянии 450 м. Суммарно сбор данных выполнялся в течение 3 часов.

В ходе съемочных работ прибор центрировался над пластиковыми марками (контрольными и опорными точками для АФС и ВЛС) с определением высоты установки. Облака точек импортировались в программное обеспечение RiSCAN Pro, где выполнялось их приведение к установленной системе координат и высот. Для этого кроме ввода трехмерных координат центов сканера на станциях (линейных элементов внешнего ориентирования) определялись угловые элементы через показания встроенного датчика наклона и линейную засечку до пары целей, координаты которых ранее были получены спутниковым приемником. Контролируемые расхождения расстояний из ГНСС-наблюдений и измерений сканером на каждой станции не превышали 1,5 см. Для оптимизации количества точек на сканах и улучшения их дешифровочных свойств также выполнялась фильтрация данных (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Результаты обработки наземного лазерного сканирования (раскраска ТЛО по высоте)

Таким образом, было получено 3 многоточечных набора данных. Для облаков выполнялась фильтрация движущихся объектов и точек, «вылетевших» в результате переотражений.

Помимо результатов по оценке точности в ПО обработки выполнялся визуальный контроль соответствия точек рельефа по характерным сечениям, а также расчет отклонений с использованием программы открытого доступа CloudCompare.

В первом случае назначался набор плоскостей, секущих карьер в продольном и поперечном направлениях. На относительно горизонтальных участках все данные фактически

дублировались, а разбросы до 10 см наблюдались в основном на бровках и структурах водоотлива, что допустимо при топографической съемке данных объектов.

В ПО CloudCompare вычислялись расстояния между разными облаками точек. По умолчанию предлагается метод определения расстояния до ближайшего соседа. Представляется, что он более подходит, когда плотность данных сравниваемых материалов примерно одинаковая. В случае наличия в наборах данных «мертвых» зон и/или меньшего числа точек результаты с использованием метода ближайшего соседа могут быть менее достоверными (рисунки 2.6, 2.7).



Рисунок 2.6 – Пример неточности при сравнении облаков точек по методу ближайшего соседа (сечение)



Рисунок 2.7 – Пример необходимости использования локального моделирования при сравнении облаков точек

Тогда перспективнее использовать варианты локального моделирования вокруг «ближайшего соседа». В ПО реализованы 3 варианта:

1. Плоскость по методу наименьших квадратов (Least Square Plane);

2. Триангуляция (2D1/2 Triangulation);

3. Квадратичная функция высоты (Quadric – quadratic height function).

При этом в ПО оперативно отслеживается информация по среднему расхождению между точками наборов данных, а также СКО. После вычисления отклонений формируется скалярное поле, по которому можно анализировать и фильтровать значения по определенным лимитам.

Вначале проводилось сравнение по всему объему данных. Так, при сравнении материалов НЛС и ВЛС видна следующая картина (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Сравнение материалов НЛС и ВЛС

Выявлены максимальные отклонения на уровне 1 метра, при этом 90,5 % сравниваемых ТЛО находятся в пределах 10 см. Визуальный осмотр показал, что максимальные значения сконцентрированы в «мертвых» зонах результатов НЛС.

Результаты сопоставления НЛС и ФГМ в целом подтверждают данные выкладки, при этом сравнение материалов ФГМ и ВЛС показало их высокую сходимость: (93% сравниваемых ТЛО в пределах 10 см и 99% до 25 см).

Для локализации показателей было решено выполнить сравнение и по тестовым фрагментам, отличным по ориентации в пространстве, отражающей способности, шероховатости. Описание участков приведено в таблице 2.1.

			ВЛС		НЛС		ΦΓΜ	
№	Описание участка	Площадь, <sup>M<sup>2</sup></sup>	Число ТЛО, шт	Плот- ность точек, шт/м <sup>2</sup>	Число ТЛО, шт	Плот- ность точек, шт/м <sup>2</sup>	Число ТЛО, шт	Плот- ность точек, шт/м <sup>2</sup>
1	Фрагмент отработанного борта 1	443,7	240703	543	829453	1870	370046	834
2	Фрагмент подошвы 1	217,3	112127	516	488649	2249	135595	624
3	Площадка уступа	69,2	38674	559	9296	134	45644	660
4	Откос уступа 1	28,7	14800	515	104821	3650	35907	1251
5	Фрагмент отработанного борта 2	443,7	237581	536	502444	1133	422513	952
6	Горизонталь- ный фрагмент неотработан- ной части	682,6	354173	519	90277	132	419287	614
7	Фрагмент подъезда из бетонных плит 1	94,9	49766	524	177755	1873	61438	647
8	Фрагмент грунтовой дороги	94,9	45971	484	3182	34	58847	620
9	Фрагмент подошвы 2	816,0	370639	454	212694	261	491681	603
10	Фрагмент подъезда из бетонных плит 3	123,9	55930	452	69025	557	71629	578
11	Фрагмент отработанного борта 3	3708,5	1963479	530	1682518	454	2809411	758
12	Фрагмент подошвы 3	816,0	381503	468	637173	781	516071	632

Таблица 2.1 – Сравнение фрагментов, полученных по результатам ВЛС, НЛС и ФГМ

Для каждого вида объектов были выполнены сравнительные расчеты с рекомендацией оптимального варианта локального моделирования.

Так на составных участках бортов с включением откосов и площадок уступов эффективнее получились варианты с использованием плоскостей по методу наименьших квадратов, а для участков ровных поверхностей при всех доступных вариантах получались сопоставимые результаты.

Сводная таблица 2.2 приведена ниже. В ней представлены результаты сравнения облаков с учетом плотности ТЛО.

Сравниваемые	Среднее	СКО,	Сравниваемые	Среднее	СКО,	
облака	расхождение,	MM	облака	расхождение,	MM	
	ММ			ММ		
1	участок		7	участок		
ВЛС с НЛС	53,3	55,5	ВЛС с НЛС	60,1	7,4	
ФГМ с НЛС	26	49,1	ФГМ с НЛС	7,3	5,3	
2	участок		8	участок		
ВЛС с НЛС	24,5	11,3	НЛС с ВЛС	15,4	10,8	
ФГМ с НЛС	10,8	8,4	ФГМ с ВЛС	16,2	10,7	
3	участок		9 участок			
НЛС с ВЛС	20,5	7	НЛС с ВЛС	37,1	15,3	
ФГМ с ВЛС	26,9	10,2	ФГМ с ВЛС	59,1	17,8	
4	участок		10 участок			
ВЛС с НЛС	15,8	9,6	ВЛС с НЛС	6,2	5,1	
ФГМ с НЛС	13,7	7	ФГМ с НЛС	14	8,4	
5	участок		11 участок			
ВЛС с НЛС	39,5	67,5	НЛС с ВЛС	51	56,6	
ФГМ с НЛС	37,5	71,9	ФГМ с ВЛС	30,8	22,3	
6	участок		12 участок			
НЛС с ВЛС	32,1	20,3	ВЛС с НЛС	41	14,9	
ФГМ с ВЛС	29,4	17	ФГМ с НЛС	10,4	22,3	

Таблица 2.2 – Сравнение фрагментов, полученных по результатам ВЛС, НЛС и ФГМ

В целом, результаты сравнения позволяют считать, что все упомянутые методы удовлетворяют нормативным допускам при использовании для топографической съемки карьеров.

Возможность трехмерной визуализации является важнейшим свойством получаемых данных. При этом, все наборы формируются достаточно оперативно, а содержат при этом исчерпывающую информацию о геометрии всего объекта. Кроме того, минимизированы проблемы использования при съемке труднодоступных мест или участков с более интенсивным горным производством.

Вместе с тем, экономическая составляющая при топографической съемке подтверждает целесообразность использования аэрофотосъемочных комплексов, однако на карьерах с залесенными фрагментами оправдано оснащение платформы и воздушными лидарами с большей проникающей способностью.

В качестве основного метода топографической съемки НЛС менее оправдано с точки зрения меньшего охвата области интересов и сложности полностью исключить мертвые зоны, однако в пользу метода свидетельствуют более высокая точность, а значит возможность использования в более ответственных работах, в частности при мониторинге деформаций горных объектов. Среди минусов представленных методов можно выделить большую стоимость по сравнению с избирательными методами съемки, а также пока оставшуюся недостаточной освещенность в нормативно-методической документации, в первую очередь в части подходов к обработке данных.

#### 2.2 Разработка алгоритмов уточнения цифровых моделей карьеров по облакам точек

**Постановка задачи.** В качестве примера рассмотрим созданную искусственно модель в виде геологической депрессии (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Модель депрессии в виде поверхностной модели и набора изолиний Допустим, что на поверхность попало несколько десятков (а в реальности – сотен или тысяч) точек, из которых в ключевые вошло всего 10 (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Точки на поверхности геологической депрессии при виде сверху и в изометрии По ключевым точкам в автоматическом режиме в программах NanoCAD и Autodesk AutoCAD Civil 3D построена триангуляция Делоне (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Триангуляция Делоне по ключевым точкам при виде сверху

На рисунке 2.11 видно, что поверхность удовлетворяет условию Делоне, а именно, внутрь окружностей, описанных вокруг любых треугольников, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции. Но данное представление не удовлетворяет форме объекта (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Триангуляция Делоне по ключевым точкам в изометрии

Как известно, при соблюдении условия Делоне наблюдается стремление к равносторонним треугольникам, поэтому ребра могут проходить под большими углами к структурным линиям рельефа. Как отмечалось, автоматический этап моделирования не учитывает избыточные данные, то есть все точки «земли» (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Несоответствие поверхности по ключевым точкам всем точкам класса «земля»

Необходимо внести редакционные действия и последовательно переставить несколько ребер (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Редактирование поверхности путем последовательной перестановки ребер: 1 – без исправления; 2 – частичная редакция; 3 – полная редакция

Аналогичные неоднозначности, требующие исправления, часто встречаются и на объектах горной промышленности. Пример облаков точек классов «земля» и «ключевые точки модели» карьера в Ленинградской области показаны на рисунке 2.15.



Рисунок 2.15 – Примеры облаков точек классов «земля» и «ключевые точки модели» карьера После создания ЦМР по ключевым точкам визуально выявлено несколько десятков ошибок, как на бортах, так и на дне карьера. Они выделены красным цветом на рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Модель карьера по ключевым точкам модели

Подробнее рассмотрим одну из них. Раскраска ТЛО по вектору нормали и фрагмент ортофотоплана по материалам АФС подтверждают необходимость перестановки ребра внутри выделенного контура (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Неточность моделирования фрагмента борта карьера по триангуляции Делоне Варианты до и после редактирования в изометрии представлены на рисунке 2.18.





Рисунок 2.18 – Исправление ЦМР фрагмента борта карьера

Конечно, двойственность построения может быть учтена при ручном редактировании. Однако, с увеличением масштаба задачи до тысяч и миллионов точек, безусловно, требуются более эффективные подходы для корректного построения цифровой модели. Ручная работа оператора по перестановке ребер в таком случае потребует много времени. Очевидно, что исправить абсолютно все треугольники очень сложно. Представляется своевременным сформулировать алгоритмы оптимизации данного этапа и устранению неоднозначностей. Для этого предлагается использовать метод уточнения триангуляции по методу наименьших квадратов.

Варианты оптимизации цифровых моделей рельефа по облакам точек на основе метода наименьших квадратов.

Ключевые точки модели являются наиболее характерными точками рельефа, определяющими точность построения ЦМР.

Рассмотрим вариант их выделения с помощью ПО TerraSolid (модуль TerraScan) на базе системы автоматизированного проектирования Microstation (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Окно настроек классификатора ключевых точек в ПО TerraSolid

Управление точностью модели, составленной по ключевым точкам, осуществляется с помощью параметров допуска превышения «Над» (Above) и «Под» (Below). Эти параметры определяют максимально допустимую разность между ключевой точкой модели (keypoints) и моделью поверхности, созданной по точкам земли (groundpoints). Параметр «Использовать точки» (Use points every) обеспечивает минимальную плотность в конечной модели. Основываясь на требованиях к топографической съемке рассматриваемых объектов, рекомендуемые параметры для классификации ключевых точек варьируются в зависимости от высоты сечения рельефа и шага съемки при сложности бровок уступов. В работе предложены следующие параметры (таблица 2.3).

Таблица	2.3	—	Рекомендуемые	параметры	классификации	ключевых	точек	модели	при
топограф	ичес	кой	і съемке карьеров						

Параметры	Масштаб					
	1:1000	1:2000				
Значение «Использовать точки», м	от 20 до 30	от 30 до 50				
Значения «Над» и «Под» при высоте сечения рельефа 0.5 м, м						
- угол наклона до 2 °	0.06	0.06				
- угол наклона от 2 $^\circ$	0.08	0.08				
Значения «Над» и «Под» при высоте сечения рельефа 1.0 м, м						
- угол наклона до 2 $^\circ$	0.12	0.12				
- угол наклона от 2 $^\circ$	0.16	0.16				

В результате выполнения процедуры ключевые точки, принадлежащие земной поверхности, записываются в отдельный класс, а точки, не удовлетворявшие условиям отбора, остаются в классе «земля».

Уточнение цифровых моделей рельефа по облакам точек может реализовываться по двум подходам:

- через барицентрические координаты точек класса «земля» на гранях триангуляции по ключевым точкам;

- через кратчайшие расстояния от точек класса «земля» до граней триангуляции по ключевым точкам.

Оба подхода сводятся к сравнению сумм квадратов отклонений точек «земли» в соседних треугольниках и поиску нужного разворота ребер в триангуляции.

В первом варианте задача сводится к определению высот точек класса «земля» (z) в проекции для треугольников до и после перестановки ребер, после чего данные значения сравниваются с начальными. Определить z в этом случае можно через барицентрические координаты (α, β, γ), равные отношению площадей треугольников (рисунок 2.20).



Рисунок 2.20 – Геометрический смысл барицентрических координат

Как известно, общее уравнение плоскости в трехмерной декартовой системе координат выглядит (формулы (2.1), (2.2), (2.3), (2.4)):

$$\alpha = \frac{S_1}{S},\tag{2.1}$$

$$\beta = \frac{S_2}{S},\tag{2.2}$$

$$\gamma = \frac{\varsigma_3}{\varsigma},\tag{2.3}$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3, (2.4)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – барицентрические координаты,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – площади треугольников.

Эти числа неотрицательны и удовлетворяют следующим соотношениям (формула (2.5)):

$$\begin{array}{l} \alpha + \beta + \gamma = 1 \\ \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 = x \\ \alpha y_1 + \beta y_2 + \gamma y_3 = y \end{array} ;$$

$$(2.5)$$

где (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>); (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>); (x<sub>3</sub>, y<sub>3</sub>) – плановые координаты вершин треугольника.

Тогда определитель этой системы уравнений (формула (2.6)):

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{vmatrix} = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1);$$
(2.6)

По формулам Крамера решение составит (формула (2.7)):

$$\alpha = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \ \beta = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \ \gamma = 1 - \alpha - \beta; \tag{2.7}$$

Где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  вычисляются по формулам (2.7) и (2.8):

$$\Delta_{1} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x & x_{2} & x_{3} \\ y & y_{2} & y_{3} \end{vmatrix} = (x_{2}y_{3} - x_{3}y_{2}) + x(y_{2} - y_{3}) + y(x_{3} - x_{2});$$
(2.8)

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x & x_3 \\ y_1 & y & y_3 \end{vmatrix} = (x_3y_1 - x_1y_3) + x(y_3 - y_1) + y(x_1 - x_3)$$
(2.9)

Таким образом, при известных координатах точки (x,y), а также высоты вершин рассматриваемого треугольника  $z_1, z_2, z_3$ , значение высоты в ней рассчитывается по формуле (2.10):

$$\mathbf{z} = \alpha \mathbf{z}_1 + \beta \mathbf{z}_2 + \gamma \mathbf{z}_3 \tag{2.10}$$

По данному сценарию можно определять высоты точек класса «земля» в проекции для всех соседних треугольников, а затем в проекции для новых треугольников с учетом перестановки общего ребра. Сравнение высот точек «земли» с высотами в проекции для двух предварительных решений позволить получить отклонения dz для каждой точки. В дальнейшем нужно использовать тот случай, в котором  $\sum dz^2$  минимальна, а также выполнить повторную проверку соседних треугольников.

Вместо определения отклонений dz можно апеллировать и кратчайшими расстояниями до плоскости, используя известные положения об уравнении плоскости и формулу Герона.

Как известно, уравнение плоскости, проходящей через три точки с известными координатами, рассчитывается по формуле (2.11):

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y - y_1 & y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \\ z - z_1 & z_2 - z_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0;$$
(2.11)

где  $(x_1; y_1; z_1), (x_2; y_2; z_2), (x_3; y_3; z_3)$  - координаты точек, через которые проходит данная плоскость, а (x; y; z) – всевозможные координаты точек этой плоскости.

Уравнение плоскости имеет вид (формула (2.12)):

$$Ax + By + Cz + D = 0 (2.12)$$

где А, В, С, D – коэффициенты, задающие плоскость.

Применяя формулу Герона, кратчайшее расстояние от произвольной точки до плоскости (формула (2.13)):

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}};$$
(2.13)

где  $(x_0; y_0; z_0)$  – координаты точки.

Дальнейшая последовательность проверки при использовании отклонений от плоскости останется аналогичной, описанной выше.

Помимо непосредственных отклонений целесообразно выполнить оценку точности и находить среднеквадратическое отклонение (СКО) точек от плоскости по формуле Бесселя (2.14):

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n-1}}$$
(2.14)

**Практическое применение.** Указанные предложения нашли реализацию в компьютерной программе по пакетной обработке облаков точек. Входными данными выступает облако точек в формате \*las или \*laz, содержащее координаты точек и принадлежность к одному из классов (земля или ключевые точки). При этом устанавливаются начальные допуски для оптимизации модели с точки зрения длин ребер, а также среднеквадратического отклонения (СКО), при котором перестановка ребра не требуется. На выходе же можно анализировать число вершин триангуляции и обработанных треугольников, плотность уточняющих точек на треугольник, количество перестроений, максимальное уклонение и СКО.

Для проверки корректности работы первым тестовым объектом выступило облако ТЛО борта карьера (рисунок 2.21), полученное с помощью наземного лидара импульсного типа.



Рисунок 2.21 – Облако ТЛО борта карьера

На начальной стадии с помощью ПО TerraSolid выполнена фильтрация вылетевших точек и подвижных объектов, после чего классифицированы ТЛО класса «земля» (рисунок 2.22).



Рисунок 2.22 – Фрагмент ТЛО борта карьера с классификацией точек класса «земля» В результате получился массив в количестве 523 563 точек, в который не попали шумы и ТЛО сооружений (элементов электроснабжения и освещения) (рисунок 2.23).



Рисунок 2.23 – Облако точек класса «земля» тестового фрагмента

При выделении ключевых точек и создании по ним поверхностной модели визуальный осмотр подтвердил достаточно большое количество несоответствий, как на подошве, так и вблизи структур уступов (рисунок 2.24).



Рисунок 2.24 – Триангуляция по ключевым точкам (синим цветом показаны несоответствия точкам класса «земля»)

Рассмотрим один укрупненный фрагмент (рисунок 2.25). Сразу на двух соседних полигонах требуется перестановка ребер (слева), что исправит пересечения триангуляции траектории подразумеваемой структурной линии и достовернее отобразит рельеф (справа). Всего же на указанном примере потребуется выполнить 18047 перестроений.



Рисунок 2.25 – Результат исправления несоответствий ЦМР точкам класса «земля» В качестве другого тестового объекта выступил результат ВЛС отвала горной породы длиной 220 м, шириной 75 м, высотой до 65 м и текущим объемом 86 000 м^3 (рисунок 2.26).



Рисунок 2.26 – Облако из 5 161 681 ТЛО отвала

Выделение «ключевых точек» выполнялось с учетом допуска на среднюю погрешность по высоте для сечений от 0,5 до 5,0 м. Статистика приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Статистика выделения ключевых точек

	Число перестро е-ний	ТЛО «земля»	ТЛО «ключевые »	Соотношение		
Сечение				«ключевых» от «земли»,	«ключевых» от «земли»,	
				%	каждая	
0.50	7 712	5 149 402	12 279	0.238	419	
1.00	1 389	5 159 466	2 215	0.043	2329	
2.00	298	5 161 201	480	0.009	10753	
2.50	219	5 161 315	366	0.007	14102	
5.00	105	5 161 498	183	0.004	28205	

Примеры несоответствий для одного из случаев приведены на рисунке 2.27 Раскраска ТЛО по вектору нормали (справа) четко свидетельствует о необходимости уточнения положения ребер внутри выделенных контуров.



Рисунок 2.27 – Триангуляция по ключевым ТЛО отвала с локализацией неточностей

Кроме того, для всех приведенных вариантов проведено вычисление объема горной породы (V) на базе САПР NanoCAD до и после оптимизации по МНК. В качестве близкого к истинному принято значение объема 86052.83 м. куб., рассчитанное по всем точкам класса «земля». Результаты сравнения приведены в таблице 2.5 и на рисунке 2.28 в виде графика. Таблица 2.5 – Сравнительный анализ горной массы до и после оптимизации по МНК.

	До оптимизации		После о	птимизации	Dopuosti	
Отклонени		Разница с V		Разница с V	газность разностей V	
ОТКЛОНСНИ	V, м.	по всем	VNKV6	по всем	M $KV6$ (%)	
C	куб.	точкам,	v, M. KyU.	точкам,	M. Ky0. (70)	
		м. куб. (%)		м. куб. (%)		
0	86052.83	0 (0)	86052.83	0 (0)	0 (0)	
0.17	86045.51	-7.32 (-0.01)	86039.89	-12.94 (-0.01)	5.62 (0,01)	
0.33	85995.61	-57.22 (-0.07)	86044.14	-8.69 (-0.01)	-48.53 (-0.06)	
0.67	86292.28	239.45 (0.28)	85998.56	-54.27 (-0.06)	293.72 (0.34)	
0.83	86706.27	653.44 (0.76)	86308.37	255.54 (0.30)	397.9 (0.46)	
1.67	89016.51	2963.68 (3.44)	88436.09	2383.26 (2.77)	580.42 (0.67)	



Вычисленные объемы до и после оптимизации

Рисунок 2.28 – Вычисление объемов отвала по ключевым точкам до и после уточнения

Как видно, в случае с отвалом наблюдается еще и положительный эффект при вычислении объемов на основе моделей после оптимизации по МНК, что в целом тоже подтверждает необходимость ее использования. Вместе с тем, «экономия объемов» представляется нам хоть и важным критерием, но не главным. Наиболее ценно, что модель по предлагаемым алгоритмам уточнения по МНК наиболее соответствует цифровому отображению реальности, а значит, лучше подходит для горнотехнических задач.

Рассмотренные подходы позволяют упростить и ускорить работу по моделированию различных объектов, в том числе открытых горных выработок. Модельный подход обеспечивает повышение качества не только производственных решений в вопросах

проектирования горных работ, но, что особенно важно, создает основу для маркшейдерскогеодезического мониторинга. При этом уточненная модель используется и при конечноэлементном анализе деформированного состояния (например, борта карьера), что является составной частью мониторинга и также непосредственно при оценке деформаций по результатам наблюдений.

#### 2.5 Создание растров высокой информативности

Постановка задачи. Современные цифровые средства съёмки и обработки данных позволяют существенно автоматизировать процесс создания моделей местности [9].

Ранее рассмотрено, что комплекс работ по предварительной обработке материалов лазерного сканирования и АФС до этапа получения облака точек и ортофотоплана можно считать почти полностью автоматизированным. Данная технология (оборудование и программное обеспечение) поставляется разработчиком практически в готовом виде. Однако так нельзя сказать про этап моделирования, т.е. составление векторных элементов содержания плана, карты, географических информационных систем (ГИС), ЦМР или любого другого типа пространственной модели. Здесь, как и раньше, роль оператора (картографа) остается ведущей. Человек смотрит на материалы съёмки, анализирует объекты местности во всей их взаимосвязи, после чего оформляет их условными знакам в цифровом виде.

Работа по созданию ЦТП и ЦМР в основном выполняется в системах автоматизированного проектирования (САПР), таких как, Autodesk AutoCAD, Bentley Microstation, ZWCAD, NanoCAD, BricsCAD. Все они позволяют использовать как векторные слои, так и растровые подложки для представления результатов съёмки. Чаще всего для составления различных моделей местности, в том числе крупномасштабных топографических планов, используют: ортофотоплан (ОФП), информацию о рельефе местности и облака точек лазерного сканирования.

ОФП является основным материалом для работы картографа по данным ЛС и АФС. Это основа, служащая для определения планового положения почти всех элементов содержания плана, а картограф постоянно работает именно с ним. ОФП строится по принципу «мозаики» из небольших участков снимков с воздуха, поэтому ему свойственны все достоинства и недостатки этих материалов. Плюсы состоят в высоком пространственном и радиометрическом разрешении, а минусы связаны с зависимостью от освещённости, смазами изображения, порезами (особенно заметными при проекции высоких объектов на поверхность земли), тенями, перекрываниями одних объектов другими.

Как отмечалось ранее, чаще всего ЦМР создается в виде сети триангуляции (TIN), построенной по ключевым точкам рельефа и структурным линиям, при этом установлена целесообразность уточнения пространственного положения граней на основе всего множества

59

точек класса «земля». Горизонтали рельефа наглядно отображают его формы на плоскости, однако в последнее время носят вспомогательный характер, т.к. профилирование и вычисление объемов земляных работ выполняется по триангуляции. ЦМР должна точно соответствовать в плане и по высоте другим элементам содержания плана.

Для визуализации ЦМР в САПР, а также для автоматизации любых вычислительных алгоритмов работы с ней, используются регулярные модели рельефа. Регулярная модель образуется путем интерполяции, аппроксимации, сглаживания и иных трансформаций как исходных съемочных точек, так ЦМР иных типов. Среди методов наиболее распространены: интерполяция на основе триангуляции, метод Кригинга, средневзвешенная интерполяция по методу Шепарда, методы ближайшего и естественного соседа, полиномиальное и кусочнополиномиальное сглаживание. Однако не все из них применимы для работы с результатами лазерного сканирования из-за большого объёма исходных данных [52, 109, 110, 111, 112, 114].

Непосредственно точечная трёхмерная модель, кроме более низкой скорости работы с ней, имеет важный недостаток, так как она «дырявая». Это значит, что визуализация облака точек выполняется удовлетворительно в небольшом диапазоне масштабов. Использование растровых проекций облака точек (т.е. регулярных моделей данных) может быть оправдано большим объёмом информации при высокой скорости визуализации. Растровый вид позволяет представить информацию без пустот между ТЛО. Очевидно, что в этом случае растровое представление менее зависит от масштаба отображения, сохраняя качество и детализацию «картинки» в более широком диапазоне воспроизведения на экране [113, 115, 116, 117, 118, 119].

Представляется, что важнейшая роль картографа не должна сводиться исключительно к бездумному поднятию какого-то однотипного контура, а может состоять в поиске взаимосвязей между объектами разного рода, масштаба и происхождения. Представляется, что упростить и ускорить работу картографа по созданию ЦТП и ЦМР возможно путём внедрения алгоритмов создания и использования оригинальных растров, которые бы содержали больше информации о местности, чем обычный ортофотоплан или растр высот. Такой подход приведёт к совершенствованию методики создания цифровых топографических планов по данным автоматизированных методов.

Казалось бы, можно создать целую «стопку» растровых изображений, каждый из которых будет визуализировать свою характеристику объекта. Однако использование большого числа подложек неудобно: требует времени на переключение между ними, занимает большой объём оперативной памяти (снижает скорость работы САПР). Но самое важное то, что отдельный растр не отображает взаимосвязи объектов. Например, для определения положения

бровки и уступа карьера удобно одновременно использовать как ортофотоплан, так и растр высот.

С другой стороны, очевидно, что показать в одной и той же точке растра всю имеющуюся информацию о местности невозможно. Поэтому нужно определиться, какие характеристики важнее всего сочетать в конкретной точке растра. С точки зрения состава информации, важной для картографа, по данным ВЛС можно автоматически разделят на:

- техногенные территории, свободные от растительности (площадки с твердым покрытием, промышленные объекты и т.д.) по отношению к территориям естественного или спланированного рельефа;

- достаточно открытые участки местности, свободные от растительности по отношению к территориям, покрытым средней и высокой растительностью;

- достаточно ровные территории (пологий рельеф) относительно территорий на склонах.

По данным признакам можно сформировать маски и использовать их для комбинации информационных слоёв друг с другом.

Общая идея подхода состоит в отображении на одном метрическом растре большего числа данных об объектах местности, чем это делается традиционно. При этом просто «смешать» всё вместе не является целью, ведь состав растра должен быть разным в зависимости от того, какого типа местность в данной точке мы видим.

Как следствие, работа по составлению цифровых планов будет выполняться быстрее, а объекты отображаться правильно.

Практическая реализация. Создание растров высот.

Использование шейдеров (атласной окраски) для визуализации форм рельефа широко применяется в компьютерной графике. Так, например, в ГИС GlobalMapper реализованы следующие подходы: color ramp shader, daylight shader, global shader, gradient shader, HSV shader, Slope shader и другие.

В ходе исследования применялся следующий способ создания градиента, в котором задействованы три канала. Наглядную цветовую шкалу можно получить с использованием алгоритма вычисления компонент цветовой модели RGB по формуле (2.15):

$$s = 637 \cdot \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}$$
 (2.15)

В этом случае если s < 255, тогда R=0, G=s, а B=255-s; если s<383, тогда R=s+s-510, G=255, B = 0; в оставшихся случаях R=255, G=637-s, B=0.

Так, этот алгоритм позволяет получить спектр цветов, показанный на рисунке 2.29:



Рисунок 2.29 – Спектр цветов на основе алгоритма вычисления компонент цветовой модели RGB

Любой из известных шейдеров может быть использован для создания растров высокой информативности. Для конкретизации форм рельефа перспективно сочетать атласную окраску с изолиниями, что позволяет подчеркивать его формы и сделать изображение «объёмным» (рисунок 2.30).



Рисунок 2.30 – Примеры сочетания растров высот и изолиний

Смешение цветов растров. Арифметическое смешение цветов нескольких растровых изображений, взятых в определенной пропорции, может быть выполнено по следующему алгоритму. Для добавления компоненты высотного окрашивания (от синего к красному) к первоначальному цвету (например, соответствующему пикселу ортофотоплана) могут быть использованы формулы (2.16-2.18):

$$R = Int(\frac{|z - z_{\min}|}{(z_{\max} - z_{\min}) \cdot 255 \cdot k} + Int(R) \cdot (1 - k);$$
(2.16)

$$G = Int(G) \cdot (1-k); \qquad (2.17)$$

$$B = Int(\frac{|z - z_{\max}|}{(z_{\max} - z_{\min}) \cdot 255 \cdot k} + Int(B) \cdot (1 - k),$$
(2.18)

где Int – целая часть, R, G, B – компоненты цветовой модели, k – коэффициент влияния высотной компоненты в диапазоне от 0 до 1, z<sub>max</sub>, z<sub>min</sub> – максимальное и минимальное значение координаты Z (в пределах одного диапазона).

Иллюстрация предложенного подхода показана на примере тестового набора точек, окрашенных полосками в полутоновые цвета. Как видно на рисунке 2.31, для рельефа поверхности из ряда наклонных плоскостей (справа) выбрана полутоновая текстура (слева).



Рисунок 2.31 – Текстура и профиль в виде набора ТЛО (исходные данные)

А на рисунке 2.32 для этого же рельефа предложена окраска градиантом по высоте при k=1 и смешанным образом при k=0,5.





Рисунок 2.32 – Раскрашивание массива ТЛО градиентом по высоте при k = 1 (справа) и смешанным образом при k = 0,5 (слева)

Кроме равномерного окрашивания точек по высоте может быть использован переменный шаг окраски в зависимости от количества точек на каждом высотном уровне. Таким образом, градиент будет наиболее контрастным в области максимального скопления точек на высотной диаграмме.

Реализация смешивания цветов с использованием ортофотоплана рассмотрена ниже.

Смешение цветов ортофотоплана и растров высот. Рассмотрим подход получения ортофотоплана с локализацией уклонов по схеме (рисунок 2.33):



Рисунок 2.33 – Последовательность получения ортофотоплана с локализацией уклонов

На основе растра высот можно локализовать участки с равнинным рельефом или уклонами с наложением масок на первый или второй вариант. В области, свободной от маски, можно оставить раскрашивание в выбранном диапазоне перепадов высоты, а также поместить на растр «сырые» горизонтали (рисунки 2.34-2.37). В данном случае нет необходимости пользоваться двумя или тремя типами отдельных растров и набором изолиний в векторном виде.



Рисунок 2.34 – Иллюстрация получения ортофотоплана фрагмента карьера с локализацией уклонов и равнинных участков



Рисунок 2.35 – Иллюстрация получения ортофотоплана фрагмента карьера с локализацией уклонов и равнинных участков (укрупнённый фрагмент)



Рисунок 2.36 – Иллюстрация получения ортофотоплана фрагмента карьера с локализацией уклонов и равнинных участков



Рисунок 2.37 – Иллюстрация получения ортофотоплана фрагмента карьера с локализацией уклонов и равнинных участков (укрупнённый фрагмент)

Отдельно на этапе создания масок можно выделить на их границах структурные линии (рисунок 2.38). Они позволят лимитировать зоны откосов, для которых целесообразно применить соответствующие условные знак (на рисунке слева).



Рисунок 2.38 – Выделение структурных линий

Смешение цветов ортофотоплана и растра растительности. Для определения высот растительности по классифицированному облаку точек обычно используют классы для высокой, средней и низкой растительность. В практике обработки данных лидарных съёмок нередко создают растры, отображающие цветовую карту высот растительности по определённому принципу (рисунок 2.39).



Рисунок 2.39 – Пример растра растительности и легенда высот с интервалами в м

Неудобство использования обычного ОФП для решения задачи векторизации растительности объясняется тем, что на нем обычно «все пестро-зеленое: луг зеленый, кустарник зеленый, лес зеленый и т. д.». В связи с этим возникает идея смешать цвета ОФП и растра растительности для лучшего представления объектов. Такой подход используют в

геоинформатике для обработки данных дистанционного зондирования Земли (спутниковые съемки), однако не встречается в стандартном программном обеспечении обработки данных лазерного сканирования.

Так, выделение точек высокой растительности (выше 4 м над уровнем земли) позволяет дешифрировать зону леса, отличив ее от поросли (высотой менее 4 м) или низкой растительности. Однако значительное количество точек в данном случае малоинформативно и «заслоняет» другие категории геопространственных данных. Возникает идея автоматического получения обобщенных контуров распространения высокой растительности для создания соответствующей маски. Контуры можно получить различными приемами векторной или растровой графики. Такой подход позволяет показать на одном растре большее количество слоёв. Результат для тестового примера получен на базе ОФП, оттененного высотным шейдером с наложенными сверху маской высокой растительности и изолиниями (рисунок 2.40).



Рисунок 2.40 – Последовательность получения растра высокой информативности, содержащего данные о рельефе и растительности

Примеры схожих данных для фрагмента карьера с созданием маски на основе выделенного контура высокой растительности, совмещением с информацией о высотах деревьев и изолиниями под ними приведены на рисунках 2.41 и 2.42.



Рисунок 2.41 – Полупрозрачная маска высокой растительности



Рисунок 2.42 – Растр высокой информативности с данными о рельефе и растительности

#### 2.5 Выводы по главе 2

1. На основе проведенных исследований показано, что выполнение различных лидарных съёмок отдельно и в сочетании с аэрофотосъемкой обеспечивает нормативные требования по топографической съемке открытых горных выработок.

2. Предложена идея создания оригинальных растровых изображений по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки, позволяющих обеспечивать более широкие возможности анализа и интерпретации информации о территории.

3. Рассмотрены современные подходы по моделирования рельефа на основе точечных моделей, в результате чего выявлена необходимость разработки подходов к уточнению цифровых моделей, построенных на базе ключевых точек.

4. Разработаны алгоритмы уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок с использованием метода наименьших квадратов, позволяющие упростить и ускорить работу по моделированию открытых горных выработок.

5. Выявлено, что трехмерные модели карьеров, построенные с контролем характерных точек борта карьера, могут использоваться при анализе напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

## ГЛАВА З МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБОРТОВОГО МАССИВА

Возможность построения цифровой модели карьера с учетом характерных точек обеспечивает процесс моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) прибортового массива.

#### 3.1. Определение потенциально оползнеопасных зон.

Выделение потенциально оползнеопасных зон (ПООЗ) проведено на основе моделирования НДС массива горных пород (МГП), вмещающего карьер. В настоящих исследованиях использован ПК НЕДРА [49], разработанный Мустафиным М.Г. еще во ВНИМИ в начале 90-х годов и совершенствующийся до настоящего времени в Горном университете. ПК НЕДРА представляет собой компьютерную программу, в которой реализован метод конечных элементов, применительно для решений задач теории упругости и пластичности [28, 120] с элементами решений, учитывающих закономерности снижения прочности пород во времени под нагрузкой [42, 87]. ПК НЕДРА разработан в программной среде Дельфи (Delphi), он позволяет решать плоские (двумерные) и объемные задачи [80, 81].

Моделирование с использованием ПК НЕДРА выполнено автором под руководством Мустафина М.Г.

Определение размеров и расположения ПООЗ как по простиранию борта карьера, так и по нормали к контуру борта является одной из основных целей исследования. Без уточнения решений этих задач маркшейдерские наблюдения, в особенности проводимые по профильным линиям, будут в ряде случаев иметь приблизительный результат, в связи с тем, что профильная линия может не попасть в оползнеопасный район и, естественно, наблюдательная станция будет малоэффективной.

Для решения задачи о расположении ПООЗ следует использовать объемную модель карьера. При этом все многообразие горно-геологических и горнотехнических условий разработки месторождения в модели учесть пока очень затруднительно, но геометрические параметры для условий однородного массива определить возможно, и это представляется актуальной задачей.

Работы в этом направлении ранее проводились. Так, например, в бывшем нормативном документе [66] приводятся рекомендации по учету кривизны карьера в плане для расчета устойчивости борта. При этом учет кривизны сводится к изменению угла наклона откоса борта. Подчеркивается важность учета кривизны и указывается, что в выступающих частях карьера устойчивость ниже, чем в районах вогнутости контура карьера. Развитие данного вопроса представлено в работе [58], где дано геомеханическое обоснование этого эффекта и приведены конкретные примеры учета криволинейности борта карьера. Вместе с тем, численных

определений ПООЗ и обобщений на общий случай для проведения мониторинговых наблюдений пока не разработано.

Решение вопроса о распространении ПООЗ в прибортовом массиве выполнено на основе построения объемных моделей выработок разных размеров прямоугольной формы в плане в однородном массиве горных пород. Возведение карьера приводит к изменению напряженнодеформированного состояния вмещающих его пород. Участки прибортового массива оказываются разгруженными (теряют отпор) вследствие выемки и соответственно смещаются в рамках упругих свойств пород в выработанное пространство. В угловых местах, там, где контур карьера в плане имеет излом или изгиб, смещения пород в выработанное пространство уменьшаются вследствие нахождения рядом породного упора (угол). Таким образом, смещения не могут реализоваться на этих участках так же, как на прямолинейных (так называемый эффект «зажима»). Определение влияния этих угловых зон можно выполнить расчетами (моделированием). При этом зоны, на которые не распространяется эффект «зажима», будут представлять потенциальную опасность. Границы ПООЗ определялись по условию равенства нулю деформаций, действующих параллельно борту карьера. В моделях варьировался угол откоса борта от  $30^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ , глубина карьера от 40 до 640 м и длина карьера до 40 до 2560 м. Ширина дна карьера отвечала среднему значению рабочей площадки с определенным запасом в 80 м. Рассмотрение этого вопроса потребовало проведение моделирования с набором около 200 вариантов.

Влияние выпуклых или вогнутых участков борта карьера в плане также было рассмотрено на основе трехмерного моделирования.

Сценарии формирования оползней и размеры ПООЗ в плане нормально линии борта карьера определялись на основе решения плоской задачи теории упругости и пластичности. В качестве критерия разрушения пород использована теория Кулона-Мора [68], хорошо зарекомендовавшая себя при решении задач горной геомеханики [35, 79]. Рассмотрены различные условия, приводящие к неустойчивости борта карьера. При этом варьировались углы наклона откоса борта карьера, упругость и прочность пород.

# 3.2 Объемное моделирование напряженно-деформированного состояния

#### прибортового массива горных пород

Для определения размеров ПООЗ в плане в ПК НЕДРА (3D) создавались модели, подобные приведенной на рисунке 3.1. В зависимости от размеров карьера изменялись габариты МГП с обеспечением условия минимального влияния границ МГП.



Рисунок 3.1 – Объемная модель массива горных пород, вмещающая открытую горную выработку (карьер)

При этом количество тетраэдров в конечно-элементных моделях составляло от 350 до 500 тысяч (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Фрагмент работы ПК Недра (желтым цветом выделена область дискретизации, элементы которой удаляются, имитируя выработанное пространство)

Ввиду симметричности схемы, рассматривалась четверть модели карьера (рисунок 3.1), что существенно позволило сократить количество элементов и время вычислений.

Карьер в плане может иметь разнообразные формы. Вместе с тем для представления о распределении НДС и отличии одних участков от других, что важно при решении вопроса о месте заложения наблюдательной станции, достаточно рассмотреть простые формы, которые позволят составить представление о том, как будет деформироваться сложные формы. В этой связи принята модель карьера в виде прямоугольника в плане.

Варьировались при моделировании глубина карьера и угол откоса борта карьера, при этом размер подошвы (длина) оставался одинаковым. Таким образом, по мере увеличения
глубины верхняя бровка карьера и соответственно размер карьера изменяли свои положения в зависимости от угла откоса борта. Физико-механические свойства также варьировались. Принят однородный МГП. В связи с тем, что рассматривалась объемная упругая задача, основным варьируемым параметром являлся модуль упругости пород. При моделировании учтен широкий спектр горных пород, которыми сложены МГП, вмещающие карьеры [43]. Также упор был сделан на классификации горных пород по шкале профессора Протодьяконова М.М. и ее связи с упругостью. В результате приняты следующие величины модуля упругости МГП: 5, 20 и 50 ГПа, которые охватывают практически весь спектр усредненных МГП на месторождениях, разрабатываемых открытым способом.

После разработки модели карьера было выявлено, по каким параметрам следует определять участки ПООЗ (по напряжениям, деформациям или смещениям). На рисунке 3.3 показана одна из картин изолиний смещений.



Рисунок 3.3 – Горизонтальные смещения по направлению «лево-право» (мм) на поверхности

#### модели

Приведенная на рисунке 3.3. картина смещений не позволяет сделать выделение зон, где действуют сжимающие деформации и растягивающие, соответственно, ПООЗ. Наиболее информативная картина получается при рассмотрении картины распределения деформаций, действующих параллельно длиной стороне борта карьера.

На рисунке 3.4 приведена объемная модель массива горных пород, вмещающая открытую горную выработку для представления о принципе выделения ПООЗ (оранжевая зона) по распределению деформаций, действующих вдоль длинной стороны карьера.



Рисунок 3.4 – Принципиальная схема выделения ПООЗ

Выполнено многовариантное моделирование. Рассмотрим ряд примеров выделения ПООЗ.

При форме карьера в виде квадрата со стороной на уровне подошвы 80 м, глубиной 160 м и с углом откоса борта карьера 45° распределение горизонтальных деформаций (лево-право) представлено на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Распределение горизонтальных деформаций, действующих в направлении левоправо. Характеристики модели карьера: размеры по нижней бровке 80 м, по верхней 400 м, E =

### 5 ГПа

Видно, что влияние торцевых участков существенно, деформации имеют знак минус (-), что отвечает сжатию. Условий, адекватных плоской задачи нет (повсеместно присутствует

эффект «зажима»). Из этого вовсе не следует, что в карьере, размером 400 м по верхней бровке и с углом откоса 45°, не могут произойти оползни. Моделированием показано, что при таких параметрах нет ПООЗ или зон, где параллельно бровке карьера отсутствуют сжимающие деформации, т.е. не формируются благоприятные условия по фактору деформаций. При анализе геологических факторов или зафиксированных проявлений деформационного процесса может быть рекомендованы наблюдения по профильной линий.

На следующем примере представлена модель МГП и карьера. Длина карьера 2960 м (1480 м модель) по нижней бровке карьера, 3280 по верхней бровке, угол откоса борта карьера 45°. Глубина карьера 160 м. Распределение горизонтальных деформаций представлено на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Распределение деформаций, действующих на поверхности модели в направлении лево-право. Характеристики модели карьера: размеры по нижней бровке 2960 м, по верхней 3280 м, Е = 5 ГПа

На данном примере видно, что деформации сжатия (-) распространяются на расстоянии до 250 м (от торцевой стороны). На прибортовых участках (длинная сторона), где деформации имеют нулевые или плюсовые значения, возможны оползни (естественно при коэффициенте устойчивости борта менее установленного по нормативу [89], теоретически менее 1). Следовательно, эту часть борта карьера можно отнести к ПООЗ. При установлении по традиционным методикам, которые опираются на плоскую схему определения коэффициента устойчивости, ПООЗ следует использовать для проведения на ней мониторинга (закладки деформационной сети) на предмет определения критических деформаций в соответствии с установленными нормативными значениями.

Результаты многовариантного моделирования сведены в таблицу 3.1.

	Уго	л откоса бо	рта карьер	a 30°					
		Дл	ина карье	ра, м					
Глубина,м	80	160	320	640	1280	2	560		
40	<ul> <li>- (сжатие)</li> </ul>	_	-	-	250	1	250		
80	-	-	-	200	210	1	210		
160	+	+	+	+	+		90		
	(растяжение)								
320	+	+	+	+	+		+		
640	+	+	+	+	+		+		
	Уго	л откоса бо	рта карьер	a 45°					
		Дл	ина карье	эа, м					
Глубина,м	80	160	320	640	128	0	2560		
40	-	-	-	-	320	)	320		
80	-	-	-	-	320	)	320		
160	+	+	+	-	200	)	250		
320	+	+	+	+	+		60		
640	+	+	+	+	+		+		
	Уго	л откоса бо	рта карьер	a 67°					
		Дл	ина карье	ра, м	_		-		
Глубина,м	80	160	320	640	128	0	2560		
40	-	-	-	-	330	)	340		
80	-	-	-	-	340	)	340		
160	+	+	+	-	230	)	300		
320	+	+	+	-	+		+		
640	+	+	+	+	+		+		
	Уго	л откоса бо	рта карьер	a 90°					
	Длина карьера, м								
Глубина,м	80	160	320	640	128	0	2560		
40	-	-	-	-	360	)	360		
80	-	-	-	-	360	)	360		
160	+	+	-	-	360	)	360		
320	+	+	+	-	380	)	440		
640	+	+	+	+	+		+		

Таблица 3.1 – Рез	ультаты многовари	антного моделир	ования для опр	ределения раз	змеров ПС	$\mathbf{)03}$
1		/ 1	, ,	/ 1		

Смоделированы также варианты, в которых варьировался модуль упругости пород (E), которые показали не существенные отклонения от значений, приведенных в таблице и с некоторым запасом они могут быть использованы и для МГП с более высоким значением E. Объяснение этого факта состоит в том, что несомненно модуль упругости влияет на НДС МГП, но когда рассматривается однородный массив пород, вмещающий карьер, то в количественном выражении отличия есть, но они практически не изменяют границы зон сжатия и растяжения в МГП.

Также рассмотрен важный вопрос о влиянии наличия на обнажениях карьера (откосах) выступающих (в сторону выработанного пространства) участков, на которых контур карьера как бы вдается в массив. Как показали расчеты, эти участки отличаются друг от друга диаметрально. На рисунке 3.7 показана модель, а на рисунке 3.8 и 3.9 результаты моделирования. При наличии выступающих участков, они будут наиболее опасными по проявлению оползней, т.к. в них практически отсутствует эффект зажима пород, который

характерен для торцевых участков карьера. Именно на этих участках следует размещать деформационные марки (репера). Соответственно участки вогнутости контура карьера представляют собой относительно более устойчивые зоны.



Рисунок 3.7 – Вид модели карьера с включением, которое моделирует либо выемку



Рисунок 3.8 – Распределение деформаций, действующих на поверхности модели в направлении лево-право (характеристики модели карьера: глубина 160 м, длина 2960 (по нижней бровке),

диаметр выступающей зоны 160 м)



Рисунок 3.9 – Распределение деформаций, действующих на поверхности модели в направлении лево-право (диаметр выемки 160 м)

Таким образом, рассчитаны размеры ПООЗ (таблица 3.1), которые могут использоваться при проведении мониторинга деформированного состояния бортов карьеров. Следует

напомнить, что размеры ПООЗ рассчитаны с учетом приведенных геометрических и геомеханических параметров, но без учета геологических особенностей.

# 3.3 Моделирование напряженно-деформированного состояния

## прибортового массива горных пород (плоская модель)

Следующим важным вопросом, ответ на который расширит понимание природы оползней, их прогноза и контроля, является выявление его механизма или сценария возможного формирования и протекания. Эти вопросы рассмотрены на плоской модели, но с упругопластического решения задачи.

Фрагмент модели МГП длиной 600 м и высотой 144 м представлен на рисунке 3.10. Рассматривался карьер высотой 96 м с углами откоса от 30° до 90°. Удельный вес пород ( $\gamma$ ) принят равным 2 т/м<sup>3</sup> (или 0.02 МПа на глубине 1 м), коэффициент Пуассона 0.3, а угол внутреннего трения ( $\phi$ ) 30°, что отвечает средним значениям осадочных пород. Как уже было заявлено, цель моделирования состояла в определении характера разрушения. В этой связи для модели с модулем упругости 5 ГПа, что представляет собой усредненное значение массива относительно слабой прочности и принято сугубо для выявления механизма формирования оползня. При этом соответственно подбиралось сцепление МГП, при котором происходил процесс разрушения в рамках упругопластического решения. Моделированием определен диапазон сцеплений пород (C), который составил величины от 0,02 до 0,03 МПа. Эти значения отвечают сцеплению в аргиллитах и алевролитах в соответствии с [32] с учетом установленной зависимости снижения прочности для массива [90], по которой снижение может быть в 10 и более раз.



Рисунок 3.10 – Модель карьера 2D (одна из симметричных частей) **3.4 Моделирование различных сценариев оползневого процесса** Угол откоса 90°.

В соответствии с теорией Кулона-Мора разрушения в массиве горных пород возникают в результате сдвига или отрыва. Проанализируем результаты моделирования. Решения упругой задачи приведены на рисунках 3.11, 3.12. На рисунке 3.11 приведено распределение максимальных ( $\sigma_{\rm M}$ ), а на рисунке 3.12 - максимальных касательных напряжений ( $\sigma_{\rm MXV}$ ). Видно,

что их концентрация приурочена к нижней бровке карьера и их величины составляют около 3 МПа ( $\sigma_{\rm M}$ ) и 0,2 ( $\sigma_{\rm Mxy}$ ).



Рисунок 3.11 – Распределение максимальных напряжений, МПа



Рисунок 3.12 – Распределение максимальных касательных напряжений, МПа

Очевидно, что в этих зонах породы подвергнутся разрушению (C = 0,03 МПа). Этот результат вполне тривиален и позволяет обозначить зону линии скольжения у нижней бровки карьера.

В нормативно-методической литературе [44] приведена схема для определения ширины призмы обрушения (m). Расчет по ней показал, что m = 52,5 м. При этом входящие параметры отвечали расчетной модели представленной выше и составили: H =96м, H90 =  $\sigma_{CK}/\gamma = 5$  м (предел прочности на сжатие пород связан со сцеплением выражением:  $\sigma_{CK} = 2Ctg(\pi/4 + \phi/2)$ , тогда при  $\phi = 30^{\circ}$ ,  $\sigma_{CK} = 0.06 * 1.73 = 0.1$  МПа;  $\gamma$ - удельный вес пород на глубине 1 м составит 0.02 МПа, в итоге H90 = 0.1/0.02 = 5.0 м, угол откоса  $\alpha = 90^{\circ}$ .

Интерфейс реализованной программы вычисления ширины призмы сползания (m) представлен на рисунке 3.13.

援 Борт	_		×
			1
Высота брта (уступа) карьера,м	96		
H90	5		
Угол откоса борта,градусы	90		]
Угол внутреннего трения	30		]
Старт			
Ширина призмы сползания	52,538606337	4934	

Рисунок 3.13 – Программа для вычисления ширины призмы обрушения (сползания)

Приведенные выкладки показали, что возможно определить m по фактически одному параметру - углу формирования площадки скольжения (*ω*=π/4 +(-) φ/2). Представляется, что такой подход, который широко используется на практике, все же необходимо усилить

Гораздо точнее m определяется на основе расчета НДС. На рисунке 3.14 отчетливо просматривается зона у земной поверхности, где  $\sigma_{MXY}$  близки или равны нулю. В этой зоне возникают условия для разрушения породы вследствие отрыва, т.е. локализуются места возникновения заколов. По укрупненному виду на рисунке 3.14 более точно (в выделенном прямоугольнике) видно, где возникнут заколы и основной их тренд, т.е. m.



Рисунок 3.14 – Возникновение заколов

В конкретном примере закол (ы) возникнут в пределах обозначенных расстояний: от 160 до 168 м, или относительно верхней бровки карьера на расстоянии 64-72 м. Как видим, разница в его определении по схеме и по расчету существенная (52,5 м или 64 м (72 м).

Более отчетливо место заколов проявляется при упругопластическом решении задачи. На рисунке 3.15 приведена картина разрушений в МГП при 3 итерациях, а на рисунке 3.16 - при 11, после которых следовало бы переформировывать сетку элементов, что не предусмотрено в ПК «НЕДРА».

80



Рисунок 3.16 – Зоны разрушения (11 итераций)

Результаты моделирования процесса разрушения более точно показали, что закол образуется на расстоянии 64 м. Данный результат весьма важен для практики, так как позволяет уточнить прогноз устойчивости борта карьера за счет уточнения ширины зоны сползания борта при использовании расчетов по применяемым методам (многоугольника сил и др.).

Вернемся к механизму формирования оползня. Общая картина деформирования (после 11 итераций) приведена на рисунках 3.17 и 3.18. На рисунке 3.17 представлена деформированная конечно-элементная модель. Видно, что произошло смятие пород (элементов) на нижней бровке борта карьера, а верхняя бровка претерпела оседание и сместилась в сторону выработанного пространства. Это свидетельствует о возможности части приконтурного массива к опрокидыванию или еще большему смещению в выработку.



Рисунок 3.17 – Деформированная конечно-элементная модель

Дополняет эти рассуждения картина деформирования и изменения упругих свойств (Е) МГП, приведенная на рисунке 3.18, на котором показано образование закола и разрушения на нижней бровке борта. Из последовательного рассмотрения рисунков 3.15-3.18 с уверенностью можно говорить, что дальнейшее деформирование МГП будет происходить вследствие распространения закола, способствующего увеличению давления на зону предполагаемой линии скольжения, а также последующего сползания всей призмы по этой линии. Естественно, что превышение сдвигающих сил над удерживающими в этом случае весьма вероятно, о чем свидетельствуют разрушения на нижней бровке.

формирования Описанный механизм оползня соответствует представлениям, изложенным на основе иных выкладок [24, 90]. Их можно назвать традиционными. Целесообразно вспомнить классификацию, не относящуюся к техногенным массивам, по которой такие оползни относят к первому типу: блоковые оползни сжатия (по другим классификациям – оползни выдавливания, раздавливания, оседания, выпирания). Происходит нарушение равновесия склоновой системы, а деформирование пород при формировании оползня происходит по схеме сжатия вследствие вертикального давления веса покрывающих пластов. Нижний горизонт, структурная прочность  $\sigma_{ck}$  грунтов которого меньше указанного давления, деформируется (раздавливается). Из-за этого процесса в сторону склона происходят проседание и прогиб вышележащего массива (земной квази-горизонтальной поверхности) с формированием в зоне изгиба сначала концентрации растягивающих напряжений, а затем – трещины закола. Далее по этой трещине отделяется и оседает по крутой криволинейной



поверхности скольжения оползневой блок. Смоделированный и описанный механизм можно считать протекающим «сверху-вниз» [50].

Рисунок 3.18 – Схема деформирования борта карьера (сценарий оползня «сверху-вниз») Потеря устойчивости приконтурного МГП происходит вследствие раздавливания пород у нижней бровки борта карьера, но дальнейший процесс сползания пород, определяется деформированием в приповерхностных участках и связан с развитием закола и смещением отделяющегося массива по горизонтали в сторону выработанного пространства и его оседанием.

Механизм, описанный и смоделированный выше возможно отслеживать в натурных условиях по наблюдениям на земной поверхности у борта карьера (упрощенные наблюдения [90]). Вместе с тем наблюдения необходимо проводить в дистанционном режиме, ввиду опасности нахождения в ПООЗ.

Угол откоса 78°.

Исходные данные приняты такими же, как и в предыдущем случае. Отличие заключалось в углах откоса борта карьера. Картина деформирования откоса борта карьера в результате решения упругопластической задачи о НДС МГП представлена на рисунке 3.19.



Рисунок 3.19 – Картина деформирования откоса борта карьера при углах откоса 78°

Исходя из предыдущих выкладок, по рисунку 3.19 видно, что сценарий (механизм) деформирования массива схож с предыдущим. Однако расстояние от бровки карьера, на котором возник закол, немного сократилось и составило 60 м. При этом по расчетам по методике, предлагаемой в [44] m = 40,5 м.

Угол откоса 67°.

Процесс разрушения при решении упругопластической задачи реализовался при С = 0,02 МПа. Отличие других параметров базового варианта состояло в угле откоса борта карьера. Картина деформирования представлена на рисунке 3.20.





Из рассмотрения видно, что механизм изменился. Породы у нижней бровки деформируются в сторону выработанного пространства. Заколы есть и их несколько на

расстояниях от верхней бровки около 6, 32 и 56 м. Следует признать, что здесь на оползневой процесс влияют как заколы, так и еще больше деформации выпора у нижней границы борта карьера. По расчетам [44] m = 32,9 м.

Угол откоса 45°.

Все исходные параметры приняты, как в предыдущем варианте. На рисунке 3.21 видно, что прогиб в приконтурной области привел к образованию на земной поверхности небольшого закола. Вместе с тем зона разрушения пород охватывает значительную область от верхней до нижней бровок карьера, при этом внизу она существенно шире. Расчетная величина [44] m = 15,5 м.



Рисунок 3.21 – Картина деформирования откоса борта карьера при углах откоса 45° Угол откоса 37°.

Заколов уже нет (рисунок 3.22). Характер разрушений пород дополняется ярко выраженными зонами разрушений, распространяющимися полосами нормально линии откоса.





Это свидетельствует о возможности разделения на блоки приоткосной части борта и его общего сползания. Расчетная величина [44] m = 5,9 м.

Угол откоса 30°.

При аналогичных с предыдущим вариантом исходных данных характер разрушений сохранился (рисунок 3.23). Видны полосчатые зоны разрушений, что говорит о разделении на блоки приоткосной части и протекании оползня в виде разрушений в нижней части борта, разворота блоков и вовлечения в процесс верхней части. Этот сценарий можно назвать протекающим снизу-вверх.



Рисунок 3.23 – Картина деформирования откоса борта карьера при углах откоса 30°

В результате проведенного моделирования проведена типизация борта карьера по углам откоса на предмет возможного механизма протекания оползня. Для интервалов углов откоса карьера от 90° до 60° протекание оползня прогнозируется по механизму «сверху-вниз». Это означает, что наблюдения за деформациями борта карьера можно выполнять путем заложения станций на земной поверхности. При интервале углов менее 60° и более 30° прогнозный механизм оползя «комбинированный». Наблюдения следует организовать для всего борта: как откоса, так и земной поверхности. При углах откоса 30° и менее прогнозный механизм «снизувверх». Наблюдения можно проводить с акцентом на деформирование откоса (откосов уступов) борта карьера. Расчетная величина [44] при равенстве углов φ и α равно нулю.

#### 3.4 Расчет запаса устойчивости и сравнение с классическим подходом

Учитывая важность вопроса об уточнении определения параметра m (ширины призмы оползня), от которого во многом зависит прогнозная оценка возможного возникновения оползня, проведено моделирование НДС МГП на предмет определения параметра m исходя из решения задачи теории упругости, позволяющей увидеть полную картину действия сил (напряжений) в прибортовом массиве.

Выполнено моделирование деформированного состояния прибортового массива карьера при различных углах откоса. Как отмечалось, расчет по традиционной схеме показал, что для рисунка рисунок 3.12 m = 52,5 м.

На рисунке 3.24 приведена смоделированная картина касательных напряжений (а, МПа) и деформаций сдвига (б, мм). Как видно качественно эти картины почти одинаковы. Данные параметры отражают действие (касательные напряжения,  $\tau$ ) и последствия этого действия (деформации сдвига,  $\omega = \tau/G$ ), отличаются на величину модуля сдвига (G = E /2(1+ $\nu$ ), где E – модуль деформации (Юнга),  $\nu$  – коэффициент Пуассона). Видно, что нулевые значения этих параметров располагаются на расстоянии 64-80 м от бровки карьера. Как известно, минимальные касательные напряжения характеризуют площадки, где возможны разрушения на отрыв, что в натуре отвечает появлению в этих зонах заколов. Рассчитанные значения т существенно отличаются (в среднем на 20 м) от нормативной формулы [44], соответственно и коэффициент запаса устойчивости будет разным. На этот момент обращали внимание разные исследователи, например [47, 48, 95, 96].



(б, мм) при углах откоса 90°

На рисунке 3.25 приведено распределение сдвиговых деформаций при условии угла откоса 60 градусов и глубине карьера 500 м. Можно увидеть, что на расстоянии примерно 92 м от бровки карьера деформации сдвига близки к нулю.



Рисунок 3.25 – Распределение деформаций сдвига при углах откоса 60° и глубине карьера 500 м

На рис. 3.26 приведена картина напряженного состояния (касательные напряжения) для угла откоса 30 градусов.

Параметр m составил 10 м (172 - 162). По методике [44] m = 13,9 м. Разница стала меньше, но все же значение коэффициента запаса устойчивости будет иным.



Рисунок 3.26 – Распределение касательных напряжений, угол откоса 30°, МПа (а - общая картина, б - укрупненно)

Проведено многовариантное моделирование и результаты сведены в таблицу. Считаем, что параметр m более надежно определять по результатам моделирования НДС, в первом приближении возможно использовать данные, приведенные в таблице 3.2.

ф°			20				30					40			
Н,								α°							
М	30	40	50	60	90	30	40	50	60	90	30	40	50	60	90
50	5	11	15	18	32	-	2.7	8	12	26	-	-	2.0	6	21
	12	14	18	23	70	12	14	18	23	70	12	14	18	23	70
150	25	42	53	64	102	-	16	31	43	84	-	-	12	25	68
	26	27	30	33	112	26	27	30	33	112	26	27	30	33	112
250	46	73	92	109	172	-	30	54	74	142	-	-	22	44	114
	36	40	45	53	194	36	40	45	53	194	36	40	45	53	194
350	66	104	131	155	242	-	44	77	105	199	-	-	33	63	161
	44	54	62	72	280	44	54	62	72	280	44	54	62	72	280
450	86	135	170	200	312	-	57	100	136	257	-	-	43	81	207
	53	67	76	86	366	53	67	76	86	366	53	67	76	86	366
550	106	166	209	246	382	-	71	123	166	315	-	-	53	100	254
	60	79	85	98	490	60	79	85	98	490	60	79	85	98	490
650	127	197	247	291	452	-	84	146	197	372	-	-	63	119	300
	64	81	93	113	535	64	81	93	113	535	64	81	93	113	535
750	147	228	286	337	522	-	98	169	228	430	-	-	74	137	348
	74	90	107	129	630	74	90	107	129	630	74	90	107	129	630
850	167	259	325	382	592	-	112	192	259	488	-	-	84	156	394
	94	110	125	142	730	94	110	125	142	730	94	110	125	142	730

Таблица 3.2 – Сравнение размеров призмы сползания (m) (синим цветом выделены размеры, полученные по формуле Фисенко Г.Л., серым цветом выделены размеры по предложенной методике)

С учетом данных значений m, выполнен расчет коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) для бортов различных конфигураций. Выполнено сравнение со значениями по традиционным подходам.

Угол откоса 78°, крепкие породы (вариант 1 по классической формуле) (рисунок 3.27). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.27 – Призма сползания при углах откоса 78°, m=40,5 м

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека Θ, °	c*]	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=Psin@
1	30	30	12.9	18	2	107.9	215.8	61	540	104.62	188.74
2	30	30	30.7	22.9	2	368.4	736.8	59	687	379.48	631.56
3	30	30	53.2	30.1	2	889.6	1779.2	56	903	994.92	1475.0
4	30	30	41.2	38	2	914.5	1829	52	1140	1126.05	1441.3

Таблица 3.3 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=40,5 м)

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]:

$$m = \frac{2H\left[1 - \operatorname{ctg}\alpha * \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha + \varphi}{2}\right)\right] - 2H_{90}}{\operatorname{ctg} + \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha + \varphi}{2}\right)}$$
(3.1)

где H – высота откоса, м; H90 – глубина возникновения площадки скольжения. m=40.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{t} c_i l_i 1_{M} + \sum_{i=1}^{t} t_g \varphi_i P_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^{t} P_i \cos \theta_i}$$
(3.2)

где t - количество блоков, на которые разбита призма обрушения, 1м – условная горизонтальная мощность призмы обрушения.

n=1.277641

по формуле (3.3) [5]:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathrm{tg}\varphi_{i}\sum_{i=1}^{t}N_{i}+\mathrm{cL}}{\sum_{i=1}^{t}T_{i}}$$
(3.3)

где L- длина поверхности скольжения

n= 1.283261

Угол откоса 78°, крепкие породы (вариант 2 по предложенной методике) (рисунок 3.28). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.4.



Рисунок 3.28 – Призма сползания при углах откоса 78°, m=60 м

Таблица 3.4 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=60 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	30	30	21.1	34.6	2	315.6	631.2	69	1038	226.20	589.28
2	30	30	47.5	26.6	2	745.5	1491	56	798	833.76	1236.10
3	30	30	68	27.9	2	1369.5	2739	46	837	1902.67	1970.3
4	30	30	35.6	30.2	2	1651.7	3303.4	35	906	2705.99	1894.75

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике определения ширины призмы оползня:

m=60 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n=1.20409498

по формуле (3.3) [5]: n=1.233091209

Угол откоса 78°, средние породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.5.

M₀	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	C*1	Удерживающие силы N=Pcos@	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	12.9	18	2	107.9	215.8	61	18	104.62	188.74
2	1	30	30.7	22.9	2	368.4	736.8	59	22.9	379.48	631.56
3	1	30	53.2	30.1	2	889.6	1779.2	56	30.1	994.92	1475.0
4	1	30	41.2	38	2	914.5	1829	52	38	1126.1	1441.3

Таблица 3.5 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=40,5 м).

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=40.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n=0.431684982

по формуле (3.3) [5]: n= 0.431872318

Угол откоса 78°, средние породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=60 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения ${\phi,}^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta$ , °	c*]	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	21.1	34.6	2	315.6	631.2	69	34.6	226.20	589.28
2	1	30	47.5	26.6	2	745.5	1491	56	26.6	833.76	1236.09
3	1	30	68	27.9	2	1369.5	2739	46	27.9	1902.67	1970.27
4	1	30	35.6	30.2	2	1651.7	3303.4	35	30.2	2705.99	1894.75

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: m=60 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n=0.596105562

по формуле (3.3) [5]: n=0.597072103

Угол откоса 78°, слабые породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.7.

N₀	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения ${\phi, }^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека <sub>0</sub> , °	C*]	Удерживающие силы N=Pcos@	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	0.1	30	12.9	18	2	107.9	215.8	61	1.8	104.62	188.74
2	0.1	30	30.7	22.9	2	368.4	736.8	59	2.29	379.48	631.56
3	0.1	30	53.2	30.1	2	889.6	1779	56	3.01	994.92	1475.0
4	0.1	30	41.2	38	2	914.5	1829	52	3.8	1126.1	1441.3

Таблица 3.7 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=40,5 м)

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m =40.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.405431162

по формуле (3.3) [5]: n= 0.405449895

Угол откоса 78°, слабые породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=60 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес γ, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека <sub>0</sub> , °	c*]	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	0.1	30	21.1	34.6	2	315.6	631.2	69	3.46	226.20	589.28
2	0.1	30	47.5	26.6	2	745.5	1491	56	2.66	833.76	1236.10
3	0.1	30	68	27.9	2	1369.5	2739	46	2.79	1902.67	1970.27
4	0.1	30	35.6	30.2	2	1651.7	3303.4	35	3.02	2705.99	1894.75

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: т=60 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.577236925

по формуле (3.3) [5]: n= 0.577333579

Угол откоса 67°, крепкие породы (вариант 1 по классическим расчетам) (рисунок 3.29). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.9.



Рисунок 3.29 – Призма сползания при углах откоса 67°, m=32,9 м

Таблица 3.9 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=32,9 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы Т=РsinΘ
1	30	30	75.6	32.3	2	355.8	711.6	61	969	344.99	622.38
2	30	30	47.7	27.2	2	745	1490	54	816	875.80	1205.44
3	30	30	44.1	25	2	788.4	1576.8	48	750	1055.086	1171.79
4	30	30	19.5	31.2	2	430.1	860.2	41	936	649.20	564.34

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=32.9 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 1.447774975

по формуле (3.3) [5]: n= 1.468819056

Угол откоса 67°, крепкие породы (вариант 2 по предложенной методике) (рисунок 3.30). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.10.



Рисунок 3.30 – Призма сползания при углах откоса 67°, m=56 м

Таблица 3.10 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=32,9 м)

Nº	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека Θ, °	C*1	Удерживающие силы N=Pcos©	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	30	30	19.3	30.5	2	246.6	493.2	66	915	200.60	450.56
2	30	30	44	28.2	2	745.8	1491.6	54	846	876.74	1206.73
3	30	30	66.6	32.9	2	1660.8	3321.6	41	987	2506.84	2179.17
4	30	30	52.8	47.1	2	1808	3616	29	1413	3162.63	1753.07

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: а=56 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 1.441315582

по формуле (3.3) [5]: n= 1.4418523

Угол откоса 67°, средние породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.11.

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	75.6	32.3	2	355.8	711.6	61	32.3	344.99	622.38
2	1	30	47.7	27.2	2	745	1490	54	27.2	875.80	1205.44
3	1	30	44.1	25	2	788.4	1576.8	48	25	1055.09	1171.79
4	1	30	19.5	31.2	2	430.1	860.2	41	31.2	649.20	564.34

Таблица 3.11 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=32,9 м)

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=32.9 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле [90]: n= 0.506318892

по формуле [5]: n= 0.507020361

Угол откоса 67°, средние породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=56 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1 м	Объемный вес γ, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека Θ, °	c*]	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	19.3	30.5	2	246.6	493.2	66	30.5	200.60	450.56
2	1	30	44	28.2	2	745.8	1491.6	54	28.2	876.74	1206.73
3	1	30	66.6	32.9	2	1660.8	3321.6	41	32.9	2506.84	2179.17
4	1	30	52.8	47.1	2	1808	3616	29	47.1	3162.63	1753.07

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: т=56 м.

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.721701999

по формуле (3.3) [5]: n= 0.72171989

Угол откоса 67°, слабые породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=32,9 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sy, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*]	Удерживающие силы N=Рсоз©	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	0.1	30	75.6	32.3	2	355.8	711.6	61	3.23	344.99	622.38
2	0.1	30	47.7	27.2	2	745	1490	54	2.72	875.80	1205.44
3	0.1	30	44.1	25	2	788.4	1576.8	48	2.5	1055.09	1171.79
4	0.1	30	19.5	31.2	2	430.1	860.2	41	3.12	649.20	564.34

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=32.9 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.477101289

по формуле (3.3) [5]: n= 0.477171436

Угол откоса 67°, слабые породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=56 м)

$N_{0}$	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	0.1	30	19.3	30.5	2	246.6	493.2	66	3.05	200.60	450.56
2	0.1	30	44	28.2	2	745.8	1491.6	54	2.82	876.74	1206.73
3	0.1	30	66.6	32.9	2	1660.8	3321.6	41	3.29	2506.84	2179.17
4	0.1	30	52.8	47.1	2	1808	3616	29	4.71	3162.62	1753.07

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: m=56 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.699369164

по формуле (3.3) [5]: n= 0.699370953

Угол откоса 45°, крепкие породы (вариант 1 по классическим расчетам) (Рисунок 3.31). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.15.



Рисунок 3.31 – Призма сползания при углах откоса 45°, m=15,5 м

Таблица 3.15 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=15,5 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека <sub>0</sub> , °	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	30	30	13.8	40.8	2	136.3	272.6	61	1224	132.16	238.42
2	30	30	32	26.3	2	475.3	950.6	56	789	531.57	788.08
3	30	30	34.1	20.6	2	491.5	983	48	618	657.76	730.51
4	30	30	31.7	28.4	2	689.5	1379	39	852	1071.68	867.83
5	30	30	16.2	53.4	2	746.8	1493.6	27	1602	1330.81	678.08

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=15.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 2.190491606

по формуле (3.3) [5]: n= 2.000660087

Угол откоса 45°, крепкие породы (вариант 2 по предложенной методике) (рисунок 3.32). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.16.



Рисунок 3.32 – Призма сползания при углах откоса 45°, m=26 м

Таблица 3.16 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=30 МПа, m=26 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения ${\phi, }^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения 1, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	30	30	18.3	31.2	2	300	600	63	936	272.39	534.60
2	30	30	43.8	31.3	2	813.2	1626.4	52	939	1001.31	1281.62
3	30	30	43	29.7	2	1041.7	2083.4	40	891	1595.98	1339.18
4	30	30	35.6	24.7	2	754.3	1508.6	30	741	1306.49	754.3
5	30	30	19.6	42	2	618.9	1237.8	20	1260	1163.15	423.35

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: m=26 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 1.811573493

по формуле (3.3) [5]: n= 1.810881141

Угол откоса 45°, средние породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.17.

οN	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес ү, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека Θ, °	c*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	13.8	40.8	2	136.3	272.6	61	40.8	132.16	238.42
2	1	30	32	26.3	2	475.3	950.6	56	26.3	531.57	788.08
3	1	30	34.1	20.6	2	491.5	983	48	20.6	657.76	730.51
4	1	30	31.7	28.4	2	689.5	1379	39	28.4	1071.68	867.83
5	1	30	16.2	53.4	2	746.8	1493.6	27	53.4	1330.81	678.08

Таблица 3.17 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=15,5 м)

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: m=15.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле [90]: n= 0.702266992

по формуле [5]: n= 0.695939275

Угол откоса 45°, средние породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=1 МПа, m=26 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес γ, тс/м3	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	[*0	Удерживающие силы N=Pcos©	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	1	30	18.3	31.2	2	300	600	63	31.2	272.39	534.60
2	1	30	43.8	31.3	2	813.2	1626.4	52	31.3	1001.31	1281.62
3	1	30	43	29.7	2	1041.7	2083.4	40	29.7	1595.98	1339.18
4	1	30	35.6	24.7	2	754.3	1508.6	30	24.7	1306.49	754.30
5	1	30	19.6	42	2	618.9	1237.8	20	42	1163.15	423.35

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: а=26 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.748098927

по формуле (3.3) [5]: n= 0.748075848

Угол откоса 45°, слабые породы (вариант 1). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=15,5 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi, ^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	C*1	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы Т=Psin⊖
1	0.1	30	13.8	40.8	2	136.3	272.6	61	4.08	132.16	238.42
2	0.1	30	32	26.3	2	475.3	950.6	56	2.63	531.57	788.08
3	0.1	30	34.1	20.6	2	491.5	983	48	2.06	657.76	730.51
4	0.1	30	31.7	28.4	2	689.5	1379	39	2.84	1071.68	867.83
5	0.1	30	16.2	53.4	2	746.8	1493.6	27	5.34	1330.81	678.08

Ширина призмы возможного обрушения по формуле (3.1) [44]: а=15.5 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.656080711

по формуле (3.3) [5]: n= 0.65544794

Угол откоса 45°, слабые породы (вариант 2). Параметры определения размеров призмы сползания представлены в таблице 3.20.

Таблица 3.20 – Параметры определения размеров призмы сползания (для сцепления с=0,1 МПа, m=26 м)

No	Сцепление с, МПа	Угол внутреннего трения $\varphi,^{\circ}$	Мощность слоя h, м	Длина поверхности скольжения l, м	Объемный вес	Площадь блока S, м2	Вес породы Р=Sγ, кг	Угол наклона основания отсека $\Theta, ^{\circ}$	c*]	Удерживающие силы N=PcosΘ	Сдвигающие силы T=PsinΘ
1	0.1	30	18.3	31.2	2	300	600	63	3.12	272.39	534.60
2	0.1	30	43.8	31.3	2	813.2	1626.4	52	3.13	1001.31	1281.62
3	0.1	30	43	29.7	2	1041.7	2083.4	40	2.97	1595.98	1339.18
4	0.1	30	35.6	24.7	2	754.3	1508.6	30	2.47	1306.49	754.30
5	0.1	30	19.6	42	2	618.9	1237.8	20	4.2	1163.15	423.35

Ширина призмы возможного обрушения по предлагаемой методике: а=26 м

Коэффициент запаса устойчивости:

по формуле (3.2) [90]: n= 0.715094544

по формуле (3.3) [5]: n= 0.715092236

#### 3.5 Выводы по главе 3

1. По результатам многовариантного моделирования на объемных моделях карьера разработаны параметры потенциально оползнеопасных зон, которые могут использоваться при оценке устойчивости борта карьера в качестве базовых. Дальнейшее их уточнение в границах ПООЗ выполняется на основе изучения геологии массива и расчета коэффициента запаса устойчивости. В уточненной зоне следует организовать маркшейдерские наблюдения с охватом всей ее площади. При этом профильные линии, которые на сегодняшний момент используются, тоже целесообразно предусмотреть в наблюдениях.

2. На основе моделирования бортов карьеров в плоской постановке задачи упругости определен параметр ширины призмы оползня, который предлагается в качестве альтернативного использовать при расчете коэффициента запаса устойчивости, вследствие адаптированности алгоритма его расчета к широко используемым классическим принципам.

3. Разработаны сценарии оползневого процесса: 1 – традиционный (по Фисенко Г.Л.), который в силу зарождения на земной поверхности и далее распространяющегося вниз можно назвать «сверху-вниз»; 2 – «снизу-вверх», при котором формирование области разрушений начинается у нижней бровке борта карьера с последующим ее ростом вверх до соединения с зоной заколов на земной поверхности и далее сползанием всей призмы; 3 – «комбинированный», при котором оползень реализуется частично по 1 и 2 сценариям.

# ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ БОРТОВ КАРЬЕРОВ С УЧЕТОМ СЦЕНАРИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА

Маркшейдерские наблюдения за деформациями прибортового массива в ПООЗ целесообразно выполнять с учетом сценариев проявления оползней. Ниже разработаны схемы таких наблюдений.

#### 4.1 Схема маркшейдерских наблюдений при сценарии развития оползня «сверху-вниз»

Для варианта, при котором реализуется сценарий развития оползня «сверху-вниз» достаточно организовать наблюдения на земной поверхности. Для этого предлагается создать свободную деформационную сеть с охватом ПООЗ (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Пример расположения свободной деформационной сети с охватом ПООЗ В таком случае измерения возможно выполнять со свободных станций способом тахеометрической съемки. В каждом цикле наблюдений достаточно определять координаты всех деформационных марок в условной системе координат тахеометра. На следующих циклах следует проводить аналогичную процедуру со свободной станции, которая может быть создана в любом удобном месте вне ПООЗ, вследствие возможного оползня. Приведение в единую систему координат и сравнение двух сетей на предмет смещения их точек выполняется на основе выявления деформированных и не деформированных элементов сети. Для такого анализа можно строить триангуляцию Делоне и для каждого элемента (треугольника, грани) определять его нормаль, площадь, длины линий. Эти параметры являются инвариантными, т.е. не зависящими от координат точек. Они и служат для сравнения сетей, полученных в разных циклах наблюдений. Те элементы, которые изменили свои обозначенные инвариантные параметры, считаются деформированными. Не деформированные элементы принимают координаты предыдущей модели и обе модели представляются в единой системе координат. Такой подход расширяет возможности установки съёмочного оборудования и не зависит от расположения исходных пунктов. Указанная методика реализована автором в программе для ЭВМ «Деформация» (номер свидетельства: 2023666272).

С целью контроля и для случая отсутствия недеформированных элементов рекомендуется включать в сеть несколько пунктов за пределами ПООЗ, на которых необходимо выполнять контрольные спутниковые статические определения с учетом принятой на карьере опорной маркшейдерской сети.

С учетом того, что нахождение людей в ПООЗ сводится к минимуму, наблюдения следует выполнять в дистанционном режиме.

При закладке реперов должны соблюдаться требования, предъявляемые к нормами [16, 46]. В дополнении к нормативным требованиям, конструкцию следует дополнить. На рабочие реперы наваривается металлическая пластина, толщиной не менее 3 мм, на которую закрепляется пленочный отражатель. Длина и ширина пластины принимается исходя из размера выбранного отражателя (рисунок 4.2). Репер при этом должен выступать над земной поверхностью на 150-200 мм для удобного визирования тахеометром.



Рисунок 4.2 – Пример размерного ряда пленочных отражателей

Тахеометрические измерения на станции должны соответствовать нормативной точности определения положения пунктов относительно исходных (15 мм [89]), что достигается применением большинства современных тахеометров.

Многообразие данного оборудования в России традиционно представлено следующими производителями: отечественным Уральского оптико-механический заводом имени Э. С. Яламова, а также Leica (Швейцария), Sokkia (Япония), Topcon (Япония), Trimble (США) с входящими в его орбиту Spectra Precision. В последние годы прослеживается четкая тенденция к большому внедрению китайского оборудования брендов Foif, South, Vega, Ruide, CHCNAV, EFT [71].

Важнейшими критериями при выборе прибора для выполнения того или иного вида работ являются СКП измерения углов и расстояний. К настоящему времени наблюдается выравнивание основных показателей съемочного оборудование. В качестве примера в таблице 4.1 рассмотрим основные заявленные характеристик ряда тахеометров с СКП измерения углов 1" стоимостью до 1 миллиона рублей (по состоянию на начало 2025 г.).

Модель/характеристика	6Ta1	FOIF RTS010	SOUTH N41	VEGA NX61
Внешний вид				
Страна изготовления	Россия	Китай	Китай	Китай
СКП измерения углов, "	1	1	1	1
Максимальное расстояние: - на призму, м; - на плёнку, м; - без отражателя, м	5000 2000 1500	5000 1200 1000	4000 1200 1000	3500 1000 1000
СКП измерения расстояния D,мм: - на призму, мм; - на плёнку, мм; - без отражателя, мм	$\begin{array}{c} 1,5+2\cdot 10^{-6}\cdot D\\ 2+2\cdot 10^{-6}\cdot D\\ 3+2\cdot 10^{-6}\cdot D\end{array}$	$1+1,5\cdot10^{-6}\cdot D \\ 2+2\cdot10^{-6}\cdot D \\ 2+2\cdot10^{-6}\cdot D$	$1+1\cdot 10^{-6} \cdot D \\ 3+2\cdot 10^{-6} \cdot D \\ 3+2\cdot 10^{-6} \cdot D$	$1+1\cdot10^{-6}\cdot D \\ 2+2\cdot10^{-6}\cdot D \\ 3+2\cdot10^{-6}\cdot D$
Рабочая температура, °С	от -20 до + 50	от -20 до + 50	от -20 до + 50	от -20 до + 50
Масса, кг	5,5	5,8	6,0	6,0

Таблица 4.1 -	Характеристики	и электронных	тахеометров с СЬ	СП измерения углов 1"
1	1 1	1	1	1 2

Прослеживается схожесть в порядках цифр основных параметров оборудования как в случае с заявленным перечнем, так с другими тахеометрами с иными значениями СКП измерения углов 0,5", 2", 3", 5".

Для работы в условиях более низких температур также возможно подобрать прибор. Отдельные тахеометры позиционируются, как зимние. Так, например Leica TS07 R1000 в начальном варианте работает при температурах от -20 до + 50 °C, но в модификации Arctic уже при -30°C, а в модификации SuperArctic уже и при -40°C (вариант российской сборки на OA «Экспериментальный оптико-механический завод»).

Тахеометры могут использоваться, как отдельный измерительный прибор. При совместном использовании со специальными программными модулями обеспечивается возможность дистанционного управления тахеометром с использованием беспроводных технологий на различные расстояния, в соответствии с указанной в модели дальностью.

Разработанная схема наблюдений при прогнозном сценарии оползня «сверху-вниз» приведена на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Схема маркшейдерских наблюдений при сценарии оползня «сверху-вниз»

#### 4.1.1 Программа для ЭВМ «Деформация»

Для определения смещенных точек по результатам систематических (повторных) натурных наблюдений была разработана программа на языке программирования «Pascal» [82]. С ее помощью можно обрабатывать и интерпретировать как результаты реальных наблюдений, так и пользоваться опцией их моделирования. Программа позволяет проводить оценку деформаций для любого набора точек, в том числе для определенных фигур.

На основной панели программы (рисунок 4.4) вверху в таблице отображаются данные результатов наблюдений за деформациями земной поверхности. Первые две строки содержат координаты деформационных марок по результатам предыдущего цикла наблюдений, в третьей и четвертой строках введены данные повторных наблюдений.

106

🐠 Программа деформация														- 0	×
T_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
×	0.0000	100.0000	100.0000	0.0000	0.0000	86.0000	27.0000	31.0000	37.0000	8.0000	7.0000	5.0000	91.0000	77.0000	69.0000
Y	0.0000	0.0000	100.0000	100.0000	3.0000	20.0000	67.0000	16.0000	42.0000	47.0000	84.0000	29.0000	36.0000	32.0000	84.0000
×	87.6314	116.6025	166.6025	80.0000	31.5000	114.4782	86.8827	64.8468	83.0429	60.4282	78.0622	48.8301	126.8083	112.6840	131.7558
Y	39.8205	-0.0000	86.6025	136.6025	52.5981	24.3205	94.5237	48.3564	67.8731	86.7032	119.2461	72.6147	35.6769	39.2128	88.2461
<	_														>
<ul> <li>Координаты точек</li> <li>Размер области 100</li> <li>Общее количество точек 30</li> <li>Область Точки Фигура Random</li> <li>Зоны Вороного Триангуляция Деформационная сеть</li> <li>Количество треугольников</li> <li>Площадь треугольников</li> </ul>							O D m n cetb								
0.2															
0,3		+	-			Выхо	ЪД								~
								<							>:

Рисунок 4.4 – Панель программы «Деформация»

Для начала работы указывается размер рассматриваемой области и количество пунктов сети. Информацию о точках можно вводить вручную или случайным образом. Для второго случая используется клавиша «Random» (случайно), после чего заданное количество точек случайным образом распределяется по всей области. При нажатии кнопки «Точки» в окне просмотра мы видим их положение (рисунок 4.5).

Координаты точек	4
Размер области 100	
Общее количество точек 30	
Область Точки Фигура Random	
Зоны Вороного Триангуляция Деформационная сеть	
Количество треугольников	
Площадь треугольников	
Повторные наблюдения Деформация	
0,3 + _ 0,4 Выход	

Рисунок 4.5 – Расположение точек в окне просмотра

По полученным данным мы можем построить диаграммы Вороного путем нажатия соответствующей клавиши, а также разбить область на треугольники путем нажатия на «Триангуляция» (рисунок 4.6).

107

 Координаты точек
 О

 Размер области
 100

 Общее количество точек
 30

 Область
 Точки
 Фигура
 Random



б)

a)



Рисунок 4.6 – Создание диаграммы Вороного (а) и триангуляции (б)

Треугольники, выделенные цветом, образуют деформационную сеть. Клавиша «Деформационная сеть» позволяет ограничить только ее отображение. Дальше можно использовать повторные наблюдения. Они также вводятся в 3 и 4 строки таблицы (рисунок 4.4) или моделируются при нажатии кнопки «Повторные наблюдения».

Координаты деформационной сети при повторных наблюдениях могут быть получены в другой системе координат со свободной станции. После нажатия клавиши «Деформация» происходит приведение двух систем в единую с определением смещенных элементов по инвариантным параметрам (площадь элементов, длины линий, углы в треугольниках). В случае, если координаты всех точек совпали, то деформационная сеть будет отображена без красных элементов. В противном случае, будут выявлены и визуализированы элементы, которые подверглись деформации.

Для примера координаты точки 9 оказались отличными от тех, которые были получены в результате предыдущих наблюдений или были намеренно изменены. Так, в первом наблюдении
значения составили 67,8731, а во втором они оказались 67,8000. Соответственно, программа учла эти изменения и обнаружила деформацию (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Деформированные элементы деформационной сети

# 4.2 Схема маркшейдерских наблюдений при комбинированном сценарии развития оползня

При прогнозировании комбинированного механизма оползня маркшейдерские наблюдения на земной поверхности предлагается дополнить отслеживанием деформаций, возникающих на нижних уступах склоновой части борта с максимально возможным охватом призмы обрушения. Для этого методика наблюдений дополняется использованием метода наземного лазерного сканирования. Для его реализации на подошве карьера планируется закладывать несколько пунктов планово-высотного обоснования НЛС. Они закрепляются на постоянной или временной основе в зависимости от интенсивности ведения горных работ на расстоянии 3-5 h (h – высота уступа) от нижней бровки карьера с расчетом охвата всей ПООЗ (нижних уступов склоновой части борта).

В зависимости от конфигурации карьера, места установки сканерных станций могут располагаться и на безопасных участках соседних бортов. Однако, в рамках работы подробнее рассматривается вариант наблюдений с подошвы карьера.

С учетом того, что наблюдения на земной поверхности и на подошве карьера требуется выполнять в единых системах координат и высот, связь между пунктами может выполняться с помощью спутниковых приёмников, электронных тахеометров или комбинацией данного оборудования.

Обобщенная схема выполнения комплекса наблюдений при комбинированном сценарии оползня приведена на рисунках 4.8, 4.9.



Рисунок 4.8 – Схема наблюдений при комбинированном сценарии оползня (вид сбоку)



Рисунок 4.9 – Схема наблюдений при комбинированном сценарии оползня (вид сверху) В общем виде последовательность действий каждого цикла наблюдений включает следующие этапы:

1. Проверку стабильности опорной маркшейдерской сети (ОМС) и опорных реперов с помощью статических спутниковых наблюдений и/или электронных тахеометров\*;

110

2. Наблюдения на земной поверхности (перечень действий приведен в разделе 4.2.1);

3. Создание сети ПВО лидарной съемки (временного для каждого цикла или постоянного для нескольких циклов сканирования);

4. Связь реперов деформационной сети на земной поверхности и пунктов ПВО НЛС с помощью спутниковых приёмников и/или электронных тахеометров (на каждом цикле наблюдений);

5. Привязка деформационной сети на земной поверхности и ПВО НЛС к пунктам ОМС с помощью спутниковых приёмников и/или электронных тахеометров (на каждом цикле наблюдений);

6. НЛС борта карьера и ПВО с выбором необходимых параметров съемки и камеральную обработку с сопоставлением результатов с данными предыдущего цикла.

\* Могут применяться либо спутниковые наблюдения, либо использоваться электронные тахеометры, в зависимости от обеспеченности условиями для использования первых, а также оба метода совместно для контроля наблюдений разным оборудованием.

# 4.2.1 Проверка стабильности опорной сети

Вопросу стабильности опорных реперов следует уделять пристальное внимание перед каждым циклом наблюдений за деформациями. Выше было показано, как выполняется оценка деформаций после каждого цикла наблюдений. При таком подходе автоматически определяется стабильность опорных реперов.

В рамках диссертационного исследования для проверки стабильности опорной сети предлагается использовать геодезические спутниковые определения в статическом режиме. В качестве дополнительного варианта рекомендовано проверять постоянство горизонтальных углов и линий с помощью электронных тахеометров в отражательном режиме с установкой отражателей над опорными реперами (центрированием, горизонтированием, определением высоты установки). Контроль стабильности перед циклами наблюдений за деформациями целесообразно применять с помощью методов, упомянутых выше.

Кроме того, на многих горнодобывающих предприятиях активно оборудуют постоянно действующие спутниковые референцные станции, позволяющие непрерывно выполнять измерения и определения пространственного местоположения объектов путем предоставления информации, получаемой с помощью ГНСС. Они обеспечивают постоянный сбор спутниковых данных для постобработки (PP) и корректирующей информации для работы в режиме реального времени (RTK).

#### 4.2.2 Создание сети ПВО лидарной съемки

На данном этапе следует разработать и закрепить сеть планово-высотного обоснования для последующей процедуры ориентирования облаков точек лазерных отражений (регистрации, "сшивки").

Традиционно выделяют три основных варианта объединения данных наземного сканирования в единую систему координат:

1. Аналитический метод, основанный на использовании набора специальных сканерных марок и/или характерных точек объектов, дешифрируемых на сканах, для которых известно положение в системе координат сканера и проектной системе координат;

2. Прямой (инструментальный) метод, основанный на оперативном определении элементов внешнего ориентирования с помощью встроенных устройств;

3. Метод анализа аналогии формы перекрывающихся участков.

В первом варианте для определения пространственного положения марок в проектной системе координат обычно используют тахеометры и спутниковые приемники. Во втором случае уповают на оперативное получение элементов внешнего ориентирования с помощью лазерных центриров, датчиков наклона (инклинометров) и/или возможности установки на прибор ГНСС-приёмника. Таким образом, линейные элементы внешнего ориентирования, а также крен и тангаж определяются с помощью технического оснащения лидара. Дополнительно находится лишь рысканье с целью ориентирования в плане, для чего сканируется минимум одна марка с известными целевыми координатами. Третий вариант используется для взаимного ориентирования результатов сканирования на основе модификаций итеративного алгоритма ближайших точек (англ. Iterative Closest Point — ICP).

В целом практика НЛС на сегодня, в том числе при решении горнотехнических задач, показывает, что для решения даже одной производственной задачи можно использовать сразу все обозначенные варианты. Так, современное ПО имеет возможности безмарочного ориентирования данных сканирования, полученных с соседних станций, формируя на их основе регистрационные группы и кластеры. Вместе с тем, большинство современных лидаров имеет встроенные датчики наклона, что также учитывается в ходе ориентирования. Кроме того, многие приборы имеют возможность установки спутниковых приемников с опцией ввода оффсет-параметров, что наряду с определением пространственных координат ряда марок внешнего ориентирования позволяет оперативно приводить материалы регистрационных групп в требуемую систему координат (выполняется внешнее ориентирование регистрационных групп точечных моделей).

Таким образом, использование только аналитического метода, либо лишь датчиков наклона уже не является единичным условием, ведь лидары стали функциональнее, а ПО более разносторонним.

Сканерные марки могут быть плоскими и объемными (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Примеры сканерных марок

Для плоских марок выполняется определение геометрического центра объекта, однозначно контрастирующего с окружающими поверхностями. Для объёмных марок выполняется определение центра геометрической фигуры известной формы и размеров. Программы обработки результатов сканирования зачастую имеют инструменты для автоматического вычисления центра различных типов марок, лежащих в указанной области. Преимуществом объёмных марок является возможность их наблюдения с любой стороны. В то же время, все упомянутые цели могут устанавливаться на устройства, аналогичных трегерам с адаптерами, для разворота с сохранением координат центра.

При циклических наблюдениях за ПООЗ целесообразно выполнять НЛС с одних и тех же или близких позиций, в связи с чем для сопоставления разновременных съемок в единой СК следует иметь не менее двух сканерных марок и использовать встроенные устройства лидаров (двухосевые и трехосевые датчики наклона). Третья цель может использоваться как в качестве резервной, так и в качестве контрольной.

Показания датчика наклона в общем виде позволяют запоминать отклонения прибора от вертикали в процессе всей съемки и учитывать их в ходе обработки данных. Точность двухосевого датчика наклона на примере лидара импульсного типа Riegl VZ-400 (Австрия) 2009 года выпуска составляет  $\pm 0.008^{\circ}$  в диапазоне  $\pm 10^{\circ}$ . Более современная линейка приборов снабжается уже трехосевыми акселерометрами.

В рамках методики для приведения результатов сканирования в проектную систему координат предлагается применение сканерных пунктов различной модификации. В качестве примера рассмотрим комбинацию пространственной (в виде сферы) и плоской (в виде диска) марок, центры которых расположены на одной отвесной прямой. Конструкция может фиксироваться на пункте принудительного центрирования на основе сваи или металлической трубы. Вариант исполнения вместе с основанием и ограждением приведен на рисунке 4.11. Вместе с тем возможны варианты установки лидара и сканерных марок на типовых пунктах с

устройствами принудительного центрирования (рисунок 4.12), при этом должно предусматриваться условие заглубления в зависимости от типа грунта и глубины сезонного промерзания [16, 32].



Рисунок 4.11 – Сканерный пункт



Рисунок 4.12 – Пример устройства пункта принудительного центрирования

Важными условиями производства работ являются закрепление марок в зонах хорошей видимости, а также недоступность для смещения техникой и персоналом. В случае невозможности установки или сохранности пунктов ПВО НЛС на длительный период из-за интенсивности проводимых работ, в качестве ПВО сканерной съемки устанавливают временные реперы. Лидар и марки при этом размещают на штативах, биподах и триподах.

# 4.2.3 Связь реперов на земной поверхности и на подошве карьера

Ранее отмечалось, что наблюдения на земной поверхности и на подошве карьера на всех циклах наблюдений должны выполняться в единых системах координат и высот. Для этого условия должны выполняться маркшейдерские наблюдения, связывающие ПВО НЛС (набор сканерных марок) и реперы деформационной сети.

В зависимости от геометрии борта карьера, конфигурации ОМС, наличия референцных базовых станций эту задачу можно решить с помощью спутниковых приёмников или электронных тахеометров, либо комбинацией данного оборудования.

Исходя из применяемых средств на площадках пунктов ПВО НЛС кроме сканерных марок посменно, могут устанавливаться ГНСС-оборудование для спутниковых измерений и отражатели для наблюдений тахеометром с земной поверхности.

# 4.2.3.1 Объединение в единую систему координат реперов на земной поверхности и на подошве карьера тахеометрическим способом

В работе рассмотрен вопрос получения предварительной точности передачи координат и высот на подошву карьера с земной поверхности для различных тахеометров. Для расчетов использовались формулы (4.1 - 4.3) СКП метода полярной засечки и СКП тригонометрического нивелирования, а также общая СКП планово-высотного положения:

$$m_{xy} = \sqrt{m_s^2 + \frac{D^2 \cdot m_\beta^2}{\rho^2}},$$
(4.1)

$$m_{z} = \sqrt{\left(\frac{m_{v}}{\rho}S \cdot \cos v\right)^{2} + (m_{s} \cdot \sin v)^{2} + m_{I}^{2} + m_{O}^{2}},$$
(4.2)

$$M = \sqrt{m_{xy}^2 + m_z^2},$$
 (4.3)

где  $m_{xy}$  – СКП планового положения в мм,  $m_z$  – СКП положения по высоте в мм, М – СКП положения в плане и по высот в мм,  $m_s$  – СКП измерения расстояния в мм,  $m_{\beta}$  – СКП измерения горизонтального угла в секундах,  $m_v$  – СКП измерения вертикального угла в секундах, D – измеряемое горизонтальное расстояние в мм, S – измеряемое наклонное расстояние в мм, v – измеряемый вертикальный угол,  $m_I$  – погрешность определения высоты прибора в мм,  $m_0$  – погрешность определения высоты цели в мм,  $\rho$  - 206265".

Приборный ряд тахеометров с различными заявленными погрешностями измерения углов и расстояний на отражатель на примере Leica представлен в таблице 4.2.

Электронный тахеометр	m(β), ''	m(S), мм
Leica TS02plus R500	5	1,5+2 ppm
Leica TS03 R500	3	1+1,5 ppm
Leica TS07 R1000	2	1+1,5 ppm
Leica TS07 R500	1	1+1,5 ppm
Leica TS60	0,5	0,6+1 ppm

Таблица 4.2 – Технические характеристики рассматриваемых тахеометров

При расчетах варьировались глубина, угол борта и отступы от нижних уступов (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Типовая схема борта

Исходя из выбранных геометрических характеристик бортов, средствами системы автоматизированного проектирования NanoCAD получены числовые значения D, S и v для 25 случаев. Данные приведены в таблице 4.3.

			Отступ от			
№ случая	Угол борта, °	Глубина, м	нижнего	D, м	S, м	v, °
			откоса, м			
1		40	12	82,282	91,490	25,9259
2		80	26	165,564	183,879	25,7897
3	30	160	50	328,128	365,059	25,9945
4		320	100	655,256	729,219	26,0290
5		640	200	1309,512	1457,540	26,0462
6		40	12	66,082	77,245	31,1870
7		80	26	133,164	155,347	30,9960
8	37	160	50	263,327	308,125	31,2832
9		320	100	525,654	615,396	31,3316
10		640	200	1050,309	1229,938	31,3558
11		40	12	53,000	66,400	37,0425
12		80	26	107,000	133,600	36,7841
13	45	160	50	211,000	264,804	37,1728
14		320	100	421,000	528,811	37,2383
15		640	200	841,000	1056,826	37,2711
16		40	12	44,251	59,651	42,1112
17		80	26	89,503	120,045	41,7912
18	52	160	50	176,006	237,861	42,2728
19		320	100	351,011	474,983	42,3539
20		640	200	701,023	949,228	42,3946
21		40	12	36,094	53,877	47,9385
22		80	26	73,188	108,427	47,5462
23	60	160	50	143,376	214,841	48,1365
24	1	320	100	285,752	429,015	48,2359
25		640	200	570,504	857,365	48,2858

Таблица 4.3 – Данные для расчета СКП точек на подошве карьера

Результаты расчетов приведены в таблице 4.4 для m<sub>I</sub> и m<sub>O</sub> приняты значения 1 мм.

Прибор	Leica	TS02	olus	Leica TS03 Leica TS07		)7	Leica TS07			Leica TS60					
	R5	00 (5"	)	R5	00 (3"	)	R1000 (2")		K500(1)		)	()	0.5")		
СКП,	$m_{xy}$	$m_z$	М	$m_{xy}$	$m_z$	М	$m_{xy}$	$m_z$	М	$m_{xy}$	$m_z$	Μ	$m_{xy}$	$m_z$	Μ
MM		MM			MM			MM			MM			MM	
1	3	3	4	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2
2	4	4	6	3	3	4	2	2	3	1	2	2	1	2	2
3	8	8	12	5	5	7	4	4	5	2	2	3	1	2	2
4	16	16	23	10	10	14	7	7	9	4	4	5	2	2	3
5	32	32	45	19	19	27	13	13	18	7	7	10	4	4	5
6	3	2	4	2	2	3	2	2	3	2	2	3	1	2	2
7	4	4	5	2	3	3	2	2	3	1	2	2	1	2	2
8	7	7	9	4	4	6	3	3	4	2	2	3	1	2	2
9	13	13	18	8	8	11	5	5	8	3	3	4	2	2	3
10	26	26	36	16	15	22	11	10	15	6	6	8	3	3	4
11	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2
12	3	3	4	2	2	3	2	2	3	1	2	2	1	2	2
13	6	5	8	3	4	5	2	3	4	2	2	3	1	2	2
14	11	10	15	6	6	9	4	5	6	3	3	4	1	2	2
15	21	21	29	12	12	18	9	8	12	5	5	7	3	3	4
16	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2
17	3	3	4	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2
18	5	5	7	3	3	4	2	2	3	2	2	3	1	2	2
19	9	9	12	5	5	8	4	4	5	2	3	3	1	2	2
20	17	17	24	10	10	15	7	7	10	4	4	6	2	2	3
21	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2
22	2	3	4	2	2	3	1	2	2	1	2	2	1	2	2
23	4	4	6	2	3	4	2	2	3	1	2	2	1	2	2
24	7	7	10	4	5	6	3	3	5	2	2	3	1	2	2
25	14	14	20	9	9	12	6	6	8	3	4	5	2	2	3

Таблица 4.4 – Значения СКП точек для тахеометров разной точности

Для наглядности представления полученных результатов построены графики зависимости СКП от высоты и угла борта карьера для рассмотренного приборного ряда (рисунки 4.14 – 4.18).



Рисунок 4.14 – СКП точек на подошве карьера с углом борта 30°



Рисунок 4.15 – СКП точек на подошве карьера с углом борта 37°



Рисунок 4.16 – СКП точек на подошве карьера с углом борта 45°



Рисунок 4.17 – СКП точек на подошве карьера с углом борта 52°



Рисунок 4.18 – СКП точек на подошве карьера с углом борта 60°

Полученные результаты могут использоваться в рамках вспомогательного материала при проектировании мест установки тахеометра с целью связи ПВО на земной поверхности и подошве карьера.

#### 4.2.3.2 Использование спутниковых определений

В зависимости от желаемой точности и перечня задач, маркшейдерско-геодезическое спутниковое оборудование в основном используют в режимах статики и кинематики в реальном времени (Real Time Kinematic, RTK). В первом случае наблюдения выполняются одновременно между двумя и более неподвижными приемниками продолжительный период времени. В результате достигается максимальная точность, в том числе в ограниченных условиях измерений с минимальным количеством спутников. Продолжительность цикла наблюдений связана с длинами линий, числом одновременно наблюдаемых спутников, характеристик приёмников. Вариант RTK подразумевает получение координат и высот точек с помощью подвижного приемника (ровера) на уровне первых сантиметров посредством получения поправок с базовой станции.

В рамках методики режим кинематики в реальном времени целесообразно применять при топографической съемке для создания цифровой модели карьера. В ходе работ по наблюдениям за деформациями целесообразно использовать более точные статические наблюдения с постобработкой. В [46] также отмечается, что при спутниковом мониторинге определение координат реперов производится в дифференциальном режиме с установкой базовой станции на исходных или опорных реперах.

Состав спутниковых наблюдений на каждом цикле обязательно включает привязку нескольких реперов деформационной сети на земной поверхности за пределами ПООЗ и ПВО

НЛС, а также при необходимости пункты, над которыми устанавливаются тахеометр и лидар. Вместе с тем, спутниковый приемник может осуществлять сбор данных и параллельно с процессом сканирования.

Пример спутниковых определений показан на рисунке 4.19. Здесь показаны 2 постоянно действующие базовые станции, кроме того, на одном из пунктов ОМС дополнительно установлена полевая базовая станция. На определяемых пунктах последовательно устанавливается еще один приёмник и на каждом сходится не менее 3 векторов. При остуствии референцных станций можно работать как от одной базы, установленной на исходном, опорном репере или на пункте ОМС, либо установить на них ряд приёмников.



Рисунок 4.19 – Схема наблюдений за деформациями с использованием технологии ГНСС Для реализации относительных спутниковых определений следует использовать два или более приемников, один из которых является базовой станцией, а остальные - подвижными. На каждом определяемом пункте наблюдения выполняются одним приемом с записью «сырых» данных в память приёмника. Измерения на полевой или референцной базовой станции и перемещаемом приёмнике должны выполняться одновременно. Во время сеанса наблюдений оборудование неподвижно. Продолжительность сеанса измерений связана с удалением от референцной или полевой базовой станции (длины базового вектора), количества отслеживаемых приемниками спутников, изменения геометрии спутников и необходимой точности. При этом возможна одновременная работа нескольких приёмников, что дает возможность уравнивания сети.

Влияние конфигурации спутникового созвездия на точность спутниковых определений характеризуется фактором понижения точности DOP (dilution of precision), представляющего собой отношение СКП определения местоположения к СКП измерения расстояний до спутников. Наивысшая точность спутниковых измерений достигается при минимальных значениях DOP, поэтому его значения обычно лимитируются при наблюдениях. В поле зрения приёмника должны попадать спутники, находящиеся в разных частях небесной сферы, чего иногда сложно добиться при расположении прибора внутри карьера ввиду сокращения угла обзора. В этой связи, рационально применять современные многосистемные приборы, которые используют ГНСС ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), BeiDou (Китай) и Galileo (Европейский союз). Хотя и известно, что для определения пространственных координат требуется отслеживать не менее 4 спутников с продолжительностью наблюдений не менее 20 минут, но данные условия все более актуальны при использовании оборудования, в основном уже снятого с производства.

Для получения качественных результатов перед сеансом следует придерживаться ряда условий:

- число наблюдаемых спутников должно быть более 10, а их углы возвышений не менее 15°;

- коэффициент потери точности совокупного определения местоположения PDOP не должен превышать 6;

- частота записи 15 секунд.

Во время проведений наблюдений исполнитель обеспечивает бесперебойное питание оборудования, контролирует ход измерений и ведёт журнал наблюдений. В случае превышения допуска PDOP необходимо спланировать и провести новый сеанс.

Для определения точности положения пункта с помощью спутникового оборудования выбрано 10 современных приёмников от различных производителей. Их точностные характеристики приведены в таблице 4.5.

	Точность								
		Ста	гика		RTK				
Приемник	2	ху	Z		ху		Z		
	MM	ppm	MM	ppm	MM	ppm	MM	ppm	
S-Max GEO	3	0,1	3,5	0,4	8	0,5	15	0,5	
УОМЗ MP-10	3	1	5	1	10	1	20	1	
EFT M5 RUS	2,5	0,5	5	0,5	5	0,5	10	0,8	
Trimble-R12	3	0,1	3,5	0,4	8	0,5	15	0,5	
PrinCe i90 VR	2,5	0,5	5	0,5	8	1	15	1	
South G4	2,5	0,1	3	0,4	8	0,5	15	0,5	
Leica GS18	3	0,1	3,5	0,4	8	0,5	15	0,5	
SinoGNSS T300 PLUS	3	0,1	3,5	0,4	8	1	15	1	
Stonex S990	2,5	0,1	3,5	0,4	5	1	10	1	
Javad Triumph 2	3	0,5	3,5	0,4	10	1	15	1	

Таблица 4.5 – Характеристики спутниковых приёмников

В силу схожести основных параметров и некоторых различий ppm для дальнейшего рассмотрения выделены приборы УОМЗ МР-10 и Stonex S990. Был выполнен предварительный расчёт погрешности определения положения пунктов в различных режимах по формуле (4.4):

$$M = \sqrt{M_{XY}^2 + M_Z^2},$$
 (4.4)

где  $M_{XY}$  – СКП определения плановых координат в мм,  $M_Z$  – СКП определения высот в мм.

Значение М<sub>XY</sub> вычисляется по формуле (4.5):

$$M_{XY} = \sqrt{m_{XY}^2 + m_c^2},$$
 (4.5)

где m<sub>xy</sub> – погрешность приёмника в мм, m<sub>c</sub> – ошибка центрирования в мм.

Значение  $m_c$  связано с чувствительностью уровня и высотой установки приёмника над пунктом. В рамках методики предложена установка пунктов принудительного центрирования. Для иных случаев предусмотрено использование штативов с трегерами. В расчёте для варианта статических наблюдений принято  $m_c = 1$  мм. В случае с режимом RTK обычно используют телескопические вехи с приведением прибора в вертикальное положение вручную по круглому уровню. Для данного варианта принято  $m_c = 4$  мм.

Значение  $M_Z$  вычисляется по формуле (4.6):

$$M_{XY} = \sqrt{m_z^2 + m_i^2},$$
 (4.6)

где  $m_z$  – погрешность приёмника в мм,  $m_i$  – ошибка определения высоты прибора, принятая 1 мм.

Выполнен предварительный расчёт точности определения положения пункта на различных расстояниях от исходного пункта. Результат представлен в таблице 4.6.

									TONEX			
D.			<b>YOM</b> 3	8 MP-10					Stone	ex S990		
КМ			Точ	ность					Точ	ность		
	(	татика		M	RTK	м	( (	татика		M	RTK	
	MXY, MM	Mz, MM	M, MM	Mxy, MM	MZ, MM	MI, MM	Mxy, MM	Mz, MM	M, MM	MXY, MM	MZ, MM	M, MM
1	4	6	7	12	21	24	3	4	5	7	11	13
2	5	7	9	13	22	25	3	4	5	8	12	14
3	6	8	10	14	23	27	3	5	6	9	13	16
4	7	9	11	15	24	28	3	5	6	10	14	17
5	8	10	13	16	25	29	3	6	7	11	15	19
6	9	11	14	16	26	31	3	6	7	12	16	20
7	10	12	16	17	27	32	3	6	7	13	17	21
8	11	13	17	18	28	34	3	7	8	14	18	23
9	12	14	18	19	29	35	4	7	8	15	19	24
10	13	15	20	20	30	36	4	8	9	16	20	26
11	14	16	21	21	31	38	4	8	9	16	21	26
12	15	17	23	22	32	39	4	8	9	17	22	28
13	16	18	24	23	33	40	4	9	10	18	23	29
14	17	19	26	24	34	42	4	9	10	19	24	31
15	18	20	27	25	35	43	4	10	11	20	25	32
16	19	21	28	26	36	45	4	10	11	21	26	33
17	20	22	30	27	37	46	4	10	11	22	27	35
18	21	23	31	28	38	47	4	11	12	23	28	36
19	22	24	33	29	39	49	5	11	12	24	29	38
20	23	25	34	30	40	50	5	12	13	25	30	39

Таблица 4.6 – Предварительный расчёт точности определения координат пункта

Камеральная обработка спутниковых наблюдений выполняется с использованием профильного программного обеспечения (ТИМ КРЕДО ГНСС, Trimble Business Center, MAGNET Office Tools).

Постобработка результатов наблюдений выполняется в следующей последовательности. Сначала вычисляются приращения координат между возможными комбинациями пунктов сети, на которых имелись синхронные наблюдения сигналов навигационных спутников. При этом используются методики подавления многолучевости и исключения зашумлённых спутниковых каналов. Далее осуществляется оценка качества измерений, осуществляется уравнивание и траснформация данных в принятую на объекте систему координат.

Основными критериями контроля являются:

- разрешение неоднозначностей при определении расстояний до спутников;

- оценка точности по внутренней сходимости результатов обработки;

- сходимость результатов по замкнутым построениям в сети.

Невязки в плане замкнутого полигона и повторно измеренных векторов оцениваются с соблюдением условия  $T < e \cdot \sqrt{4}$  число векторов в полигоне + a · L, где е и а – величины, связанные с приборной точностью, L – длина полигона.

#### 4.2.4 Наземное лазерное сканирование

Ключевой причиной реализации технологии наземного лазерного сканирования является оперативное определение пространственных координат множества точек поверхности объекта съемки в автоматическом режиме путём применения специального прибора - лазерного сканера (лидара). В отличие от воздушного и мобильного лидаров, съемочная система располагается на штативе или заменяющем его устройстве, а сам прибор в ходе съемки неподвижен.

Непосредственным результатом наземного лазерного сканирования является цифровая трехмерная модель объекта, представляющая собой набор точек лазерных отражений (ТЛО). В общем виде каждая ТЛО включает данные о пространственных координатах (сферических или прямоугольных) в системе координат лидара, интенсивности отраженного сигнала, реальном цвете и т.д.

Результаты наземной лидарной съемки на одной станции могут быть представлены в виде растровой модели (рисунок 4.20а) или в виде массива точек (рисунок 4.20б).



Рисунок 4.20 – Результат наземного лазерного сканирования карьера:

а) в виде растровой модели; б) в виде массива точек.

В первом случае экранные координаты пикселей растра соответствуют координатам ТЛО. Несмотря на то, что данное представление сильно искажено, оно отражает всю область пространства вокруг сканера. Во втором случае модель приобретает естественную трехмерность. Если с лидаром используется цифровая камера, то каждая ТЛО может быть связана с пикселем изображения на основе фотограмметрических методов.

Координаты ТЛО изначально вычисляются в условной системе координат прибора, в которой начало расположено в центре устройства развертки, ось Z направлена вдоль оси вращения, а ось X – вдоль направления излучения лазерного луча дальномера.

В случае использования данного оборудования почти не применяются такие операции, как поиск и наведение на цель, так как пространственное положение точек поверхности объекта регистрируется автоматически с производительностью сотни тысяч в секунду.

Основными структурными элементами НЛС являются дальномерный блок, оптикомеханический блок развертки, приемо-передающий тракт дальномера и канал передачи данных на управляющее устройство со специализированным ПО.

Наземные сканеры представлены на рынке большим ассортиментом моделей, отличающихся техническими параметрами, принципом действия, габаритами и областями применения. Наиболее важными особенностями, определяющими возможности прибора, зачастую являются дальность действия и точность. Данные характеристики напрямую связаны с методом измерения расстояний: фазовым, импульсным или на основе прямой угловой засечки.

Сканеры, реализующие для измерения расстояния до объекта метод прямой угловой засечки, имеют точность от 50 мкм до 0,3 мм при дальности действия от десятков сантиметров до десятков метров. Зачастую, ограниченная дальность действия исключает данные приборы из рассмотрения в качестве целесообразных средств сбора геопространственной информации.

При работе фазовых лидаров фиксируется фазовый сдвиг сигнала, прошедшего расстояние 2D до точки измеряемого объекта и обратно.

Импульсные лидары фиксируют время распространения сигнала, прошедшего расстояние 2D до точки измеряемого объекта и обратно.

Общими достоинствами импульсного метода перед фазовым является высокая дальность действия при относительно невысокой мощности импульса, а также однозначность получаемого результата за счет того, что измеренная дальность пропорциональна времени распространения сигнала. Так, максимально измеряемое расстояние с учетом коэффициента отражения поверхности 80-90 % может достигать 6000 м для импульсных сканеров и 350 м в случае использования фазовых. Но преимуществами фазовых приборов являются повышенная производительность (до 2 млн. точек/сек) и максимальная точность измерения расстояний (1 мм против 3 мм у импульсных).

Как было отмечено, одним из основных показателей при выборе прибора является точность определения пространственных координат точки в системе координат прибора. Для определения данной погрешности используется формула (4.7):

$$m_{XYZ} = \sqrt{m_S^2 + \left(\frac{m_\beta \cdot S}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{m_\alpha \cdot S}{\rho}\right)^2} , \qquad (4.7)$$

где  $m_{XYZ}$  - погрешность определения точки, мм;  $m_s$  - погрешность расстояния дальномером, мм;  $m_{\beta}$  - погрешность измерения вертикального угла, секунды;  $m_{\alpha}$  - погрешность измерения горизонтального угла, секунды; S – расстояние до определяемой точки, мм;  $\rho = 206265''$ .

Помимо представленных технических характеристик, при выборе оборудования с повышенным вниманием следует отнестись к следующим:

- минимальный угловой шаг сканирования, определяющий наибольшую плотность съемки;

- угол поля зрения, определяющий наибольшую область охвата с отдельной станции;

- диапазон допустимых рабочих температур и внешних условий;

- возможность ориентирования.

# 4.2.4.1 Наземные лазерные сканеры для открытых горных работ

В настоящее время на рынке геодезического оборудования представлены следующие производители наземных лидаров: Riegl, Leica, Trimble, Topcon, Faro, Z+F, GeoMax, Surphaser, Hi Cloud, Stonex.

Наибольшее распространение при открытых горных работах нашли импульсные сканеры, сочетающие точность, достаточную для большинства видов работ, а также внушительную дальность измерений. Рассмотрим ряд актуальных моделей.

Наибольшее распространение на карьерах получили сканеры производства Riegl (Австрия) [40].

Среди других импульсных сканеров, обеспечивающих сбор данных на расстояниях сотен метров можно выделить приборы Leica ScanStation P50 с заявленной точностью измерений 3 мм и фиксацией точек на расстояниях до 1000 м, AM.TECH GLS1000 (3 мм с измерениями до 1500 м), South SPL-1500 (5 мм с измерениями до 1500 м), Stonex X300 (6 мм с измерениями до 300 м) и GeoMax Zoom (<10 мм с измерениями до 300 м).

Сводная таблица для основных моделей приведена в таблице 4.7.

		RIEGL VZ	- RIEGL V	Z- RIEGL VZ-	RIEGL VZ-		
		400i	600i	2000i	4000		
Изо	бражение						
Макси-	$ ho \ge 90\%$	800	1000	2500	4000		
расстоя- ние, м	$ ho \ge 20\%$	400	450	1300	2300		
Наимены расс	иее измеряемое — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	0,5	0,5	1	5		
Точн	ность, мм*	5	3	5	15		
Повтор	ояемость, мм	3	3	3	10		
Частота пов импу	Частота повторения лазерных импульсов, кГц		150 - 22	50-1200	30-300		
Мак производите	симальная ельность, изм./сек	500 000	2 200 0	00 500 000	222 000		
Угол скани-	вертикальный	100 (-40/+60)	105 (-40/+6	100           5)         (-40/+60)	60 (-30/+30)		
рования, °	горизонтальный	360	360	360	360		
Разре- шение	вертикальное	0,0007	0,0007	7 0,0007	0,0005		
угловых измерений, °	горизонтальное	0,0005	0,0005	5 0,0005	0,0005		
Сенсорі	ы ориентации	3-осево 3-осево	Датчик наклона, компас				
Лазерн	ный центрир	+		+	+		
ГНСС	С-приёмник		вс	строенный L1			
Возможность установки внешнего ГНСС-приёмникв		+	+	+	+		
Температу	ура хранения, °С		C	от -10 до +50			
Температу раб	ура стандартной боты, °С			от 0 до +40			
Работа тем	и при низкой пературе	-20 °С при условии, что температура прибора не ниже 0°С и без ветра; -40 °С: сканирование в течение 20 минут при условии, что температура прибора не ниже 15°С и нет ветра -20 °С при условии, чт температура прибора не ниже 15°С и нет ветра					
l	Вес, кг	9,7	6	9,8	14,5		

Таблина 4.7 – Ст	равнение наземных	импульсных лаз	ерных сканеров RIEG	ίL
тастица пл с				

\* По данным испытаний компании на фиксированных расстояниях.

В качестве альтернативы сканерам производства Riegl в ближайшей перспективе можно рассмотреть приборы, выпускаемые компанией Wuhan Hi-Cloud Technology Co (Китай). Сводная таблица для основных моделей приведена в таблице 4.8.

	HS300X	HS500i	HS650i	HS1000i	HS1200 High Precision
расстояние, м	300	500	650	1000	1200
измеряемое ние, м	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5
измерения ия, мм *	5	5	5	5	5
Частота повторения лазерных импульсов, кГц		500	500	500	500
вертикальный	100 (-40/+60)	100 (-40/+60)	100 (-40/+60)	100 (-40/+60)	100 (-40/+60)
горизонталь- ный	360	360	360	360	360
вертикальное	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
горизонталь- ное	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Температура стандартной работы °С		от -20 до +60	от -20 до +60	от -20 до +60	от -20 до +65
	расстояние, м измеряемое иние, м измерения ия, мм * ения лазерных сов, кГц вертикальный горизонталь- ный вертикальное горизонталь- ное стандартной ы, °C	HS300X           расстояние, м         300           измеряемое         1,5           измерения         5           ия, мм *         5           рения лазерных         500           сов, кГц         100           вертикальный         100           горизонтальный         360           вертикальное         0,002           горизонтальное         0,002	HS300XHS500iрасстояние, м300500измеряемое1,51,5ние, м1,51,5измерения55ия, мм *500500рения лазерных500500сов, кГц100100вертикальный100100горизонталь-360360вертикальное0,0020,001горизонталь-0,0020,001поризонталь-0,0020,001кое0,0020,001стандартнойот -10 до +65+60	HS300XHS500iHS650iрасстояние, м300500650измеряемое1,51,51,5ние, м1,51,51,5измерения555ия, мм *500500500сения лазерных500500500сов, кГц100100100вертикальный100(-40/+60)(-40/+60)горизонталь- ный360360360вертикальное0,0020,0010,001горизонталь- ное0,0020,0010,001стандартной ы, °Cот -10 до +65от -20 до +60от -20 до +60	HS300XHS500iHS650iHS1000iрасстояние, м3005006501000измеряемое ние, м1,51,51,52,5измерения ия, мм *5555ия, мм *5555ов, кГц500500500500вертикальный ный100 (-40/+60)100 (-40/+60)100 (-40/+60)100 (-40/+60)горизонталь- ный360360360360вертикальное0,0020,0010,0010,001горизонталь- ное0,0020,0010,0010,001стандартной ы, °Cот -10 до +65от -20 до +60от -20 до +60от -20 до +60от -20 до +60

Таблица 4.8 – Сравнение наземных импульсных лазерных сканеров Hi-Cloud

\* По данным испытаний компании на фиксированных расстояниях.

Кроме того, вместо непосредственно лидаров можно использовать и тахеометры с функцией сканирования. Они имеют более высокую точность, но меньшую производительность съемки. Опцию сканирования целесообразно применять для ограниченной области, указывая плотность сбора данных. Среди моделей рекомендуются Trimble SX10 и SX12 с угловой точностью 1", в режиме сканирования обеспечивающие сбор данных в диапазоне от 0,9 до 600 м с точностью 2 мм + 1,5 мм/км, а также Leica MS60 с точностью 2 мм + 2 ppm до 500 и 4 мм + 2 ppm от 500 до 1000 м.

# 4.2.4.2 Полевые работы

При установке наземного лидара следует соблюсти условие максимального охвата области интересов, а также прямой видимости сканерных марок. Их удаление от позиции сканера должно выбираться исходя из разрешения сканирования применяемого оборудования. Данный параметр позволяет с предельно возможной точностью определять координаты центров марок в системе координат сканера.

Для минимизации «мёртвых зон» в ряде случаев целесообразно увеличить расстояние до объекта съемки и увеличить высоту установки прибора.

Важно отметить, что максимальная дальность измерений зависит от коэффициента отражения объекта, приведенного в технических характеристиках сканера (рисунок 4.21). Для прибора RIEGL VZ-400 видно, что при коэффициенте отражения объекта 60% (скалы, песок,

кирпич) в режиме увеличенной дальности максимальное расстояние измерений при минимальной видимости составляет 425 м.



Рисунок 4.21 – График зависимости максимальной дальности измерений от коэффициента отражения объекта лазерного сканера RIEGL VZ-400

Для увеличения высоты установки лидара применяются специальные мобильные платформы, сбор данных с крыш автомобилей и т.п. В инженерной геодезии, особенно при создании геодезической разбивочной основы для линейных объектов, известны случаи применения пунктов с увеличенной высотой над уровнем земли и оформленной из металлоконструкций площадкой для наблюдений (рисунок 4.22).



Рисунок 4.22 – Пример устройства пункта принудительного центрирования с увеличенной высотой над уровнем земли

Такие устройства могут быть полезны и в рамках разрабатываемой методики для осуществления НЛС ПООЗ.

На каждом цикле наблюдений после определения координат ПВО для лидарной съемки осуществляется ряд действий.

Установка прибора на пункте принудительного центрирования или штативе с обеспечением максимального охвата интересующей области. На данном этапе может выполняться горизонтирование сканера, что актуально для моделей, не снабженных датчиком наклона вертикальной оси. При установке на штативе над временным репером, в зависимости от технической возможности оборудования, выполняется его центрирование. Кроме того, измеряется высота установки сканера с точностью 1 мм, а также ГНСС-приёмника в случае его использования, с учетом справочных размеров прибора (рисунок 4.23).



Рисунок 4.23 – Установка ГНСС-приёмника на сканер и заявленные размеры прибора Задание области сканирования путём установки сектора, ограничиваемого горизонтальными и вертикальными углами. Сначала целесообразно выполнить обзорное круговое сканирование (preview), а далее на основе полученного скана задать фрагменты для более подробной съемки.

Ввод параметров шага и режима сканирования.

Большинство современных моделей наземных лазерных сканеров имеет возможность задания произвольных значений шага сканирования в угловой и линейной мерах.

При его выборе в первую очередь следует руководствоваться расстоянием от прибора до объекта. Угловое разрешение следует задавать в соответствии с формулой (4.8):

$$\Delta \varphi(\Delta \theta) = \frac{180 \cdot d}{1.41 \cdot \pi \cdot S} \tag{4.8}$$

где  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \theta$  – разрешение сканирования по горизонтали и вертикали, d – минимальный размер объекта, который должен быть отображен на трехмерной модели, S –расстояние от точки стояния сканера до объекта съемки.

Для примера, если принять d = 0.05 м, то зависимость примет вид, как на рисунке 4.24.



Рисунок 4.24 – Функциональная зависимость углового шага сканирования

Если рассматривать заявленный максимальный шаг сканирования, то на примере лидара RIEGL VZ-400 это 0,0024°, что на расстоянии 300 м соотносится с линейной величиной 13 мм. Для лидара RIEGL VZ-600i данный параметр в горизонтальной плоскости уже 0,0015° и в вертикальной 0,0007°, что на расстоянии 300 м соответствует линейным величинам 8 мм и 4 мм.

С максимальной подробностью сканируются и марки внешнего ориентирования. Для расчета теоретического числа точек, попадающего на марку со стороной *l*, можно воспользоваться формулой (4.9) [14]:

$$N = \left(\frac{l}{R \cdot tg(\Delta\varphi)}\right)^2,\tag{4.9}$$

где l – размер марки, R – расстояние до марки,  $\Delta \varphi$  – шаг сканирования.

Так, при установке марки с размерами 10 см на расстояниях от 5 м до 100 м от лидара RIEGL VZ-400, количество точек, попавших на цель, будет составлять от 227973 до 570 соответственно (рисунок 4.25).



Рисунок 4.25 – Зависимость изменения числа точек, попавших на марку внешнего ориентирования, при максимальном шаге сканировании с различных расстояний

Если рассматривать заявленный максимальный шаг сканирования, то на примере лидара RIEGL VZ-400 это 0,0024°, что на расстоянии 300 м соотносится с линейной величиной 13 мм. Для лидара RIEGL VZ-600i данный параметр в горизонтальной плоскости уже 0,0015° и в вертикальной 0,0007°, что на расстоянии 300 м соответствует линейным величинам 8 мм и 4 мм.

Если рассматривать заявленный максимальный шаг сканирования, то на примере лидара RIEGL VZ-400 это 0,0024°, что на расстоянии 300 м соотносится с линейной величиной 13 мм. Для лидара RIEGL VZ-600i данный параметр в горизонтальной плоскости уже 0,0015° и в вертикальной 0,0007°, что на расстоянии 300 м соответствует линейным величинам 8 мм и 4 мм.

Касательно режима сканирования, следует учитывать, что ряд моделей наземных лидаров снабжен функциями, направленными на повышение точности измерений с помощью:

- фокусировки лазерного луча, осуществляемой вручную на фиксированное расстояние, либо в автоматическом режиме для каждого измерения;

- увеличения количества серий выполнения каждого измерения для последующего осреднения.

После выбора съёмочных параметров следует выполнить НЛС объекта, что является полностью автоматизированным процессом.

На этапе контроля необходимо удостовериться в завершении сбора данных, визуально проверить отсутствие "мёртвых зон" в полученной информации и подтвердить наличие всех сканерных марок.

В целом, для циклических наблюдений следует выполнять условия:

- выбора приборов одинакового класса точности;

- выполнения работ исполнителем соответствующей квалификации;

- соблюдения постоянство условий внешней среды;

- проверки постоянство геометрии сети планово-высотного обоснования.

#### 4.2.4.3 Камеральные работы

На сегодняшний день используется достаточное количество программных продуктов, позволяющих обрабатывать данные НЛС. ПО обычно разделяется на «родное», т.е. разработанное компаниями-производителями лидаров, а также универсальное. Среди основных операций для «сырых» данных следует выделить импорт данных, регистрацию для формирования точечной модели в проектной системе координат, фильтрацию, прореживание, экспорт в обменные форматы.

Важнейшим этапом камеральной обработки результатов НЛС является регистрация облаков точек с целью приведения точечных моделей, полученных с отдельных станций, в единую систему координат.

В общем виде требуется определить 6 элементов внешнего ориентирования:

- *3 угловых элемента* – (ε, η, ξ), определяющих разворот системы координат сканера вокруг осей координат X, Y и Z, для приведения их в равнонаправленное положение осям целевой системы координат;

- *3 линейных элемента* – (X0, Y0, Z0), определяющих величину линейного сдвига системы координат по соответствующим осям.

Преобразование координат точек из исходной системы координат в требуемую представляется в матричном виде (формула (4.10)):

$$\begin{bmatrix} X_{_{\mathcal{G}H}} \\ Y_{_{\mathcal{G}H}} \\ Z_{_{\mathcal{G}H}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \qquad (4.10)$$

где *Хвн, Үвн, Zвн* – координаты точек скана в требуемой системе координат; *X*, *Y*, *Z* – координаты точек в системе координат сканера; *X0, Y0, Z0* – линейные элементы внешнего ориентирования; *A* – матрица, определяющая величину разворота вокруг осей исходной системы координат *0XYZ* в равнонаправленное положение осям системы координат *0X8нYвнZвн*.

Использование однородных координат позволяет объединить матрицы сдвига и разворота, выражая все трансформации в одном произведении (формула (4.11)):

$$\begin{bmatrix} X_{_{\mathcal{B}H}} \\ Y_{_{\mathcal{B}H}} \\ Z_{_{\mathcal{B}H}} \end{bmatrix} = M_{_{SOP}} \cdot P_{_{hom}}, \qquad (4.11)$$

где *MSOP* - матрица трансформирования координатных систем вида (формула (4.12)):

$$M_{SOP} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & X_0 \\ b_1 & b_2 & b_3 & Y_0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
(4.12)

*а Phom* – матрица координат точек в исходной системе координат (формула (4.13)):

$$P_{\text{hom}} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix}^T.$$
(4.13)

*MSOP* для отдельного облака точек на примере программы RiScanPRO приведена на рисунке 4.26

🐴 P	Position ScanPos004										
Ge	General Tilt mount SOP Scaling correction GPS										
S	GOP: Roll: -0.	063 deg Pitch: 1.183	deg <b>Yaw</b> : -134.763	ldeg 💈							
Г	-0.704021297	0.710045469	-0.013763911	1403731							
	-0.709878460	-0.704154973	-0.015438479	413870							
	-0.020653948	-0.001098314	0.999786081	-4							
	0.00000000	0.00000000	0.000000000	1							

Рисунок 4.26 – Пример матрицы трансформирования

Ранее акцентировалось, что целесообразно с помощью встроенных устройств лидаров непосредственно определять элементы внешнего ориентирования. При центрировании прибора над точкой с известными координатами или использовании пунктов принудительного центрирования, а также задании высоты прибора относительно известной отметки, непосредственно задаются все линейные элементы внешнего ориентирования. Их же можно получить в статических спутниковых наблюдениях. При горизонтировании или учете показаний датчика наклона приводятся к нулю два угла разворота вокруг горизонтальных осей X и Y. Последний элемент внешнего ориентирования, отвечающий за разворот вокруг вертикальной оси Z, задается анализом измерений на сканерные марки, для которых известно положение в проектной системе координат.

Оценка точности при использовании набора сканерных марок включает анализ расхождений пространственного положения их центров в системе координат прибора и в проектной системе координат, а также ошибок определения элементов внешнего ориентирования.

В зависимости от имеющегося ПО можно применять некоторые корректирующие меры, каждая из которых позволяет проверять ТЛО и устанавливать значение качества в соответствии с конкретным методом. Если наблюдается выход за установленный порог, точка сканирования либо корректируется, либо удаляется. Выделяют фильтрацию в заданном диапазоне расстояний от позиции сканера, фильтрация отдельных групп точек, находящихся на некотором расстоянии от основного массива ТЛО, фильтрация по интенсивности, сглаживающий фильтр для изменения позиций ТЛО на основе усреднения с помощью соседей и так далее.

После регистрации и фильтрации сканов формируется единая цифровая точечная модель объекта. В зависимости от дальнейших задач можно использовать «родные» форматы наземных лидаров, либо конвертировать данные в наиболее универсальные файлы, например ASCII, LAS, LAZ.

#### 4.2.4.4 Сопоставление разновременных данных лазерного сканирования

Как отмечалось, процесс сбора данных методом НЛС почти полностью автоматизирован. Для анализа разновременных результатов съёмок требуется либо использовать непосредственно точечные модели, либо перейти к альтернативным вариантам представления.

До определенного времени считалось, что облако точек не может являться результирующим графическим документом в силу отсутствия возможности учёта всех составляющих и графической невоспринимаемости, сложности анализа ввиду большого объёма данных и т.д. Считалось, что необходима дальнейшая обработка, например создание плоских чертежей и трехмерных моделей.

На сегодняшний день сопоставление точечных моделей, полученных в разные временные отрезки, не является нерешенной задачей. Её выполнить, например, в открытом ПО CloudCompare. В диссертационном исследовании приводилась возможность использования данной программы для вычисления расстояний между различными облаками точек (раздел 2.2). Кроме того, алгоритмы вычисления разностей поверхностей формируемых по облакам точек реализованы в ряде коммерческих программных продуктах, в частности Riegl RiScan Pro, Golden Surfer, Geomagic Design X.

К текущему времени сформулировано множество подходов к сегментации облаков точек с группировкой точек по определенному сходству. Однородность сегментов может выражаться на основе определенных признаков, например геометрических свойств сегмента из массива ТЛО, подтверждающих математическую поверхность (нормали поверхности, градиенты и кривизна в окрестностях точек), либо данные об интенсивности отраженного сигнала ТЛО и спектральных свойствах ТЛО.

Вместе с тем, традиционно признавалось, что облако точек, как непосредственный результат съёмки, свободно от ошибок интерпретации и генерализации, что важно учитывать при использовании альтернативных вариантов представления точечной модели в контексте мониторинга.

Важными критериями в таких случаях выступают:

- возможность отображать объект и отдельные элементы в полном объеме;

- обеспечивать высокую детализацию съемки, при этом быть наглядными и понятными заинтересованному пользователю;

- занимать меньший объем по отношению к полной точечной модели для ускорения процесса анализа данных;

- возможность анализироваться без учета специального узконаправленного ПО для обработки данных НЛС;

135

- хорошо структурироваться и формализоваться для накопления и сопоставления между циклами, например, сечение в заданной плоскости перпендикулярно бровке уступа, а не миллион ТЛО с координатами ХҮΖ.

В контексте маркшейдерского мониторинга объектов сопоставление разновременных облаков точек может быть реализовано на основе набора сечений. Для задания конкретной секущей плоскости требуется указать принадлежащую ей точку с известными координатами XYZ и координаты вектора. В такие наборы точек можно вписывать различные примитивы, для чего обычно находят аппроксимирующую функцию с соблюдением условия прохождения примитива как можно ближе ко всем ТЛО. Пример выявленных изменений по сечениям приведён на рисунке 4.27



Рисунок 4.27 – Сопоставление разновременных сечений по ТЛО

Кроме того, для локализации областей изменений возможно создавать ортоизображения по ТЛО, т.е. растровые изображения, полученные путём ортогонального проецирования на выбранную поверхность с отображением ее на плоскости. Для цветовой составляющей растра могут использоваться интенсивность отраженного, RGB-данные цифровой фотокамеры, расстояние от плоскости проекции. Для анализа разновременных материалов могут успешно использоваться растровые калькуляторы.

В ряде случаев оправдана фрагментация объекта исследования на заданное число полигонов, в рамках которых выполняется анализ попавших точек по определенным критериям [7, 88].

В рамках методики склоновую часть борта карьера в пределах ПООЗ целесообразно разделить на ячейки (домены). Их размеры назначаются исходя из габаритов сканируемого

объекта и плотности ТЛО. Фрагментация, проведенная на начальном цикле наблюдений, должна быть единой для последующих циклов (рисунок 4.28).



Рисунок 4.28 – Фрагментация борта карьера:

а - облако точек; б - геометрическая модель; в - варианты ячеек

После обработки облаков и создания общей модели выполняется распределение ТЛО по доменам с определением их усредненного положения в пространстве. Для каждой ячейки на основе метода наименьших квадратов выполняется вписывание плоскости. В результате операции вычисляется центр тяжести (среднеарифметическая точка множества) и направляющие косинусы нормали плоскости. Каждая ячейка тогда приобретает свои инвариантные параметры и расстояния до исходных точек (пунктов ПВО НЛС и точки стояния прибора). Они сравниваются на каждом цикле наблюдений с определением разности или степени деформирования откоса (рисунок 4.29).



Обработано 168406 точек СКО=0.001980 Нормаль (0.813514151049 0.001932934948 0.581541907179) Точка (53.9659 33.8514 13.0751)

Рисунок 4.29 – Пример вписывания плоскости в облако точек и сообщение с отчётом

При использовании данных подходов возникает вопрос о контроле или учете осыпаний у нижней бровки уступа. Он решается при оценке только обнажений уступа, т.е. частей склона выше образования осыпей.

В дополнении к указанным действиям, автором вместе с другими исследователями предложен оригинальный алгоритм выделения зон деформационных процессов по облакам точек [13]. Помимо опции визуализации он включает возможности для более глубокого анализа и позволяет оперировать не только непосредственно смещениями, но и производными от них характеристиками, такими как наклоны и кривизна. Блок-схема алгоритма выделения деформационных зон приведена на рисунке 4.30.



Рисунок 4.30 – Блок-схема алгоритма выделения зон сдвижений Пример карты распределения деформаций представлен на рисунке 4.31.



а

Рисунок 4.31 – Карты распределения оседаний (а), наклонов (б) и кривизны (в) по разновременным облакам точек

При сценарии оползня «снизу-вверх» маркшейдерские наблюдения достаточно проводить по методике наземного лазерного сканирования с установкой прибора лишь на дне карьера с охватом нижних уступов (рисунок 4.32).



Рисунок 4.32 - Схема маркшейдерских наблюдений при сценарии «снизу-вверх»

# 4.3 Выводы по главе 4

1. Разработаны комплексные маркшейдерские наблюдения, предусмотренные для ПООЗ, с учетом прогнозного сценария проявления оползня.

2. При прогнозном сценарии оползня «сверху-вниз» наблюдательную станцию достаточно разместить на земной поверхности, дополнив профильную линию деформационной сетью, а наблюдения выполнять по разработанной методике с использованием спутниковых определений и тахеометрических измерений со свободных станций.

3. При прогнозном сценарии оползня «снизу-вверх» наблюдения следует выполнять по разработанной методике лазерного сканирования для определения смещений откосной поверхности нижних уступов борта карьера и сравнения результатов наблюдений предыдущего цикла с текущим.

4. При «комбинированном» прогнозном сценарии оползня предложена комплексная станция с наблюдениями за земной поверхностью и откосом борта.

# 5 ГЛАВА ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ НА КАРЬЕРАХ

Рекомендации разработаны на примере Качканарского горно-обогатительного комбината (КГОК) по данным, любезно предоставленным маркшейдерской службой, которая много лет выполняет наблюдения за деформациями бортов карьеров Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд. Автор проходила стажировку на КГОК и очень благодарна сотрудникам за оказанное содействие в проведении исследований. Приведены используемые подходы к мониторингу деформаций откосов уступов и бортов карьеров рудоуправления, что позволило определить ПООЗ по разработанной методике и сравнить с фактическими данными. Определены прогнозируемые сценарии оползневого процесса для бортов с разными углами наклона и на их основе разработаны рекомендации по маркшейдерским наблюдениям.

#### 5.1 Характеристика объекта исследования

Качканарский горно-обогатительный комбинат (КГОК) расположен в Свердловской области в 246 км от Екатеринбурга и в 2200 км от Санкт-Петербурга. Координаты: 58.705260 с.ш., 59.4850307 в.д. С 2011 года предприятие принадлежит группе компаний ООО «ЕВРАЗ Холдинг», включающей в себя также и основных получателей продукции КГОКа (окатышей железной руды) – Нижнетагильский и Западносибирский металлургические комбинаты.

АО «ЕВРАЗ КГОК» является единственным в России предприятием горной отрасли, которое одновременно осуществляет добычу железной руды, представленной преимущественно магнетитами, агломерирует концентрат, получаемый с обогатительной фабрики, а также выпускает окатыши, являющимися конечной продукцией. Добыча руды производится на двух находящихся рядом месторождениях – Гусевогорском (ГГМ) и Собственно-Качканарском (СКМ) [98, 99, 100].

Гусевогорское месторождение титаномагнетитовых ванадийсодержащих руд является сырьевой базой АО «ЕВРАЗ КГОК» и разрабатывается в настоящее время карьерами: Северным, Западным, Главным и карьером Южной залежи (рисунок 5.1).

Первым в эксплуатацию был введен Главный карьер (1963 год), затем Западный и Северный карьеры (1969-1971 гг.), далее карьер Южной залежи (1988 г.).



Рисунок 5.1 – Расположение карьеров Гусевогорсконр месторождения

# 5.1.1 Состояние горных работ в карьерах рудоуправления

Главный карьер разрабатывает Главную залежь Гусевогорского месторождения. Основные добычные работы ведутся на 7-и горизонтах нижней зоны: +55 м, +40 м, +25 м, +10 м, -5 м, -20 м, -35 м. Высота уступов при погашении - 15 м в верхней зоне, сложенной делювиальными суглинками и дезинтегрированными породами, и 30 м - в скальных породах. Фактором, осложняющим производство горных работ на карьере, является наличие оползневого участка на северо-западном борту карьера (гор.325...190м). Фактические объемы горных работ: - добыча – 13 405 тыс. т; - вскрыша – 2 313 тыс. м3 Осушение карьера осуществляется при помощи карьерного водоотлива. Вода из водосборника откачивается в существующий отсек осветленной воды хвостохранилища ДОФ (дробильно-обогатительной фабрики).

Карьер Южная залежь разрабатывает одноименную залежь Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд. Вскрытие залежи осуществлено системой автомобильных съездов с поступательной формой трассы, пройденных по восточному, южному и северному бортам карьера. Перегрузка горной массы в средства железнодорожного транспорта осуществляется на перегрузочном пункте горизонта +250 м. К настоящему моменту все горизонты до гор. +130 м поставлены в конечное положение. Высота погашенных бортов карьера Южной залежи на сегодняшний день составляет от 75 до 145 м. Горные работы ведутся на 2 горизонтах: +130м и +115м. Фактические объемы горных работ: добыча - 1103 тыс. т; вскрыша – 0 тыс. м. куб. Осушение карьера также осуществляется при помощи карьерного водоотлива. Вода из водосборника откачивается в существующий отсек осветленной воды хвостохранилища ДОФ.

Западный карьер разрабатывает одноименную залежь Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд - Западную с 1969 года. Вскрытие Западного карьера осуществлено постоянными двухпутными железнодорожными съездами со спирально-тупиковой формой трассы от станции «Южная», располагаемыми последовательно на западном, северо-восточном и юго-восточном бортах карьера. К настоящему времени горизонты с поверхности до отметок +160...+85 м поставлены в конечное положение в границах І-й очереди. Высота погашенных бортов на сегодняшний день составляет 340 м. Высота уступов при погашении – 15 м в верхней зоне, сложенной делювиальными суглинками и дезинтегрированными породами, 30 м - в скальных породах. Горные работы производятся на 5 горизонтах: +85 м, +70 м, +55 м, +40 м. и +25м. Заезд автомобильного транспорта с поверхности на нижние горизонты осуществляется через систему автомобильных съездов, расположенных на юго-западном борту карьера. Фактические объемы горных работ: добыча – 10 277 тыс. т; - вскрыша – 588 тыс. м. куб. Осушение карьера производится при помощи карьерного водоотлива. Сброс воды производится на юго-восточный борт карьера с перекачкой в существующее шламохранилище.

Северный карьер наиболее крупный из трех действующих в настоящее время карьеров AO «ЕВРАЗ КГОК». Он разрабатывает одноименную залежь Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд с момента освоения месторождения. Вскрытие Северного карьера осуществлено постоянными двухпутными железнодорожными съездами: по западному борту – со станции «Северная», по восточному борту – со станции «Верхняя» через групповую внешнюю траншею. К настоящему моменту верхние горизонты до отм. +220 м поставлены в конечное положение в границах І-й очереди. Высота уступов при погашении - 15 м в верхней зоне, сложенной делювиальными суглинками и дезинтегрированными породами, 30 м - в

скальных породах. Горные работы ведутся на 13 горизонтах: +370 м, +355 м, +340 м, +325 м, +310 м, +295 м, +145 м, +130 м, +115м, +100 м, +85 м и +70 м, +55 м. Фактические объемы горных работ: добыча – 26 160 тыс. т; вскрыша – 3 177 тыс. м. куб. Осушение карьера осуществляется при помощи карьерного водоотлива. Сброс воды производится в существующее шламохранилище ДОФ.

### 5.1.2 Инженерно-геологическая характеристика

#### Главный карьер.

В массиве породы участка деформации северо-западного борта характеризуются крупноблочной структурой и интенсивной трещиноватостью. Рудная масса представлена диаллаговыми и оливиновыми пироксенитами с вкрапленностью магнетита. Вмещающие породы: безрудные пироксениты и габбро.

Участок деформации западного борта (горизонт +250) м представлен крупно- и среднеблочным массивом невыветрелых или слабо выветрелых оливиновых пироксенитов, пересекаемых плагиоклазитовыми жилами, местами разбитым до мелкоблочного массива. Признаки деформации в виде образования эшелонированных трещин отрыва на берме горизонта 250 м погашенного уступа западного борта Главного карьера были обнаружены в ноябре 2009 года. Деформация распространена на участке протяженностью около 60 м по простиранию уступа и в плане захватывает практически всю транспортную берму.

#### Карьер Южная залежь.

Участок деформации юго-восточного борта (горизонт + 280 м) представлен среднеблочным и крупноблочным массивом слабо выветрелых пироксенитов, граничащим с габбро и амфиболизированными плагиоклазсодержащими породами. Участок борта является зоной тектонических нарушений, трещины заполнены выветрелыми глинистыми породами. Развитие трещин зафиксировано по берме горизонта +280 м, по рельефу за контуром карьера по отметке +295 м.

#### Западный карьер.

Участок деформации восточного борта (горизонт +220м) представлен мелко- и среднеблочным массивом невыветрелых или слабо выветрелых пироксенитов плагиоклазсодержащих, граничащим с габбро и амфиболизированными породами. Развитие трещин зафиксировано по транспортной берме горизонта +220 м.

#### Северный карьер.

Участок деформации северо-западного борта сложен пироксенитами диаллаговыми и оливиновыми, секущимися почти вертикальными жилами и прожилками плагиоклазита мощностью от 0,1 м до 1,5м. Зафиксировано быстрое смещение породных масс в отметках от +250 до +190 м.
Участок деформации западного борта горизонт (от +250 до +190 м) представлен пироксенитами диаллаговыми в основном крупноблочным массивом с включением мелкоблочного в зонах дробления, разбитыми разноориентированной трещиноватостью.

## 5.2. Устойчивость нерабочих бортовых массивов карьеров рудоуправления

В процессе проведения геолого-структурного картирования произведена геологическая и фотографическая документация уступов с отображением трещиноватости и выделением наиболее опасных участков. Зафиксированы крупные структурные элементы и определены их азимутально-угловые характеристики. Проведена визуальная оценка геолого-структурной обстановки уступов с фиксацией крупных трещин в породном массиве. С помощью модуля ГИС ГЕОМИКС получены плоскости структурных единиц, все результаты замеров азимутально–угловых характеристик с координатной привязкой занесены в интерактивную базу данных.

Произведен расчет коэффициента устойчивости по каждому исследуемому участку.

Главный карьер. В ходе проведения геолого-структурного картирования задокументировано 300 м, из которых в устойчивом состоянии 300 м. По погашенному участку выполнена геолого-структурная съемка. Участок уступа горизонт +40 от ПК 0 до ПК 220 представлен участком с весьма крупной блочностью. На нем выполнена удовлетворительная заоткоска. Следы отрезной щели различимы хорошо. Массив сильнотрещиноватый, трещины пологие и разноориентированные. Имеются плоскости с гладкой поверхностью и падением в карьер. Пример вывала горной породы по зеркалам скольжения изображен на рисунке 5.2.



Рисунок 5.2 – Вид уступа с иллюстрацией серии параллельных вертикальных трещин и участков осыпи пород

145

В ходе проведения геолого-структурного картирования задокументировано 360 м, из которых в устойчивом состоянии 360 м. В верхней части уступа на участке от ПК 0 до ПК 20 имеются остатки лесоматериала. Массив сложен диаллаговыми пироксенитами, глиной и супесью. Породы подвергнуты процессам выветривания, окисления и ожелезнения. Вдоль всего участка выполнена неудовлетворительная заоткоска, следы отрезной щели просматриваются плохо. На фрагменте от ПК 40 до ПК 100 существует вероятность частичного обрушения уступа. Состояние погашенных уступов удовлетворительное, положение верхней и нижней бровок массива близки к проектному положению. Буровзрывные работы на нижележащих горизонтах в данных районах ведутся в соответствии с проектной документацией по технологии горных работ.

Карьер Южная залежь. В западной части погашенного борта присутствуют участки с неустойчивым состоянием откоса уступа, блочность массива от крупной до мелко-средней, уступ трещиноватый, трещиноватость разно-ориентированная, по стенкам трещин развиты зеркала скольжения, нависание отдельных блоков с потенциальным вывалом в карьер. Откос уступа (рисунок 5.3) зачищен до видимых следов отрезной щели, при их отсутствии откос уступа зачищен до скального экрана. Положение верхней и нижней бровки уступа и углы откоса близки к проекту.



Рисунок 5.3 – Вид ярко выраженной плоскости скольжения, +130 м.

Для оценки устойчивости бортовых массивов карьера, был произведен расчет коэффициента запаса устойчивости (КЗУ) нерабочих бортов методом вычисления объема возможного обрушения без ограничения высотой уступа (с нижнего горизонта до верхней устойчивой площадки). По результатам геолого-структурного картирования погашенных участков составлена картограмма устойчивости (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Картограмма устойчивости погашенных участков уступов карьера Южной залежи (зеленым цветом выделены устойчивые участки, желтым - неустойчивый участок)

Западный карьер. По всей длине участки откосов уступов находятся в устойчивом состоянии. Заоткоска удовлетворительная, откос уступа зачищен до скального экрана, следы отрезной щели различимы. Положения верхней и нижней бровок уступа соответствуют проектным. Массив трещиноватый, наблюдаются плоскости скольжения, нависание кусков горной массы, зоны смятия и повышенной трещиноватости.

Для оценки устойчивости бортовых массивов карьера был произведен расчет КЗУ нерабочих бортов методом вычисления объема возможного обрушения без ограничения высотой уступа (с нижнего горизонта до верхней устойчивой площадки). В процессе оценки устойчивости бортовых массивов были выявлен участок с КЗУ меньше нормативного (1,3). Зона потенциального деформирования показана на рисунке 5.5.



Рисунок 5.5 – Зона потенциального деформирования погашенных уступов Западного карьера (зеленым цветом выделены устойчивые участки, желтым цветом - неустойчивый

участок)

Северный карьер. В ходе проведения геолого-структурного картирования задокументировано 1400 м, из которых в устойчивом состоянии 1220 м, в неустойчивом состоянии 180 м. Для участков уступа в неустойчивом состоянии выполнен расчет КЗУ. На рисунке 5.6 представлена картограмма устойчивости участков погашенных уступов Северного карьера.



Рисунок 5.6 – Картограмма устойчивости участков погашенных уступов Северного карьера (зеленым цветом выделены устойчивые участки, красным цветом - неустойчивые участок)

# 5.3 Подходы к мониторингу деформаций откосов уступов и бортов карьеров рудоуправления

Мониторинг за деформациями откосов уступов и бортов карьеров рудоуправления включает в себя следующие виды работ:

1. Визуальное обследование прибортового массива горных пород.

- 2. Маркшейдерские инструментальные измерения по профильным линиям.
- 3. Площадной мониторинг.

## 5.3.1 Визуальное обследование прибортового массива горных пород

Визуальное обследование состояния откосов уступов на карьерах выполняется маркшейдером ежемесячно. При обследовании фиксируются признаки начинающихся деформаций откосов, геологические и горнотехнические факторы, влияющие на устойчивость. Визуальные наблюдения сопровождаются глазомерной, тахеометрической и фотографической съемкой характерных участков анализируемых зон. Результаты наблюдения заносятся в специальный журнал «Визуального обследования состояния откосов уступов». Выявленные признаки деформаций изучаются и по необходимости организовываются инструментальные наблюдения с составлением проекта наблюдательных станций.

## 5.3.2. Маркшейдерские инструментальные измерения по профильным линиям

*Главный карьер*. Объектом возникновения деформаций является северо-западный борт Главного карьера с горизонта +310 м до горизонта +220 метров (рисунок 5.7).



Рисунок 5.7 – Участок деформации северо-западного борта на горизонте +280 метров Вид деформации - оползень.

Параметры деформируемого уступа по проекту: высота уступа 225 м, угол откоса 27°; по факту: высота 225 м, угол откоса 30°.

Начало: 03 ноября 1990 года.

Размеры деформации: массив раздроблен большим количеством трещин в основном параллельно простиранию борта карьера на 410 м, ширина раскрытия достигает 0,3 м, а видимая глубина до 0,2 м.

Наблюдательная станция состоит из двух профильных линий.

I профильная линия состоит из 7 реперов, погружённых на 1,5 метра в горную породу и расположенных в крест простирания деформационного участка по азимуту 155°. За годовой период наблюдений маркшейдерским отделом карьеров рудоуправления был проведен ряд циклов наблюдений, по результатам которых средние скорости смещения реперов составили 1 мм/сутки.

II профильная линия установлена на земной поверхности вдоль простирания деформационного участка на горизонте +220 м и включает 3 репера. За годовой период наблюдений маркшейдерским отделом карьеров рудоуправления был проведен ряд циклов наблюдений, по результатам которых средние скорости смещения реперов составили 0,3 мм/сутки.

На основании проведенных инструментальных маркшейдерских наблюдений сделаны выводы:

1. Скорость смещения реперов увеличилась в виду производства буровзрывных работ на вышележащих горизонтах и на промежуточной залежи в непосредственной близости опасной зоны.

2. Движение реперов характеризуется разнонаправленным перемещением.

3. Учитывая, что средняя скорость смещения реперов меньше многолетней на фоне преимущественной разнонаправленности смещения различных участков массива, ограничения на производство горных работ в районе северо-западного борта при выполнении производственной программы не предусматриваются.

4. Следует продолжить инструментальные наблюдения за подвижностью массива северо-западного борта.

Карьер Южная залежь. Областью деформаций является погашенный уступ горизонта 280 м юго-восточного борта карьера (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Участок деформации юго-восточного борта горизонт +280 м Вид деформации: развитие трещин по берме горизонта +280 м и по рельефу за контуром карьера по отметке +295 м.

Начало: 08 августа 2014 года.

Размеры деформации:

- на горизонте +280 м длина трещины по фронту – 25 м, ширина раскрытия трещины до 0,4 м, видимая глубина трещины до 2,6 м.

- на горизонте +295 м длина трещины по фронту – 30 м; ширина раскрытия трещины до 0,15 м, видимая глубина трещины до 0,35 м.

Параметры деформируемого уступа по проекту: высота уступа 15 м, угол откоса 48°; по факту: высота уступа 30 м, угол откоса 47,5°.

Инструментальные маркшейдерские наблюдения выполнены на горизонтах +280 и +295 метров на наблюдательной станции упрощённого типа, состоящей из 5 рабочих и 2 опорных реперов.

Рабочие реперы представлены 4 забивными парными пунктами на отметке +295 м по двум створным линиям и 1 репером в виде простого сигнала со светоотражающей маркой по отметке +280 м непосредственно на заколе. Расстояния между реперами на деформационном участке составляют 4м.

На основании проведенных измерений сделан вывод о том, что средние скорости между наблюдениями не превышали 0,2 мм/сут. Массив находится в инертной фазе сдвижения со стабильно малыми подвижками, не представляющими опасности обрушения горных пород в карьер. Горные работы вблизи участка не проводятся, оставлена предохранительная берма на горизонте +250м. В связи с фиксированием затухающих деформаций участок юго-восточного

борта горизонтов 280м и 295 м карьера Южная залежь снят с учета опасных зон. Инструментальные маркшейдерские наблюдения производятся 2 раза в год до покрытия и после схода снежного покрова.

Западный карьер. Инструментальные наблюдения за состоянием откосов уступов проводятся по наблюдательной станции упрощенного типа непосредственно на деформированном участке горизонта +220 м.

Объект деформации является погашенный уступ восточного борта (рисунок 5.9).



Рисунок 5.9 – Участок деформации восточного борта Западного карьера горизонта+220м Вид деформации: развитие трещин по транспортной берме горизонта +220 м. Начало: 01 января 2014 года.

Размеры деформации: длина трещины по фронту – 50 м, ширина раскрытия до 0,25 м, видимая глубина до 0,55 м.

Параметры деформируемого уступа по проекту: высота 28 м, угол откоса 56°; по факту: высота 29,8 м, угол откоса 50°.

В ходе циклов наблюдений средние скорости не превышали 0,2 мм/сутки. Массив находится в инертной фазе сдвижения со стабильно малыми подвижками, не представляющими опасности обрушения горных пород в карьер после отсыпки контрфорса. Повторные наблюдения выполняются два раза в год: весной и осенью до и после схода снежного покрова.

## Северный карьер.

Объектом возникновения деформации является северо-западный борт карьера в отметках от +320 до +190 м. (рисунок 5.10).



Рисунок 5.10 – Участок деформации северо-западного борта Северного карьера Вид деформации: быстрое смещение породных масс в отметках в отметках от +250 до +190 м.

Дата начала 15.01.2019 г.

Размеры деформации: длина по фронту 70 м, величина смещения до 3,5 м, объем – 1600 м. куб.

Параметры деформированного участка по проекту: высота 60 м, угол участка борта 54°, постановка участка в предельное положение выполнена поуступно, высота одиночного уступа 15 м, угол откоса уступа горизонта +250 м 60°, а с горизонта +235 м произведен переход угла откоса уступа на 75°.

Параметры деформированного участка по факту: высота 60 м, общий угол откоса участка 50°, отсутствуют предохранительные бермы на горизонтах.

Причины обрушения:

- несоответствие проектного угла откоса уступа прочностным свойствам горных пород;

- наличие зоны дробления и смятия горных пород.

Наблюдательная станция состоит из трех профильных линий, две из которых расположены в верхней зоне на горизонте +320 м и одна вдоль транспортной бермы горизонта +265 м.

Деформации по отметке горизонта +320 м расположены в верхней части карьера, в осадочных породах и носят вялотекущий характер (смещения в среднем 0,5 мм/сутки). Развитие активной деформации борта на нижележащих горизонтах от +250 до +160 м не оказало влияния на развитие трещин, скорость абсолютных смещений реперов незначительно снизилась.

Еще одним объектом деформации является южный борт Северного карьера в отметках от +145 до +190 м. Вид деформации: закол верхней части уступа и одномоментное раскрытие сети трещин с образованием осыпи горной массы по откосу участка борта (рисунок 5.11).



Рисунок 5.11 – Деформация южного борта Северного карьера Дата начала: 05.08.2019 г.

Размеры деформации: длина по фронту от 80 м (горизонт +190) до 100 м (горизонт +145), величина смещения до 9,4 м, объем – 1760 м. куб.

Параметры деформированного участка по проекту: высота 45 м, общий угол участка борта 60°, постановка участка уступа в предельное положение выполнена сдвоенными уступами с оставлением предохранительной бермы по отметке +160 м шириной 10 м, высота сдвоенного уступа 30 м, угол откоса сдвоенного уступа горизонта составляет 70°.

Параметры деформированного участка по факту: высота 45 м, общий угол откоса участка 50°, предохранительные бермы засыпаны горной массой.

Время стояния откоса до деформации: 106 суток.

Причины обрушения:

- несоответствие проектного угла откоса уступа прочностным свойствам горных пород;

- наличие зоны дробления и смятия горных пород;

- нарушение устойчивости под воздействием сильного увлажнения пород поверхностными водами.

Для участка деформации заложена наблюдательная станция, состоящая из 11 рабочих реперов, а также выполнена серия инструментальных наблюдений. По их результатам установлено, что скорости сдвижения реперов незначительные (в среднем 0,3 мм/сутки).

#### 5.3.3. Площадной мониторинг

В соответствии с принятой методикой и согласно утвержденных проектов наблюдательных станций, на карьерах Качканарского ГОК проводится площадной мониторинг бортов с применением наземной лазерной сканирующей системы RIEGL VZ-4000.

Лазерное сканирование выполняется с нескольких пунктов опорной маркшейдерской сети для обеспечения наиболее полного охвата поверхности карьеров и исключения «мертвых зон» в едином облаке точек. Данный метод применяется на стадии выявления потенциально опасных зон, либо при невозможности закладки реперов из-за труднодоступности зоны деформаций.

После уточнения границ съёмки объекта сканирование выполняют в течение одного дня. Камеральная обработка данных преимущественно выполняется в программном обеспечении «RiScan PRO» в следующем порядке: трансформация сканов в проектную систему координат, мультистанционное уравнивание «Multi Station Adjustment», создание объектов «POLYDATA» для каждого участка борта карьера, фильтрация и создание триангуляционной поверхности.

Визуализация, распознавание и выявление деформационных участков между разными съемками задается цифровой схемой в виде градиентной шкалы (рисунок 5.12). Изменение цветовой сегментации шкалы происходит за счет разности перпендикулярных расстояний между опорной и текущей цифровыми поверхностями объектов. При сравнении поверхностей задан интервал поиска отклонений в 0,25 м. Наличие зеленого цвета и цветового интервала от голубого до желтого говорит о том, что разница между двумя цифровыми поверхностями не превышала 25 см.



Рисунок 5.12 – Совмещенные модели с градиентной шкалой

По результатам съемки площадного мониторинга обследуются участки карьеров с известными деформациями, а также участки, вызывающие подозрения по развитию деформационных процессов. Для удобства обработки данных площадного мониторинга карьерное поле разделено на участки.

Все данные заносятся в журнал площадного мониторинга бортов карьеров установленной формы с фиксацией всех выявленных нарушений (таблица 5.1). Выявленные изменения локализуются, наносятся на план и сохраняются в электронном виде на сервере в накопительном порядке по годам и датам съёмки.

Площадной мониторинг производится с периодичностью наблюдений два раза в год: весной и осенью до и после схода снежного покрова.

## Главный карьер.

На Главном карьере в результате площадного мониторинга было выявлено 6 осыпей горной массы (рисунок 5.13) объемом от 50 м. куб. до 320 м. куб. (таблица 5.1).



Рисунок 5.13 – Выявленные осыпи горной массы

Все выявленные осыпи горной массы расположены на погашенных уступах карьера вне зоны ведения горных работ и не затрагивают транспортные бермы.

Таблица 5.1 – Результаты обследования и выявленные деформационные нарушения откосов уступов бортов Главного карьера

№ участка	Наименование участка	Результаты площадного мониторинга
1	Северо-западный борт	<ol> <li>Осыпь горной массы №52 на предохранительной берме гор. +130м. V=320 м. куб.</li> <li>Осыпь горной массы №53 на предохранительной берме гор. +220м. V=95 м. куб.</li> <li>Осыпь размей массы №54 на предохранительной берме гор. +220м. V=95 м. куб.</li> </ol>
		5. Осыпь горной массы №54 на предохранительной берме гор. +250м. V=190 м. куб.
2	Северный борт	Нарушений не выявлено
3	Западный борт	Осыпь горной массы №50 на предохранительной берме гор. +280м. V=50 м. куб.
4	Восточный борт	Нарушений не выявлено
5	Южный борт	<ol> <li>Осыпь горной массы №51 на предохранительной берме гор. +145м. V=150 м. куб.</li> <li>Осыпь горной массы №55 на предохранительной берме гор. +190м. V=150 м. куб.</li> </ol>
6	Северо-восточный борт	Нарушений не выявлено

Схема расположения выявленных деформаций представлена на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Схема расположения выявленных деформационных нарушений на Главном карьере

## Карьер Южная залежь

Результаты обследования бортов приведены в Таблице 5.2. На карьере Южная залежь было выявлено 27 осыпей горной массы (рисунок 5.15) объемом от 15 м. куб. до 183 м. куб.

№ учас	Наименование участка	Результаты площадного мониторинга
1Ka	Серерций борт	1. Осыць горной массы №93 на предохранительной берме
1	северный обрт	гор. +205 м. V=18 м. куб.
		2. Осыпь горной массы №94 на предохранительной берме гор +175 м V=15 м куб
		3. Осыпь горной массы №95 на предохранительной берме $V^{-43}$ м куб
		4. Осыпь горной массы№96 на предохранительной берме
		1 гор. +250 м. v=128 м. куо. 5. Осыпь горной массы№97 на предохранительной берме
		гор. +160 м. ∨=20 м. куо. 6. Осыпь горной массы№98 на предохранительной берме
		гор. +130 м. V=32 м. куб. 7. Осыпь горной массы №106 на предохранительной берме
		гор. +130 м. V=108 м. куб. 8. Осыпь горной массы №107 на предохранительной берме
		гор. +115 м. V=83 м. куб.
		9. Осыпь горной массы№110 на предохранительной берме гор. +190 м. V=76 м. куб.
		10. Осыпь горной массы№111 на предохранительной берме гор. +250 м. V=24 м. куб.
		11. Осыпь горной массы№112 на предохранительной берме гор. +190 м. V=72 м. куб.
		12. Осыпь горной массы№113 на предохранительной берме гор. +175 м. V=76 м. куб.
2	Южный борт	1. Осыпь горной массы№99 на предохранительной берме
		гор. +190 м. V=183 м. куо. 2. Осыпь горной массы№100 на предохранительной берме
		гор. +175 м. V=18 м. куб. 3. Осыпь горной массы№101 на предохранительной берме
		гор. +250 м. V=123 м. куб.
		гор. +250 м. V=30 м. куб.
		5. Осыпь горной массы№115 на предохранительной берме гор. +160 м. V=27 м. куб.
		6. Осыпь горной массы№116 на предохранительной берме гор. +145 м. V=63 м. куб.
3	Западный борт	1. Осыпь горной массы№102 на предохранительной берме
		гор. +145 м. V=53 м. куб.
		12. Осыпь горной массыметоз на предохранительной берме гор. +130 м. V=124 м. куб.
		3. Осыпь горной массы№104 на предохранительной берме
		4. Осыпь горной массы№105 на предохранительной берме
		гор. +250 м. V=31 м. куб.
		гор. +130 м. V=19 м. куб.
		6. Осыпь горной массы№118 на предохранительной берме гор. +130 м. V=71 м. куб.
		7. Осыпь горной массы№119 на предохранительной берме
		8. Осыпь горной массы№120 на предохранительной берме
		гор. +175 м. V=21 м. куб.
4	Северо-западный борт	нарушении не выявлено

Таблица 5.2 – Результаты обследования и выявленные деформационные нарушения откосов уступов бортов карьера Южная залежь



Рисунок 5.15 – Участок Южного борта южной залежи. Осыпь №106-107

Схема расположения выявленных деформационных нарушений приведена на рисунке 5.16.



Рисунок 5.16 – Схема расположения выявленных деформационных нарушений в карьере

Южная залежь

## Западный карьер

На Западном карьере было выявлено 15 осыпей горной массы (рисунок 5.17) объемом от 17 м.куб. до 176 м.куб.



Рисунок 5.17 – Участок южного борта Западного карьера. Осыпь №51-№53

Результаты обследования бортов приведены в Таблице 5.3.

Таблица – 5.3 Результаты обследования и выявленные деформационные нарушения откосов уступов бортов Западного карьера

N⁰	Наименование участка	Результаты площадного мониторинга
участка		
1	Южный борт	1. Осыпь горной массы №51, на предохранительной берме гор +100м V=30 м куб
		2. Осыпь горной массы №52. на
		прелохранительной берме гор +85м V=102 м куб
		ародохраннислыной серже гор. Осым. С 102 м. кус. 3 Осыпь горной массы №53 на
		прелохранительной берме гор. +85м. V=94 м. куб.
2	Юго-западный борт	Нарушений не выявлено
3	Запалный борт	<ol> <li>Осыпь горной массы №48 на предохранительной</li> </ol>
	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	берме гор. +100 м. V=58 м. куб.
		2. Осыпь горной массы №49 на предохранительной
		берме гор. +70 м. V=150 м. куб.
		3. Осыпь горной массы №54 на предохранительной
		берме гор. +85 м. V=32 м. куб.
		4. Осыпь горной массы №55 на предохранительной
		берме гор. +70 м. V=27 м. куб.
		5. Осыпь горной массы №56 на предохранительной
		берме гор. +70 м. V=17 м. куб.
4	Северо-западный борт	Нарушений не выявлено
5	Северный борт	1. Осыпь горной массы №50 на предохранительной
		берме гор. +100м. V=176 м. куб.
		2. Осыпь горной массы №58 на предохранительной
		берме гор. +190 м. V=72 м. куб.
		3. Осыпь горной массы №59 на предохранительной
		берме гор. +160 м. V=37 м. куб.
		4. Осыпь горной массы №60 на предохранительной
		берме гор. +130 м. V=72 м. куб.
6	Северо-восточный борт	1. Осыпь горной массы №61 на предохранительной
		берме гор. +85м. V=65 м. куб.
		2. Осыпь горной массы №62 на предохранительной
		берме гор. +85м. V=27 м. куб.

Была выявлена опасная зона - участок юго-восточного борта Западного карьера на горизонтах от +220 до +190 м, цветовой палитрой отражены изменения поверхности борта за полгода (рисунок 5.18).



Рисунок 5.18 – Опасная зона восточного борта Западного карьера

Схема расположения выявленных деформационных нарушений приведена на рисунке 5.19.



Рисунок 5.19 – Схема расположения выявленных деформационных нарушений в Западном

карьере

## 5.4 Реализация схем наблюдений за деформациями бортов карьеров

Предложенные алгоритмы уточнения цифровых моделей, построенных по характерным точкам, апробированы на данных лазерного сканирования карьеров ГОКа (рисунок 5.20). Для них выполнена фильтрация и классификация, по результатам которой выделены точки классов «земля» и «ключевые».



Рисунок 5.20 – Облака точек карьеров ГОКа

Характерные точки послужили основой для создания ЦМР, а точки класса «земля» позволили уточнить структуру треугольников. Итоговые модели использовались для актуализации планов горных работ, сопровождения буровзрывных работ, оценки напряженнодеформированного состояния карьеров и локализации ПООЗ.

Так для западного борта Северного карьера ширина ПООЗ составила 500 м с охватом 5 уступов (рисунок 5.21).



Рисунок 5.21 – Потенциально опасная зона западного борта Северного карьера Качканарского ГОК

Угол данного борта 30°, что соответствует сценарию проявления оползня «снизу-вверх». Наблюдения за деформациями предлагается осуществлять методом наземной лидарной съемки. Для этого на подошве карьера следует заложить пункты ПВО НЛС с расчетом охвата сканером всей ПООЗ (рисунок 5.22).



Рисунок 5.22 – Схема маркшейдерских наблюдений для сценария «снизу-вверх»

Для западного борта Западного карьера ширина ПООЗ составила 320 м с охватом всех уступов (рисунок 5.23).



Рисунок 5.23 – Потенциально опасная зона западного борта Западного карьера Качканарского ГОК

Угол борта  $40^{\circ}$ , что соответствует «комбинированному» сценарию. Маркшейдерские наблюдения оползневого процесса следует проводить в одной системе координат и высот, как на земной поверхности, так и на подошве нижнего уступа, таким образом, чтобы охватить обнажения нижних уступов. Для этого на поверхности необходимо создать свободную деформационную сеть, которая охватывает ПООЗ и пункты вне зоны деформаций, а на нижнем горизонте карьера заложить не менее трех пунктов ПВО (рисунок 5.24).



Рисунок 5.24 – Схема маркшейдерских наблюдений для комбинированного сценария

Для сопоставления разновременных сканов по предложенному алгоритму (рисунок 4.30) выбрана серия наблюдений фрагмента борта, выполненных наземной лазерно-сканирующей системой Riegl VZ-4000. Предобработка и ориентирование облаков точек были выполнены в программе Riegl RiScan Pro. Площадь рассматриваемого участка 5,6 тыс. м<sup>2</sup>, количество точек в сканах в среднем 40 тыс. Полученные в результате расчета карты распределения деформаций представлены на рисунке 5.25.





б

Рисунок 5.25 – Карты распределения оседаний (а), наклонов (б) и кривизны (в) для участка борта Качканарского карьера по результатам лазерно-сканирующей съемки Наложив полученные карты деформаций на трехмерную модель рельефа (рисунок 5.26), можно визуально сопоставить положение на местности зоны сдвижений и определить места, в которых присутствуют избыточные концентрации напряжений.



Рисунок 5.26 – Трехмерная модель борта карьера с распределением оседаний (а), наклонов (б) и кривизны (в)

По полученным данным видна возможность определения границ зон проявления деформационного процесса. Локализация оседаний имеет четкие визуально определимые границы, оконтуривающие зону сдвижений, что достигается за счет существенных по величине деформаций, произошедших между циклами наблюдений.

## 5.5 Выводы по главе 5

1. Верифицированы и проанализированы данные мониторинга деформаций в период 2021-2022 годов. Довольно подробно описаны горнотехнические и горно-геологические условия.

2. Прогнозные данные о потенциально оползнеопасных участков карьеров, полученные на рассматриваемых карьерах были сопоставлены с определяемыми ПООЗ по предлагаемой методике. Получена удовлетворительная сходимость независимых результатов исследований. Зоны потенциального деформирования приведены в Приложении В. Четко прослеживается логическая основа при прогнозе оползнеопасных участков. Зоны, установленные на предприятии вписываются в разработанные автором ПООЗ.

3. Прогнозные сценарии оползневого процесса для рассматриваемых бортов с разными углами наклона также свое косвенное подтверждение (по формированию осыпей). Предложена комплексная схема маркшейдерских наблюдений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи разработки комплексной методики натурных маркшейдерских наблюдений за деформациями бортов карьеров в ПООЗ, опирающейся на геомеханический анализ с выделением сценариев оползневого процесса, что имеет важное значение в горном деле при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом.

По результатам исследований, представленных в диссертационной работе, сделаны следующие основные выводы и рекомендации:

1. На основе выполненных исследований разработаны алгоритмы уточнения цифровых моделей карьеров по данным лидарных и фотограмметрических съемок, что позволяет упростить и ускорить работу по моделированию открытых горных выработок и использовать модели при анализе НДС пород.

2. По результатам многовариантного моделирования на объемных моделях карьера разработаны параметры ПООЗ, в которых при коэффициенте запаса устойчивости менее нормы следует организовать маркшейдерские наблюдения.

3. На основе моделирования бортов карьеров в плоской постановке задачи упругости определен параметр ширины призмы оползня, который предлагается в качестве дополнительного использовать при расчете коэффициента запаса устойчивости, вследствие адаптированности алгоритма его расчета к широко используемым классическим принципам.

4. Разработаны сценарии оползневого процесса: «сверху-вниз», «снизу-вверх» и «комбинированный», расширяющие представления об оползнях и позволяющие осуществлять репрезентативные маркшейдерские наблюдения.

5. Предложены технологические схемы маркшейдерских наблюдений с учетом прогнозного сценария проявления оползня. Разработана специальная программа по оценке деформаций «Деформация», позволяющая сравнивать деформации по предыдущему и текущему циклам.

6. Разработанные практические рекомендации по выделению ПООЗ и проведению наблюдений согласуются с результатами исследований, выполненными независимыми специалистами при решении задач устойчивости бортов карьеров.

7. Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на разработку комплексной методики наблюдений за устойчивостью бортов карьеров с учетом горногеологических условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананенко, Е.В. Оценка влияния нагрузок и воздействий на напряженнодеформированное состояние природно-технических систем «отвал - основание» / Е.В. Ананенко, С.П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научнотехнический журнал). – 2024. – № 10. – С. 5-21. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_5. – EDN FRWUGD.

2. Ананенко, Е.В. Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал - основание» / Е.В. Ананенко, С.П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9. – С. 5-21. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_9\_0\_5. – EDN RGPAWF.

3. Андреева, О.Н., Кольцов П.В., Пыхтеева Н.Ф. Анализ устойчивости откосов карьера Западно-озерный для обеспечения безопасности ведения горных работ // Проблемы недропользования. – 2023. – № 1(36). – С. 32-40. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.032.

4. Барулин, А.И. Аналитический способ оценки устойчивости открытых горных выработок методом многоугольника сил / А.И. Барулин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 5. – С. 71-81. – DOI 10.21440/0536-1028-2018-5-71-81. – EDN XUBAQH.

5. Борщ-Компониец, В.И. Практическая механика горных пород : учебное пособие / В.И. Борщ-Компониец. — Москва : Горная книга, 2013. — 322 с. — ISBN 978-5-98672-342-6.

6. Будилова, В.В. Анализ распространения деформаций по земной поверхности при разработке месторождения открытым способом / В.В. Будилова, А.А. Павлович, Д.А. Иконников // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 117-121. – EDN RSEQVN.

7. Вальков, В.А. Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования : специальность 25.00.32 "Геодезия" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вальков Вячеслав Александрович. – Санкт-Петербург, 2015. – 22 с. – EDN ZPWTCV.

8. Вальков, В.А. Методика уточнения цифровых моделей рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В.А. Вальков, **Е.О. Валькова**, М.Г. Мустафин // Маркшейдерия и недропользование. - 2023. - № 3(125). - С. 40-52.

9. Вальков, В.А. Создание растров высокой информативности по данным лазерного сканирования и аэрофотосъемки / В. А. Вальков, К. П. Виноградов, **Е.О. Валькова**, М. Г. Мустафин // Геодезия и картография. - 2022. - Т. 83, № 11. - С. 40-49. DOI:10.22389/0016-7126-2022-989-11-40-49

10. Валькова, Е.О. Комплексная методика наблюдений за деформациями бортов карьеров // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. – 2022. – С. 7-9.

11. Валькова, Е.О. Комплексные маркшейдерские наблюдения оползневого процесса на карьерах // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 9-й Международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 90-94.

12. Валькова, Е.О. Методика уточнения цифровых моделей рельефа по результатам лидарных съемок / Е.О. Валькова, В.А. Вальков, К.П. Виноградов // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование: Сборник материалов IV всероссийской научно-практической конференции. – 2021. – С. 124-128.

13. Выстрчил, М.Г. Анализ деформационных процессов по данным маркшейдерских лазерно-сканирующих и фотограмметрических съемок / М. Г. Выстрчил, Д.З. Мукминова, Т.И. Балтыжакова, В.Г. Парамонов, **Е.О. Валькова** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 2. – С. 78-98. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2025\_2\_0\_78. – EDN OTYRQL.

14. Выстрчил, М.Г. Обоснование способов внешнего ориентирования цифровых моделей горных выработок, получаемых по результатам съемок лазерно-сканирующими системами: специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Выстрчил Михаил Георгиевич. – Санкт-Петербург, 2014. – 167 с. – EDN SVCOJF.

15. Гигантский оползень в каньоне Бингем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tourweek.ru/blogs/1136102 (дата обращения: 08.04.2025).

16. ГКИНП-07-016-91 Правила закладки центров и реперов на пунктах геодезической и нивелирной сетей. – М.: Картгеоцентр – Геоиздат, 1993 – 104 с.: ил.

17. Глазунов, В. В. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учёта данных инженерной геофизики / В. В. Глазунов, С. Б. Бурлуцкий, Р. А. Шувалова, С. В. Жданов // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – С. 771–782. – URL: https://doi.org/10.31897/PMI.2022.86 (дата обращения: 15.01.2025).

18. Господариков, А.П. Прогноз напряжённо-деформированного состояния массива горных пород при разработке пологих месторождений / А.П. Господариков, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2010. – Т. 187. – С. 55–58. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=15555940 (дата обращения: 15.01.2025).

19. ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерений деформаций оснований зданий и сооружений. – Утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по

техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2020 г. № 409-ст: дата введения 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

20. ГОСТ р 58148 – 2018. Разработка алмазорудных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 июня 2018 г. № 309-ст. – М.: Стандартинформ, 2018. – 86 с.

21. Григоренко, А.Г. Измерение смещений оползней. – М.: Недра, 1988. – 144 с.

22. Гусев, В.Н. Исследование комплекса факторов, оказывающих влияние на погрешность реализации маркшейдерской съёмки горных объектов с применением геодезического квадрокоптера / В.Н. Гусев, А.А. Блищенко, А.П. Санникова // Записки Горного института. – 2022. – Т. 254. – С. 173–179. – URL: https://doi.org/10.31897/PMI.2022.35 (дата обращения: 15.01.2025).

23. Далатказин, Т.Ш. Исследования формирования оползней в Коршуновском карьере / Т.Ш. Далатказин // Проблемы недропользования. – 2017. – № 2(13). – С. 34-40. – EDN YTFDHV.

24. Демин, А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз : монография / А.М. Демин ; А.М. Демин ; Российская акад. наук ; Всероссийский ин-т науч. и технической информации. – Москва : ГЕОС, 2009. – 77 с. – ISBN 978-5-89118-462-6. – EDN QMYUEN.

25. Жабко, А.В. Аналитическая геомеханика : Научная монография / А.В. Жабко. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2016. – 224 с. – ISBN 978-5-8019-0384-2. – EDN XVULCR.

26. Жабко, А.В. Критерии прочности горных пород / А.В. Жабко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 11-1. – С. 27-45. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_111\_0\_27. – EDN VRTAOY.

27. Жабко, А.В. Расчет бортов карьеров на обрушения / А.В. Жабко, Н.В. Волкоморова, Н.М. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 2(58). – С. 130-138. – DOI 10.21440/2307-2091-2020-2-130-138. – EDN RUTTFT.

28. Жабко, А.В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород / А.В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2018. – № 1(49). – С. 68-79. – DOI 10.21440/2307-2091-2018-1-68-79. – EDN LAVOCL.

29. Зубков, В.В. О моделировании сдвижения для обеспечения экологической безопасности на подрабатываемых территориях / В.В. Зубков, А.М. Линьков // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 4(96). – С. 31-34. – EDN RBFXIZ.

30. Зубов, А. В. Оценка стабильности опорных и деформационных маркшейдерскогеодезических сетей / А.В. Зубов, Н.С. Павлов // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 2(94). – С. 21-23. – EDN QLRWXZ.

31. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Ленинград, ВНИМИ, 1987. – 118 с.

32. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. Утвержден Госгортехнадзором СССР 21.07.1970 – Ленинград, ВНИМИ, 1970. – 178 с.

33. Исмагилов, Р. И. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А.Г. Захаров, Б.П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 84-90. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-3-84-90. – EDN GDBNKL.

34. Исмаилов, А.С. Особенности процессов длительного деформирования массивов скальных пород и их мониторинг при отработке глубоких карьеров / А.С. Исмаилов, А.Д. Меликулов, Ш.М. Садинов [и др.] // Проблемы недропользования. – 2016. – № 3(10). – С. 18-23. – EDN WMEGQT.

35. Козырев, А.А. Особенности развития геомеханических процессов в массивах пород глубоких карьеров / А.А. Козырев, Э.В. Каспарьян, В.В. Рыбин // Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Том 1. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2018. – С. 30-35. – EDN GOGVRQ.

36. Кольцов, П.В. Методика безотражательных наблюдений за деформирующимися участками бортов карьеров и отвалов / П.В. Кольцов // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 65-69. – EDN QZERLL.

37. Кузин, А.А. Выделение оползнеопасных территорий на основе методов нейронных сетей / А.А. Кузин // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 46–51. – URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21029051.

38. Кузин, А.А. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения / А.А. Кузин, В.Г. Филиппов // Геодезия и картография. – 2024. – Т. 85, № 9. – С. 2-11. – DOI 10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11. – EDN FCIDYE.

39. Кутепов, Ю.И. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений / Н.А. Кутепова, М.Р. Пономаренко, Ю.Ю. Кутепов // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 69-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10

40. Лазерные сканеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.riegl.com/ (дата обращения: 08.04.2025).

41. Лобанов, Е.А. Обоснование возможности укручения откосов бортов и вскрышных уступов при ведении горных работ / Е.А. Лобанов, А.А. Еременко // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 3(133). – С. 61-67. – DOI 10.26730/1999-4125-2019-3-61-67. – EDN NCEVTJ.

42. Мельников, И.Т. Автоматизированный расчет устойчивости откосов бортов карьеров / И.Т. Мельников, В.Ю. Заляднов, Н.С. Шевцов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 2(42). – С. 8-12. – EDN QCKMFT.

43. Мельников, Н.Я. 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" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мельников Никита Ярославович, 2019. – 140 с. – EDN GQSXPZ.

44. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов / Рыльникова М.В., Алексеев А.Б., Есина Е.Н., Зотеев О.В., Ливинский И.С., Макаров А.Б., Павлович А.А., Перепелицын А.И., Спирин В.И., Трубецкой Н.К., Харитонов А.А., Яницкий Е.Б. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 80 с. – ISBN 978-5-6041085-8-1. – EDN JASSZB.

45. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / Ю.С. Козлов, А.М. Мочалов, В.И. Пушкарев, В.Т. Сапожников, Г.Л. Фисенко – Ленинград, ВНИМИ, 1972. – 165 с.

46. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов / М.В. Рыльникова, А.Б. Алексеев, Есина Е.Н., Зотеев О.В., Ливинский И.С., Макаров А.Б., Павлович А.А., Панжин А.А., Перепелицын А.И., Спирин В.И., Трубецкой Н.К., Харитонов А.А., Яницкий Е.Б. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 90 с. – ISBN 978-5-6041085-9-8. – EDN NJKOHX.

47. Мочалов, А.М. Геометрическое сложение сил по наиболее напряженной поверхности скольжения при оценке устойчивости бортов карьеров / А.М. Мочалов, А.А. Павлович, В.Ю. Кубарев // Записки Горного института. – 2013. – Т. 204. – С. 110-116. – EDN RSEQVD.

48. Мочалов, А.М. Оценка устойчивости бортов карьеров с использованием отечественного и зарубежного программного обеспечения / А.М. Мочалов, С.А. Ишутин, А.А.

Павлович, Р.Ю. Сапачев // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – С. 219-226. – EDN QLIGHV.

49. Мустафин, М.Г. Геомеханическая модель системы «выработка – вмещающие породы» и ее использование при прогнозировании динамических проявлений горного давления/ М.Г. Мустафин // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. – Санкт-Петербург, ВНИМИ, 1999.- С. 117-121.

50. Мустафин, М.Г. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров / М.Г. Мустафин, **Е.О. Валькова** // Уголь. - 2024. - № 7. - С. 55-61. DOI:10.18796/0041-5790-2024-7-55-61.

51. Мустафин, М.Г. Пути развития маркшейдерско-геодезических наблюдений за устойчивостью бортов карьеров / М.Г. Мустафин, **Е.О. Валькова**, В.А. Вальков // Маркшейдерский вестник. - 2022. - № 3(148). - С. 13-18.

52. Мустафин, М.Г. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта / М.Г. Мустафин, Б.Ю. Васильев, А.А. Кологривко // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 56-62. – DOI 10.17580/gzh.2023.02.09. – EDN ZZAFJU.

53. Нгуен, Х.В. Разработка методики оценки вертикальных смещений оснований зданий и сооружений на основе анализа элементов модели деформационной сети: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.32 / Х.В. Нгуен. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 2018. – 19 с.

54. Нестеренко, Е.А. Методика съемки карьеров, отвалов и складов на основе применения трехмерных лазерно-сканирующих систем : специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нестеренко Екатерина Александровна. – Санкт-Петербург, 2010. – 149 с. – EDN QEVMDX.

55. Нестеренко, Е.А. Способ планирования маркшейдерско-геодезических съемок отвалов и складов лазерно-сканирующими системами / Е.А. Нестеренко // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 292-296. – EDN ROWDML.

56. Оползень в карьере Martha Mine [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://geolphoto.com/picture.php?/4525 (дата обращения: 08.04.2025).

57. Павлович, А.А. Особенности геомеханического обоснования устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов с учетом ФНП № 439 / А.А. Павлович // Маркшейдерский вестник. – 2022. – № 2(147). – С. 7-14. – EDN FAIJXU.

58. Панченко, А.В. Маркшейдерская оценка устойчивости криволинейного в плане борта карьера : специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,

геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Панченко Алексей Викторович, 2014. – 119 с. – EDN ZFWYIU.

59. Панченко, А.В. Моделирование деформаций борта карьера с разными свойствами горных пород и геометрией в плане // Наука и Мир. 2014. Т. 1. № 4. С. 160-162

60. Панченко, А.В. Определение коэффициента кривизны уступа с помощью объемного моделирования / А.В. Панченко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 5(88). – С. 74-78. – EDN SGJFBP.

61. ПБ 07-269-98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях», утверждённые Постановлением Госгортехнадзора России от 16.03.1998 №13.

62. Попов, В.Н. Геомеханическое обоснование параметров временно нерабочих бортов карьера / В.Н. Попов, О.Б. Сильченко, М.С. Парамонова // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S1. – C. 121-141. – EDN OOLAPP.

63. Попов, В. Н. Управление устойчивостью карьерных откосов : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Маркшейдерское дело" направления подготовки "Горное дело" / В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков ; В. Н. Попов, П. С. Шпаков, Ю. Л. Юнаков. – Москва : Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2008. – (Горное образование). – ISBN 978-5-7418-0506-0. – EDN QMYPJN.

64. Попов, В.Н. Геодезия и маркшейдерия. Учебное пособие / В.Н. Попов, В.А. Букринский, П.Н. Бруевич. – Москва : Горная книга, 2010. – 84 с. – ISBN 978-5-7418-0624-1. – EDN RAYOMR.

65. Потапов, Д.А. Оценка устойчивости борта карьера "Куркенпахк" АО "Олкон" при помощи программных комплексов "Galena 6.0" и "SVSlope 2D" / Д.А. Потапов, А.С. Калюжный, Н.Н. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S56. – С. 175-182. – EDN VGHNVB.

66. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах, утверждённые Федеральным горным и промышленным надзором России 16 марта 1998 года и введённые в действие с 1 января 1999 года (Минтопэнерго РФ. РАН. Гос. НИИ горн, геомех. и маркшейд. дела - Межотраслевой науч. центр ВНИМИ). – СПб., 1998. – 208 с.

67. Приказ Ростехнадзора от 19.05.2023 N 186 «Об утверждении Правил осуществления маркшейдерской деятельности». Зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2023 г. N 73638 – 76 с.

68. Протосеня, А.Г. Геомеханика [Текст] : учеб. Пособие / А.Г. Протосеня. – СПб. : ЛЕМА, 2017. – 117 с. – Библиогр.: с. 116 (9 назв.)

69. Протосеня, А.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением / А.Г. Протосеня, Н.А. Беляков, М.А. Буслова // Записки Горного института. – 2023. – Т. 262. – С. 619-627.

70. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ // Госгортехнадзор России. Москва, 2004.

71. Русгеоком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://spb.rusgeocom.ru/ (дата обращения: 08.04.2025).

72. Рыльникова, М.В. Особенности и перспективы реализации проекта федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов» / М.В. Рыльникова, А.И. Перепелицын, О.В. Зотеев, И.Л. Никифорова // Горная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 132-139. – DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-132-139. – EDN QWKBHB.

73. Рыльникова, М.В. Развитие нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов / М.В. Рыльникова, О.В. Зотеев, И.Л. Никифорова // Горная промышленность. – 2018. – № 3(139). – С. 95. – DOI 10.30686/1609-9192-2018-3-139-95-98. – EDN XWBJML.

74. Саййидкасимов, С.С. Оценка устойчивости подрабатываемых бортов карьера при комбинированной разработке золоторудных месторождений в районах со сложными сейсмотектоническими условиями / С.С. Саййидкасимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 6. – С. 289-310. – EDN WDZUWR.

75. Самарин, В.П. Маркшейдерское обеспечение безопасности разработки Малышевского месторождения изумрудов / В.П. Самарин, И.В. Барсуков, С.В. Морин // Безопасность труда в промышленности. – 2005. – № 7. – С. 14-16. – EDN JUQFGX.

76. Санникова, А.П. Методика оперативного определения трещиноватости пород и ее применение для оценки прочности при расчете устойчивости бортов карьеров : специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Санникова Анна Петровна. – Санкт-Петербург, 2012. – 19 с. – EDN QIFNLB.

77. Сашурин, А.Д. Обеспечение устойчивости бортов карьеров в целях защиты потенциально опасных участков транспортных берм / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин, В.В. Мельник // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 5-12. – DOI 10.18503/1995-2732-2016-14-3-5-12. – EDN UGEMHV.

78. Сашурин, А.Д. Роль тектонических деформаций породного массива в формировании оползневых явлений на Коршуновском карьере. / А.Д. Сашурин, А. В. Яковлев, Н.И. Ермаков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 2. – С. 193-196. – EDN KXFDFD.

79. Сашурин, А.Д. Современные проблемы и задачи геомеханики / А.Д. Сашурин, А.А. Панжин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 188-198. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-188-198. – EDN XLEKGX.

80. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613311 Российская Федерация. Программа "КОТЛОВАН" для расчета напряженно-деформированного состояния плотины : № 2021612430 : заявл. 02.03.2021 : опубл. 05.03.2021 / М.Г. Мустафин, Х.М. Хатум ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN FZZAJQ.

81. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667291 Российская Федерация. Программа для расчета напряженно-деформированного состояния плотины : № 2020665930 : заявл. 04.12.2020 : опубл. 22.12.2020 / Ф.Х.Д. Аль, М.Г. Мустафин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN XZXWYQ.

82. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023666272 Деформация. Заявка № №2023664597: заявл. 12.07.2023: опубл. 27.07.2023 / Мустафин М.Г., Валькова Е.О.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023666107 Рельеф. Заявка № №2023664598: заявл. 12.07.2023: опубл. 26.07.2023 / Выстрчил М.Г., Валькова Е.О., Балтыжакова Т.И.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

84. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства в районах развития оползневых процессов. Общие требования: (СП 420.1325800.2018): утверждён Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 21 декабря 2018 г. № 844/пр и введён в действие с 22 июня 2019 г. – М.: Стандартинформ, 2019. – 42 с.

85. Свод правил. Нагрузки воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (СП 20.13330.2016): утвержден Министерством строительства и жилищно- коммунального хозяйства Российской Федерации от 03.12.2016 N 891/пр и введён в действие с 4 июня 2017 г.: дата введения 2014-06-04. – М.: Стандартинформ, 2017. – 127 с.

86. Сохибов, И.Ю. Анализ результатов наблюдений за состоянием оползня "Центральный" Ангренского угольного разреза / И.Ю. Сохибов // Universum: технические науки. – 2022. – № 4-6(97). – С. 15-19. – DOI 10.32743/UniTech.2022.97.4.13565. – EDN WFHUYF.

87. Супрун, В.И. Влияние масштабного фактора на прочность горных пород / В. И. Супрун, Я.В. Левченко, А.С. Колотовкин, К.С. Ворошилин // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 10. – С. 5-19. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_10\_0\_5. – EDN ANNEQL.

88. Сухов, А.К. Обоснование применения GRID-моделей для результатов фотограмметрических съемок открытых горных выработок : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сухов Арсений Константинович, 2024. – 128 с. – EDN XJTZOW.

89. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утвержден приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 г. N 439. Зарегистрировано в Минюсте РФ 18 декабря 2020 г. – 64 с.

90. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов [Текст] / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1965. – 380 с.

91. Харисов, Т.Ф. Проблемы оценки устойчивости бортов карьера Киембаевского месторождения / Т.Ф. Харисов, О.Д. Харисова, Е.Ю. Ефремов [и др.] // Проблемы недропользования. – 2017. – № 4(15). – С. 33-42. – EDN ZXKYEX.

92. Цирель, С.В. Применение физического моделирования для установления критериев потери устойчивости прибортовго массива / С.В. Цирель, А.А. Павлович, Н.Я. Мельников // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – № 2. – С. 145-152. – EDN YTDKDZ.

93. Чебаков, А.В. Метод расчета устойчивости бортов глубоких карьеров / А.В. Чебаков // Записки Горного института. – 2010. – Т. 185. – С. 179. – EDN RENSMZ.

94. Шабаров, А.Н. Методика маркшейдерско-геодезических наблюдений оползневого процесса склоновой системы на основе данных спутниковых определений / А.Н. Шабаров, А.А. Кузин, В.Г. Филиппов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 2. – С. 130-144. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2025\_2\_0\_130. – EDN AHOMCG.

95. Шпаков, П.С. Исследование и обоснование параметров устойчивых карьерных откосов месторождения "Эльдорадо" / П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков, В.В. Руденко // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 5. – С. 80-88. – EDN SCVOOF.

96. Шпаков, П.С. Расчет устойчивости карьерных откосов Боголюбовского месторождения / П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков, В.В. Руденко // Горный информационноаналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 185-190. – EDN SADDQJ.

97. Шустов, Д.В. Прогноз сдвижений и деформаций горного массива Тишинского месторождения методами конечных и дискретных элементов / Д.В. Шустов, А.О. Ермашов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – Т. 11, № 5. – С. 89-96. – EDN PFJDGL.

98. Яковлев, А.В. Анализ деформационного поведения массива северо-западного борта главного карьера АО "ЕВРАЗ КГОК" / А.В. Яковлев, Т.М. Переход, Е.С. Шимкив // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3(18). – С. 89-95. – EDN VAEIXD.

99. Яковлев, А.В. Геомеханическое обеспечение формирования бортов карьеров и отвалов / А.В. Яковлев // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4(11). – С. 75-80. – EDN ХЕРОНВ.

100. Яковлев, А.В. Тектоническая дезинтеграция массива потенциально оползневого участка борта Главного карьера Качканарского ГОКа / А.В. Яковлев, М.С. Волкодаева, Н.И. Ермаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 7. – С. 32-35. – EDN ICJILV.

101. Chen, Jl., Li, Hb., Jiang, N. et al. A Method for Automatic Assessment of Rockfall Susceptibility Based on High-Resolution Point Clouds / Chen, Jl., Li, Hb., Jiang, N. et al. // Rock Mech Rock Eng 57. – 2024. – 1717-1733. – DOI 10.1007/s00603-023-03651-2.

102. Chen, N. Semi-automatic recognition of rock mass discontinuity based on 3D point clouds / Chen, N., Wu, X., Xiao, H. et al. // Discov Appl. – 2024. – 230 (6). – DOI 10.1007/s42452-024-05876-4.

103. Elisabeth, Ötsch. Investigation of space-continuous deformation from point clouds of structured surfaces / Elisabeth Ötsch, Corinna Harmening and Hans Neuner // From the journal Journal of Applied Geodesy. – 2023. – 17 (3). – DOI 10.1515/jag-2022-0038.

104. Ghezzi, I. Assessing Conservation Conditions at La Fortaleza de Kuelap, Peru / Ghezzi, I.; Kościuk, J.; Church, W.; VanValkenburgh, P.; Ćmielewski, B.; Kucera, M.; Dąbek, P.B.; Contreras, J.; Mori, N.; Righetti, G.; Serafini, S.; Rojas, C. // Based on Integrated Close-Range Remote Sensing and Near-Surface Geophysics. Remote Sens. – 2024. – 16, 1053.

105. Jia-wen, Zhou. An optimized fuzzy K-means clustering method for automated rock discontinuities extraction from point clouds / Jia-wen Zhou, Jun-lin Chen, Hai-bo Li // International

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2024. – Volume 173, 105627, DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105627.

106. Juan, Liu. Study on Mechanical Model for Postpeak Shear Behavior of Rock Joints Based on Degradation Characteristics of the 3D Morphology / Juan Liu, Feng Gao, Yan Xing, Xianghe Gao // Advances in Civil Engineering, vol. 2024, Article ID 6632239, 18 pages, 2024. DOI 10.1155/2024/6632239.

107. Kovani<sup>°</sup>c, L'. Analysis of Point Clouds Obtained by SfM Photogrammetry and the TLS Method—Study in Quarry Environment / Kovani<sup>°</sup>c, L'.; Pet'ovský, P.; Topitzer, B.; Blišt'an, P. // Spatial Land. – 2024. – 614 (13). DOI 10.3390/land13050614.

108. Leping, He. Rapid assessment of slope deformation in 3D point cloud considering featurebased simplification and deformed area extraction / Leping He, Zhongmin Yan, Qijun Hu, Bo Xiang, Hongbiao Xu and Yu Bai. Leping He et al // Meas. Sci. Technol. – 2023. – 34 055201. DOI 10.1088/1361-6501/acafff.

109. Liangxing, Jin. A Comprehensive Evaluation of Resilience in Abandoned Open-Pit Mine Slopes Based on a Two-Dimensional Cloud Model with Combination Weighting / Liangxing Jin Pingting Liu,Wenbing Yao, Junjie Wei // Mathematics – 2024. – 12(8), 1213. – DOI 10.3390/math12081213.

110. Ma, C., Bai, X., Dong, Y., Fu, Y., Guo, F., Zhang, H., Zhang, Z. (2024). A knowledgebased intelligent recognition method for rock discontinuities with point cloud data. Annals of GIS, 1– 15. DOI 10.1080/19475683.2024.2345425.

111. Meng, X. et al. Open-Pit Granite Mining Area Extraction Using UAV Aerial Images and the Novel GIPNet //Remote Sensing. – 2024. – T. 16. – №. 5. – C. 789. DOI 10.3390/rs16050789.

112. Mineo, S. et al. Implementing close-range remote surveys for the digitally supported rock mass stability analysis // Engineering Geology. – 2024. – T. 328. – C. 107382. DOI 10.1016/j.enggeo.2023.107382.

113. Mora-Félix, Z. D. et al. Performance and precision analysis of 3D surface modeling through UAVs: validation and comparison of different photogrammetric data processing software // Physica Scripta. -2024. -T. 99.  $-N_{\odot}$ . 3. -C. 035017. DOI 10.1088/1402-4896/ad23ab.

114. Paris, V. Distinct Element Method Analyses for Damage Assessment: The Northern Spur of Valverde Bulwark in the Venetian Fortress of Bergamo / Paris, V., Gobbin, F., Nannei, V. M., Resmini, M., & Mirabella Roberti, G // International Journal of Architectural Heritage. – 2024. – Pp. 1-15. DOI 10.1080/15583058.2024.2345701.

115. Qian, Chen. A human-machine interaction method for rock discontinuities mapping by three-dimensional point clouds with noises / Qian Chen, Yunfeng Ge, Changdong Li, Huiming Tang,

Geng Liu, Weixiang Chen // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. -2024. - 17 (5). - DOI 10.1016/j.jrmge.2024.03.002.

116. Sun, W. Experimental Study of a Reconstruction Method for Rock Joints in Sandstone Based on 3D Laser Scanning and 3D Engraving Techniques / Sun, W., Zhang, XP., Zeng, YW. et al // Arab J Sci Eng. –2024. – 49, 5749–5766. DOI 10.1007/s13369-023-08370-y.

117. Yingtao, Yuan. Three dimensional deformation measurement method based on image guided point cloud registration / Yingtao Yuan, Zhendong Ge, Baokang Lai, Xiang Guo, Yueqiang Zhang, Xiaolin Liu, Tao Suo, Qifeng Yu. // Optics and Lasers in Engineering. – 2023. – Volume 161, 107399. DOI 10.1016/j.optlaseng.2022.107399.

118. Yuting, Zhang. Extraction Method of Cavern Surface Deformation Region Based on Alpha Shapes Contour Point Cloud Recognition Algorithm / Yuting, Zhang and Dehua, Zheng and Siyuan, Li // Journal of Hohai University. – 2024. – DOI 10.2139/ssrn.4789496.

119. Yuxian, Zhang. A Method for Deformation Detection and Reconstruction of Shield Tunnel Based on Point Cloud / Yuxian Zhang, Xuhua Ren, Jixun Zhang, Zichang Ma // Journal of Construction Engineering and Management. – Volume 150 (3), Issue. – DOI 10.1061/JCEMD4.COENG-14225.

120. Zhabko, A. Theoretical basis for calculation of the quarry's sides for collapse / Zhabko A., Volkomorova N., Zhabko N. // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. – 2020. – vol. 177, p. 01004. DOI 10.1051/e3sconf/202017701004.
## ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения

тел./факс : 315-21-57, 315- 70-10, 314-86-28

190000, Санкт-Петербург, ул. Якубовича, дом 22,пом.3-Н,литер А

#### ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

«БЕНТА»



10 марта 2025 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Вальковой Евгении Олеговны по специальности 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Комиссия в составе:

председатель Виноградов П.К.;

члены комиссии: Виноградов К.П., Наймушина Е.М., Соколов С.М.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Маркшейдерское обеспечение оценки устойчивости бортов карьеров на основе геомеханического анализа оползневого процесса», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, включены в производственную деятельность предприятия при сопровождения комплексных инженерных изысканий для:

- уточнения цифровых моделей рельефа по облакам точек;
- районирования опасных процессов на наблюдаемых объектах;

- сопоставления разновременных съемок в ходе мониторинга деформаций объектов местности.

Эффективность предложенных алгоритмов проверена при решении прикладных задач на реальных объектах.

Председатель комиссии

Ген. директор

Члены комиссии:

Зам. ген. директора, к.т.н.

Начальник отдела картографии

Заместитель начальника отдела ИГДИ

/Виноградов П.К./

/Виноградов К.П./ /Наймушина Е.М./ /Соколов С.М. /

181

### ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

### RU2023666272



#### ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПОИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2023666272 Дата регистрации: 27.07.2023 Номер и дата поступления заявки: 2023664597 12.07.2023 Дата публикации и номер бюллетеня: 27.07.2023 Бюл. № 8 Автор(ы): Мустафин Мурат Газизович (RU), Валькова Евгения Олеговна (RU) Правообладатель(и): федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)

Название программы для ЭВМ: Деформация

#### Реферат:

Программа предназначена для определения смещенных точек по результатам систематических (повторных) натурных наблюдений. Может применяться в ВУЗах при выполнении расчетно-графических работ, курсового и дипломного проектирования, при реализации образовательных программ по специальностям 2.8.3. «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр», 1.6.22 «Геодезия»; выполнения научно-исследовательских работ. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: построение диаграмм Воронова; построение триангуляционной сети; трансформация независимых систем координат в единую систему; определение смещенных точек по результатам систематических (повторных) маркшейдерско-геодезических измерений; оценка деформаций для любого набора точек, в том числе для определенных фигур.

Язык программирования:	Pascal
Объем программы для ЭВМ:	674 КБ

Стр.: 1

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

# Карта геомеханических рисков



Рисунок В.1 – Карта геомеханических рисков (красным цветом выделены фактические деформации, зеленым – потенциальные деформации, синим – риск камнепада)