

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т.Ф. ГОРБАЧЕВА"**

На правах рукописи



АНАНЕНКО ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД
НА НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ**

Специальность: 2.8.6 – "Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэrogазодинамика и горная теплофизика"

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор С. П. Бахаева

Кемерово 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ 11	
1.1 Деструктивные процессы и деформации при формировании отвалов .	11
1.2 Нагрузки и воздействия, влияющие на устойчивость отвалов	25
1.3 Прогноз устойчивости откосов отвалов, расположенных на наклонном основании	29
1.4 Выводы, цель и задачи исследования	35
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА СМЕЩЕНИЯ ОТВАЛЬНЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ ТИПИЗАЦИИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "ОТВАЛ-ОСНОВАНИЕ", АНАЛИЗА РИСКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА..... 37	
2.1 Структуризация системы геомеханического мониторинга	38
2.2 Механизмы и схемы деформирования природно-технических систем "отвал-основание"	44
2.3 Экспериментальные исследования влияния рельефа основания отвала на динамику развития деструктивных процессов	50
2.4 Выводы по главе 2.....	53
3 УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ "ОТВАЛ- ОСНОВАНИЕ" 55	
3.1 Алгоритм оценки устойчивости природно-технических систем "отвал- основание".....	55
3.2 Определение нагрузок и воздействий, влияющих на устойчивость природно-технических систем "отвал-основание"	59

3.3 Моделирование природно-технической системы "отвал-основание" ...	59
3.4 Исследование влияния нагрузок и воздействий на устойчивость природно-технических систем "отвал-основание"	62
3.5 Оценка риска развития деформаций природно-технических систем "отвал-основание"	76
3.6 Выводы по главе 3.....	83
4 ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО РИСКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ	85
4.1 Разработка конструкции наблюдательной станции	86
4.2 Интерпретация результатов геомеханического мониторинга.....	93
4.3 Определение качественных и количественных критериев оценки результатов геомеханического мониторинга	101
4.4 Обоснование критериев оценки уровня геомеханического риска для прогноза устойчивости природно-технических систем "отвал-основание"	113
4.5 Выводы по главе 4.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
Приложение А. Акты внедрения результатов исследования	139
Приложение Б. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №202566023	143
Приложение В. Титульный лист "Методических рекомендаций по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Формирование отвалов вскрышных пород сопряжено с риском возникновения оползней, приводящих к нарушению технологического режима работы предприятия, повреждению объектов инфраструктуры (автомобильных и железных дорог, технологических комплексов, линий электропередач и т.д.) и негативному воздействию на окружающую среду. Основными физическими причинами нарушения устойчивости отвалов являются неоднородность механических свойств породного массива, обусловленная его геологической структурой; изменение во времени прочностных свойств пород на контакте отвала с основанием вследствие влагонасыщения под воздействием гидрогеологических и климатических факторов. При этом механические характеристики пород основания оказывают большее влияние на устойчивость отвала, чем отвальная масса вскрышных пород. Поэтому при обосновании устойчивости отвалов следует рассматривать природно-техническую систему (ПТС) "отвал-основание".

До настоящего времени не установлен механизм смещения отвальной массы, не исследовано влияние рельефа основания отвала на динамику развития деструктивных процессов, не установлены закономерности влияния нагрузок на состояние техногенного массива, не разработаны критерии для оценки уровня геомеханического риска развития деформаций и прогноза устойчивости ПТС "отвал-основание".

Изложенное позволяет считать актуальным решение вопросов по геомеханическому обоснованию устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном слоистом основании на основе результатов геомеханического мониторинга. Применение в практике горных предприятий результатов работы позволит снизить геомеханические риски и негативные последствия от оползней отвалов.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами геомеханического обеспечения открытой добычи полезных ископаемых в части управления устойчивостью отвалов посвящены труды многих ученых: Астафьева Е.Ю., Бабелло В.А., Бахаевой С.П., Галустяна Э.Л.,

Гальперина А.М., Дашко Р.Э., Жабко А.В., Кутепова Ю.И., Мочалова А.М., Пустовойтой Т.К., Пушкарева В.И., Соколовского В.В., Фисенко Г.Л. и др.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, опубликованных трудов и методических рекомендаций, методик и способов контроля, развитие техники и технологий ведут к увеличению параметров отвалов и нагрузок на откос, что требует дальнейшего изучения оползневых процессов и механизмов деформирования отвалов вскрышных пород, размещаемых на наклонном слоистом основании, для прогноза состояния и управления их устойчивостью.

Исследования выполнялись по планам хозяйственных договоров, заключаемых научно-исследовательской лабораторией "Устойчивость бортов карьеров" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" с горнодобывающими организациями.

Цель работы – геомеханическое обоснование устойчивости откосов отвалов, расположенных на наклонном основании, обеспечивающее повышение безопасности горных работ за счёт предотвращение деформаций на ранней стадии их проявления.

Идея работы заключается в использовании закономерностей деформационных процессов и взаимосвязанной с ними скорости смещения отвальной массы по контакту с наклонным основанием для обоснования критериев геомеханического риска, характеризующих устойчивость откосов отвалов.

Для достижения поставленной цели, в диссертации сформулированы и решены взаимоувязанные задачи:

- определение механизма оползневых деформаций на основе типизации природно-технической системы "отвал-основание", анализа риска нарушения устойчивости и геомеханического мониторинга;
- установление влияния нагрузок и воздействий на устойчивость природно-технической системы "отвал-основание";

– обоснование критериев оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании.

Объект исследований: природно-техническая система "отвал-основание" при открытой добыче полезных ископаемых.

Предмет исследований: деформационные процессы отвалов, размещаемых на наклонном слоистом основании.

Методология и методы исследования

Метод системного анализа для типизации ПТС "отвал-основание"; метод "Анализ дерева событий" ("ETA") для выявления схем и механизмов развития деформаций отвалов и их вероятностей; моделирование ПТС "отвал-основание"; метод многоугольника сил для прогноза устойчивости откосов отвалов; метод "матрицы рисков" для определения уровня риска развития деформаций и нарушения устойчивости; ретроспективный анализ в области геомеханического мониторинга отвалов вскрышных пород; геомеханический мониторинг за деформациями отвалов; методы математической статистики и корреляции для обработки экспериментальных данных и оценки их сходимости.

Научные положения, выносимые на защиту:

– нарушение устойчивости отвала с вероятностью более 70% определяется показателем F , представляющим отношение наклона основания к сопротивлению сдвигу по подошве отвала ϕ' , при этом сдвиговые деформации вдоль контакта возникают при $F \geq 0,7$, с увеличением показателя F начинается вращательное смещение с выпором, при $F = 1,0$ происходит оползень отвала;

– коэффициент устойчивости природно-технической системы "отвал-основание" связан линейным уравнением регрессии с коэффициентом обводнения отвала, определяющим величину ϕ' , при коэффициенте регрессии -0,0074;

– для оперативного прогноза устойчивости отвалов, размещаемых на наклонном основании, целесообразно использовать нелинейную зависимость коэффициента обводнения отвала со скоростью полного вектора смещения отвальной массы, при этом скорость от 20 мм/сут указывает на начало деформаций, при скорости 90 мм/сут наступает предаварийное состояние, скорость бо-

лее 300 мм/сут является критической, при которой происходит обрушение отвального массива.

Научная новизна работы заключается:

- в определении зависимости механизма смещения отвального массива от отношения наклона основания и характеристик сопротивления сдвигу по подошве отвала, выражаемого показателем F ;
- в установлении регрессионной связи и степени влияния нагрузок и воздействий на коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание";
- в экспериментально-аналитическом обосновании критериев, характеризующих уровень геомеханического риска, позволяющих прогнозировать деформации и управлять устойчивостью откосов отвалов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- применением стандартных методов исследований: системный анализ, "Анализ дерева событий", "Анализ дерева отказов", матрица рисков;
- использованием апробированных методов математической статистики и корреляционного анализа для обработки экспериментальных данных;
- положительным опытом внедрения системы геомеханического мониторинга на 18 отвалах горнодобывающих предприятий, что подтверждается Актами внедрения результатов исследования на ООО "Солнцевский угольный разрез" и месторождениях АО "Олкон".

Личный вклад автора заключается:

- в разработке идеально-знаковой модели природно-технической системы "отвал-основание", отражающей типизацию отвалов по условиям их формирования, влияющих на механизм и схему деформирования отвального массива;
- в установлении регрессионной зависимости коэффициента устойчивости от факторных показателей, их предельный диапазон;
- в разработке и внедрении Методического руководства по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород и Проектов геомеханического мониторинга на горнодобывающих предприятиях;

– в разработке алгоритма и программы для ЭВМ по камеральной обработке результатов инструментальных наблюдений;

– в проведении инструментальных наблюдений за деформациями отвалов и обосновании критериев прогноза устойчивости откосов ПТС "отвал-основание", характеризующих уровень геомеханического риска.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

– разработана идеально-знаковая модель природно-технической системы "отвал-основание", отражающая типизацию отвалов по условиям формирования, влияющим на их устойчивость;

– определена зависимость механизма смещения отвальной массы по подошве отвала от показателя F , представляющего отношение наклона основания β к сопротивлению сдвигу по подошве отвала ϕ' ;

– установлены статистические связи коэффициента устойчивости от факторных показателей и диапазоны, в пределах которых допустимы отклонения фактических параметров отвалов от проектных;

– обоснованы критериальные показатели, характеризующие уровень геомеханического риска, позволяющие прогнозировать устойчивость и управлять состоянием отвалов.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

– разработана методика геомеханического мониторинга, реализованная в форме Методического руководства по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород;

– созданы номограммы, позволяющие в оперативном режиме выбирать методы и средства измерений для геомеханического мониторинга природно-технической системы "отвал-основание", обеспечивающие требуемую точность в реальных условиях;

– разработан алгоритм и программа (в соавторстве) для ЭВМ "*Deformation control*", предназначенные для обработки результатов геомеханического мониторинга;

– результаты исследования внедрены в Проекты геомеханического мониторинга, а также в учебный процесс образовательных учреждений горного профиля.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Тема диссертации соответствует пункту 2 паспорта специальности 2.8.6 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэrogазодинамика и горная теплофизика":

– п.2. Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок.

Реализация работы

Результаты исследований, отражающие практическую реализацию работы изложены в документе: "Методическое руководство по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород" / С. П. Бахаева, Е. В. Ананенко, Д.В. Гурьев / КузГТУ. – Кемерово, 2025. – 89 с. Документ согласован с ОАО "СУЭК-Кузбасс", АО "УК "Кузбассразрезуголь" и принят к использованию при выполнении хоздоговорных научно-исследовательских работ с горнодобывающими предприятиями при геомеханическом сопровождении открытых горных работ.

Полученные научно-практические результаты применяются при обучении студентов специальности 21.05.04 "Горное дело".

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на: международной специализированной выставке "Уголь России и Майнинг" (Новокузнецк, 2018); международном форум-конкурсе молодых ученых "Актуальные проблемы недропользования" (Санкт-Петербург, 2019 и 2024 гг.); международном научном симпозиуме "Неделя горняка" (Москва, 2019 и 2024 гг.); международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2019 и 2021 гг.); международном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков "Проблемы горного дела" (Донецк, 2021 и 2023 гг.).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объем работы: диссертация включает введение, 4 главы, заключение, 3 приложения, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 14 таблиц, список литературных источников из 125 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ

1.1 Деструктивные процессы и деформации при формировании отвалов

В вопросы геомеханического обоснования устойчивости отвалов вскрышных пород большой вклад внесли учёные: Афанасьев Б.Г., Бряков С.П., Галустян Э.Л., Гурин А.Н., Ермаков И.И., Ишутин С.А., Кагермазова С.В., Козлов Ю.С., Кутепова Н.А., Мочалов А.М, Норватов Ю.А., Пустовойтова Т.К., Пушкарев В.И., Фисенко Г.Л. Значимым результатом научных исследований коллектива ВНИМИ явились "Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах" (1998 г.), которые используются в качестве отраслевого нормативно-методического документа [1]. Научно-методические разработки, изложенные в "Правилах ..." [1], положены в основу Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности (ФНиП) "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" (2021 г.) [2], утвержденные Приказом Ростехнадзора от 13.11.2020 №439, вступившем в силу с 01.01.2021.

По теме геомеханического обоснования устойчивости отвалов и мониторинга техногенных сооружений опубликованы монографии, научные статьи, диссертации ряда ученых [3-12].

Наиболее значимый вклад в решение проблем устойчивости отвалов и изучения их напряженно-деформированного состояния внесли Гальперин А.М., Жабко А.В., Крячко О.Ю., Кутепов Ю.Ю., Несмеянов Б.В., Павлович А.А., Попов С.В., Хашин В.Н., Юнаков Ю.Л., и др.

Хашинным В.Н. разработаны технологические способы повышения устойчивости внутренних отвалов [8]. В совместной работе Крячко О. Ю., Хашина В.Н., Норватова Ю.А. и Мочалова А.М. приведены исследования по обоснованию оптимальных параметров отвалов на угольных месторождениях [13].

Оценке устойчивости откосов отвалов, инструментальному контролю развития деформаций породных массивов на рудных месторождениях посвящены работы Попова В.Н., Попова С.В., Несмеянова Б.В. [14-16].

Исследованиями Пуневского С.А. [7] и Юнакова Ю.Л. подтверждено пространственно-временное изменение прочностных свойств слабых пород естественных и намывных оснований отвалов.

Накопленный опыт по исследованию устойчивости отвалов вскрышных пород не охватывает оползневые процессы и механизм деформирования отвалов вскрышных пород, размещаемых на наклонном слоистом основании. Не проводились исследования по оценке влияния нагрузок и воздействий на долговременную устойчивость откосов отвалов.

Певзнером М.Е. разработаны схемы деформирования отвалов на прочном и слабом основании в зависимости от типа пород отвальной массы. На схемах приведены механизм деформирования и наиболее подходящий метод расчета устойчивости [17]. В ФНиП "Правила обеспечения устойчивости..." [2] приведены три схемы деформирования откосов отвалов (надподошвенный, подошвенный и подподошвенный оползни), которые также обусловлены породами отвальной массы и основания. При этом, в обоих источниках [2, 17] не учитывается отношение наклона основания отвалов к сопротивлению сдвигу по подошве отвала – фактора, оказывающего решающее влияние на механизм смещения отвального массива.

С начала нового столетия в России стали отдавать предпочтение разработке полезных ископаемых открытым способом, например, объём добычи угля подземным и открытым способами в 1988-1995 гг. был практически равным, в 2000 году объём угля, добытый открытым способом, превысил подземную добычу почти вдвое, в 2020 – втрое (рисунок 1.1) [18].

По итогам 2023 года в Российской Федерации открытым способом извлекли из недр 341,0 млн. т. угля, подземным – 97,7 млн. т. Добычу осуществляли 179 угольных предприятий, из них 127 разрезов и 52 шахты. Совокупная производственная мощность по добыче угля за 2023 год составила 438,7 млн. т,

при этом объём вскрышной породы, складируемой в многоярусные отвалы, превысил 2,4 млрд. м³.



Рисунок 1.1 – Добыча угля в Российской Федерации

В условиях высокой стоимости аренды земельных участков, ограничения их площадей под отвалы при значимом увеличении объемов вскрышных пород, участились случаи оползней отвальных массивов [19-21].

Анализ упомянутых научно-исследовательских работ, материалов расследования причин аварий на горных предприятиях, натурные обследования и анализ условий эксплуатации, проводимые автором настоящей диссертации более десяти лет на горнодобывающих предприятиях [22-24], показали, что вследствие отсутствия должного геомеханического обоснования процессов формирования отвалов и неполноты нормативных требований к геомеханическому мониторингу отвалов невозможно своевременно выявить деструктивные процессы и принять соответствующие меры по предотвращению инцидентов и аварийных ситуаций. Примеры деформационных процессов на горных предприятиях приведены ниже.

1 апреля 2015 года произошел один из крупнейших оползней на внешнем отвале разреза "3" (рисунок 1.2). Эксплуатация отвала осуществлялась с

2004 года. Высота отвала достигала 122 м, результирующий угол наклона отвала 14° , угол наклона основания 5° .

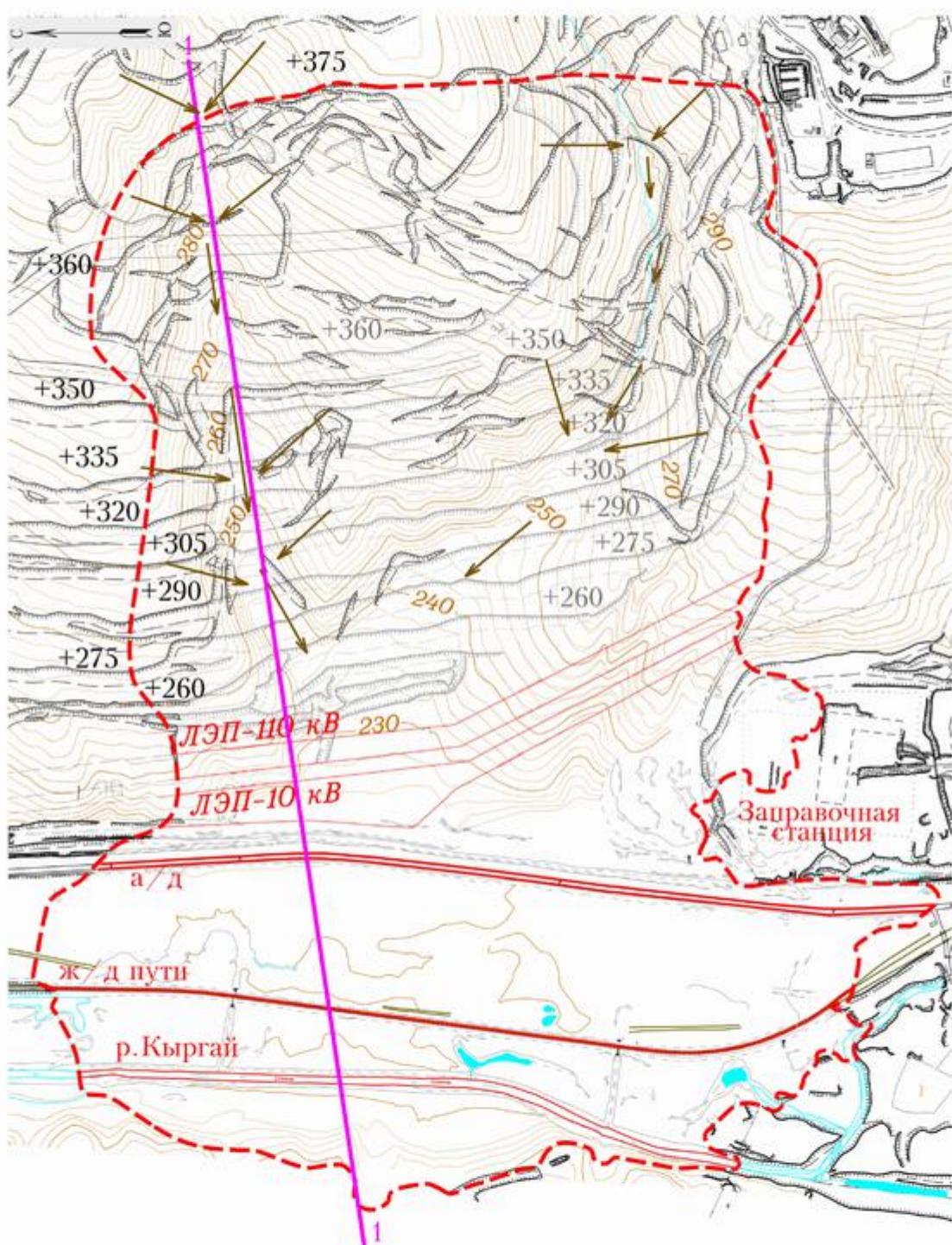


Рисунок 1.2 – План внешнего отвала разреза "3"

Условные обозначения:

- | | | | | | |
|--|----------------------------------|--|--|--|---|
| | – положение отвала после оползня | | – изолинии земной поверхности (основание отвала) | | – сечение |
| | – положение отвала до оползня | | – контур оползня | | – направление смещения отвального массива |

Основание отвала на участке произошедшей деформации овражного типа, сложено глинами и суглинками различной консистенции.

В отвал складировались вскрышные скальные породы (60 %), представленные преимущественно алевролитами, с примесью песчаников, аргиллитов и дисперсные (40 %) песчано-глинистые породы.

Развитие деформаций можно охарактеризовать следующим образом: "инициирующее" событие произошло в районе тальвега лога (сечение 1, рисунок 1.3), эта деформация спровоцировала более масштабное нарушение устойчивости отвала, расположенного на склоне; по достижении оползневой массой обводненного участка вдоль автодороги, тело оползня сменило северо-западный вектор движения и стало распространяться по пути наименьшего сопротивления в западном и юго-западном направлениях; по достижении естественной преграды в виде западного склона долины реки Кыргай, где произошла некоторая компенсация оползневого давления и дальнейшее гашение кинетической энергии происходило в южном направлении вдоль реки [25, 26].

В зоне влияния оползня оказались линии электропередач 110 кВ и 10 кВ, засыпаны технологическая автомобильная дорога общего пользования и подъездные железнодорожные пути Талдинского ПТУ, перекрыто русло реки Кыргай за 4 дня до начала весеннего паводка (рисунок 1.4,а). В результате аварии были остановлены работы на ряде предприятий, нарушена отгрузка добывого угля, затоплена территория более 6 га (рисунок 1.4,б), деформированы цистерны заправочной станции, вследствие чего произошла утечка вредных веществ в реку Кыргай. Общий ущерб аварии составил более 4 млрд. рублей.

Возникновению такой масштабной деформации отвала послужил ряд факторов. Основные причины: размещение отвала в логовых частях рельефа с асимметричными склонами; перекрытие стока с поверхности отвала атмосферных осадков насыпями автомобильной и железной дорог, что привело к образованию в теле отвала техногенного водоносного горизонта и снижению прочностных характеристик пород в нижней части отвала (см. рисунок 1.2). Геомеханический мониторинг внешнего отвала не проводился.

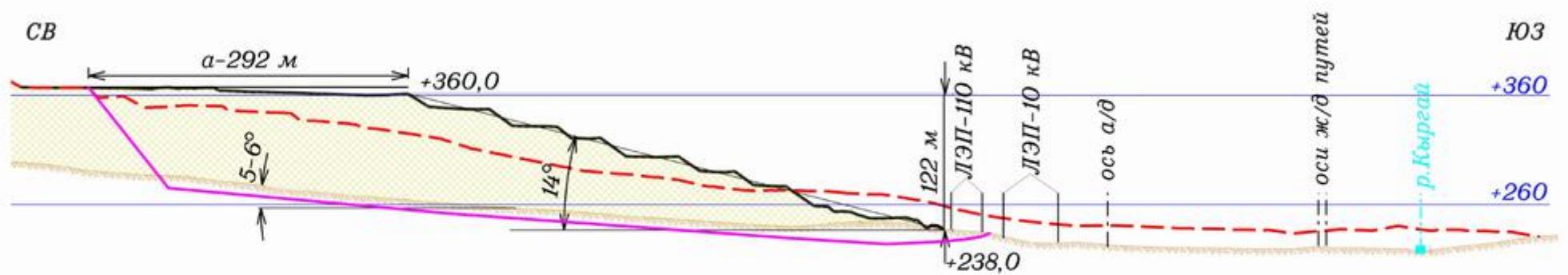


Рисунок 1.3 – Сечение 1-1 по внешнему отвалу разреза "3"

Условные обозначения:

- контур отвала до оползня
- контур отвала после оползня

- поверхность скольжения
- земная поверхность



Рисунок 1.4 – Фотоснимки: а) оползня отвала; б) затопленной территории

Деформация внешнего отвала вскрышных пород разреза "Р" произошла в сентябре 2017 года (рисунок 1.5).

Эксплуатация отвала осуществлялась с 2014 года. Территория, отведённая под отвал, расположена на водоразделе рек Кыргай и Талда и представляет глубокорасчленённую равнину с чередованием логов и увалов. Тальвеги логов заболочены. Высота отвала 58 м, результирующий угол 12° , угол наклона основания 5° . Основание представлено суглинками, глинами, супесью и галечником. Мощность четвертичных отложений достигала 25 м.



Рисунок 1.5 – Оползень внешнего отвала разреза "Р"
(фотоснимок с квадрокоптера)

В отвал складировались вскрышные породы, представленные преимущественно алевролитами и песчаниками, с примесью аргиллитов (80%) и песчано-глинистых пород: суглинков и глин различной консистенции (20%).

Формирование отвала осуществлялось после проведения инженерной подготовки основания, которая включала сооружение водоотводных канав и дренажных траншей, удаление слабых глинистых пород из основания (локально) и замещение их скальными породами (рисунок 1.6).

По результатам изучения горно-графической документации, оценки фактических параметров отвала до оползня установлено, что деформация отвала развивалась следующим образом: визуальные проявления (трещины, заколы) начала деформационных процессов были отмечены на горизонте +330 м; активное движение южной части оползня в юго-восточном направлении по тальвегу лога с образованием вала выпирания у подножия откоса отвала; движение северной части оползня внешнего отвала в северо-восточном направлении до достижения технологической автодороги.

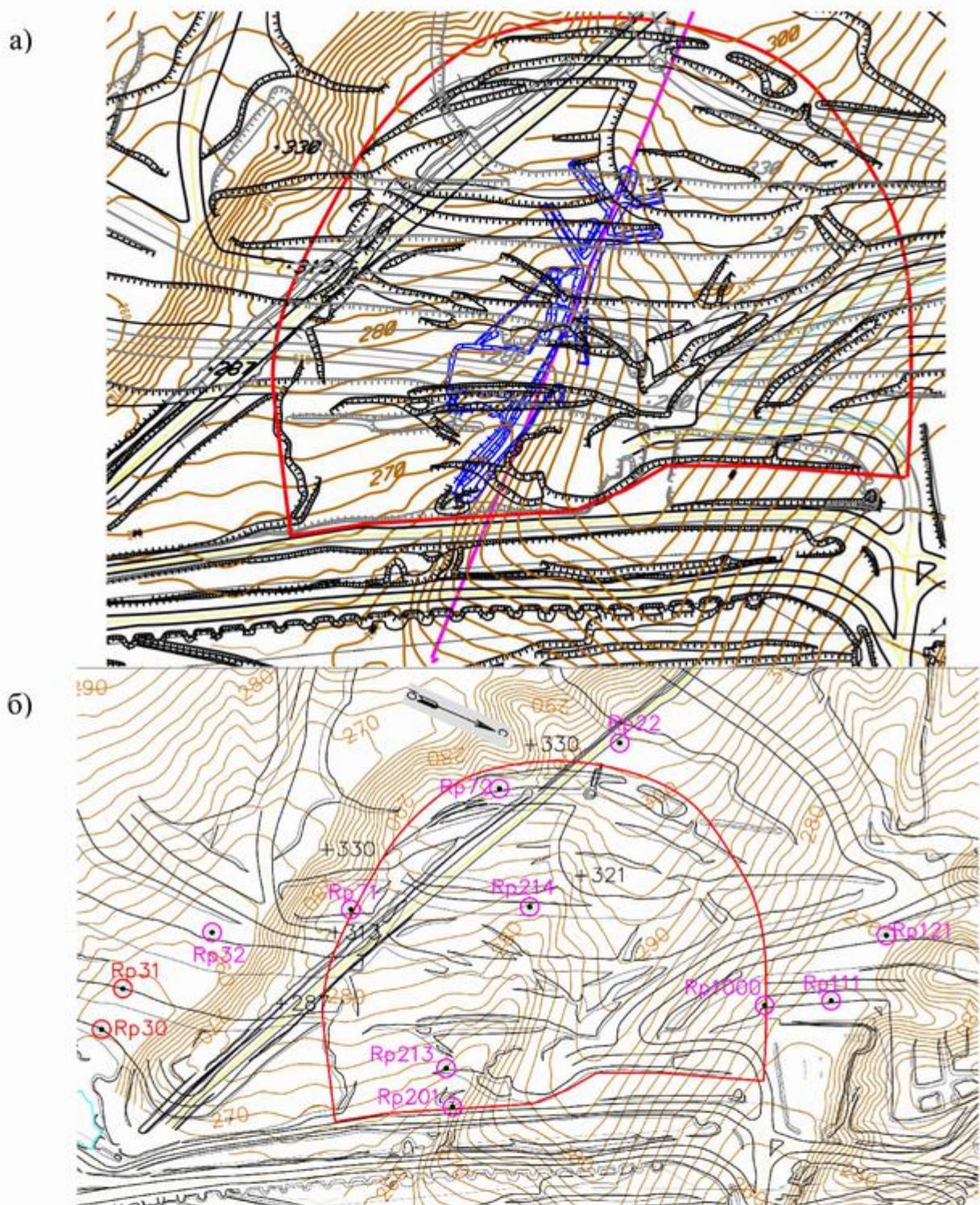


Рисунок 1.6 – План отвала разреза "Р": а) положения до и после деформации; б) положение реперов наблюдательной станции

Условные обозначения:

- положение отвала после оползня
- положение отвала до оползня
- водоотводная дренажная траншея (инженерная подготовка основания)
- Rp31** — рабочий репер наблюдательной станции, заложенный до деформации
- контур оползня
- сечение А-А
- изолинии земной поверхности основания отвала
- Rp32** — рабочий репер наблюдательной станции, заложенный после деформации

Образовалось два языка оползня – северный и южный (см. рисунок 1.5). Южная часть оползня – по тальвегу лога (рисунок 1.7), оползшие породы расположились под углом близким к углу наклона основания ($3\text{--}5^\circ$). Северный язык оползня – от водораздела по склону, имеющему уклон 3° .

В зоне влияния оползня оказались технологические автодороги, ведущие на внешний отвал, в карьерную выемку и на соседний разрез, из-за чего автомобильное движение на двух предприятиях было приостановлено.

Основные причины деформации отвала – нарушение технологии отвалообразования и формирование автомобильных заездов на отвал без сооружения дренажных сооружений под полотном автодорог, что привело к созданию техногенного водоносного горизонта в теле отвала, насыщению водой пород основания и снижению сопротивления сдвигу по контакту с основанием.

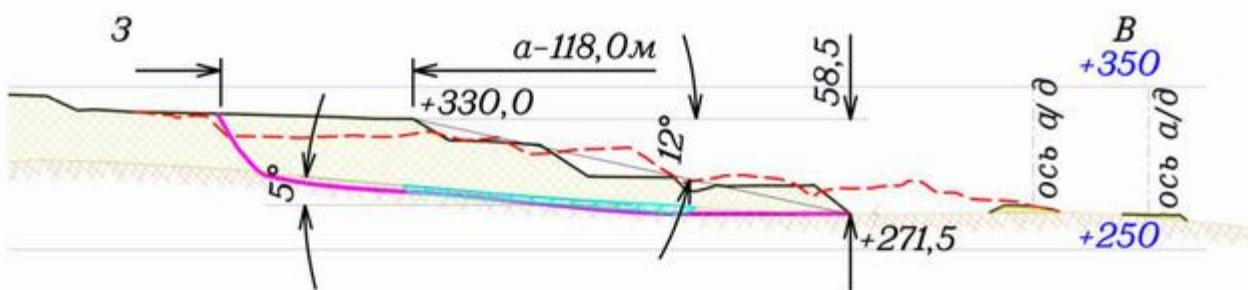


Рисунок 1.7 – Сечение А-А по Внешнему отвалу разреза "Р"

Условные обозначения:

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------|
| — контур отвала до оползня | — поверхность скольжения |
| — контур отвала после оползня | — водоотводная дренажная траншея |
| | — земная поверхность |

Внешний отвал разреза "Ш" введен в эксплуатацию в январе 2019 года, а в сентябре произошел оползень участка отвала, высота которого составляла всего 33 м. В отвал складировались вскрышные скальные породы (90%), представленные алевролитами и песчаниками, с примесью аргиллитов и дисперсные грунты (10%). Высота отвала 33 м, результирующий угол отвала 17° , угол наклона основания 3° . Геомеханический мониторинг устойчивости внешнего отвала не производился.

Поверхность основания отвала представлена центральной водораздельной гривой между речками Иня и Уроп и небольшими продолговатыми гривами, разделенными узкими долинами ручьев и логов. На момент проведения изыскательских работ были зафиксированы единичные постоянные водотоки, представленные ручьями.

Основание отвала сложено суглинками и глинами, мощностью от 3-15 м в логах, до 30-48 м на водоразделах.

Визуальные проявления (трещины, заколы) деструктивных процессов были отмечены на горизонте +305 м (рисунок 1.8). Позже началось активное смещение отвального массива; тело оползня двигалось в северо-восточном направлении до достижения отметки земной поверхности +250,0 м; после этого движение оползня внешнего отвала происходило в восточном направлении по тальвегу лога до полной остановки. По краям и в нижней части оползшей горной массы образовался вал "выпиранья" из дисперсных грунтов, которые залегали в основании отвала (рисунки 1.9, а и 1.9, б).

Выход воды не отмечен. Дисперсные породы вала "выпиранья" были естественной влажности. На верхней части деформированного участка отмечены трещины и заколы дугообразной формы, которые повторяли форму горизонталей рельефа. После оползания отвальных пород на площадке внешнего отвала (абс. отм. +305,0 м) сформировались трещины и заколы, по которым возможно формирование плоскости отрыва следующей призмы обрушения (рисунок 1.8).

В зоне влияния деформации отвала оказались две линии электропередач 10 кВ, язык оползня остановился в нескольких метрах от опоры ЛЭП.

После проведения натурного обследования, анализа горно-графической и геологической документации автором установлены причины развития деформаций. В результате неправильного порядка формирования ярусов отвала произошло погружение отвальных пород в слой мягкопластичных суглинков, мощностью 6,3-8,5 м, с последующим смещением отвального массива по этому слою (рисунок 1.9,в). В районе произошедшей деформации внешний отвал отсыпался со склона вниз по рельефу.

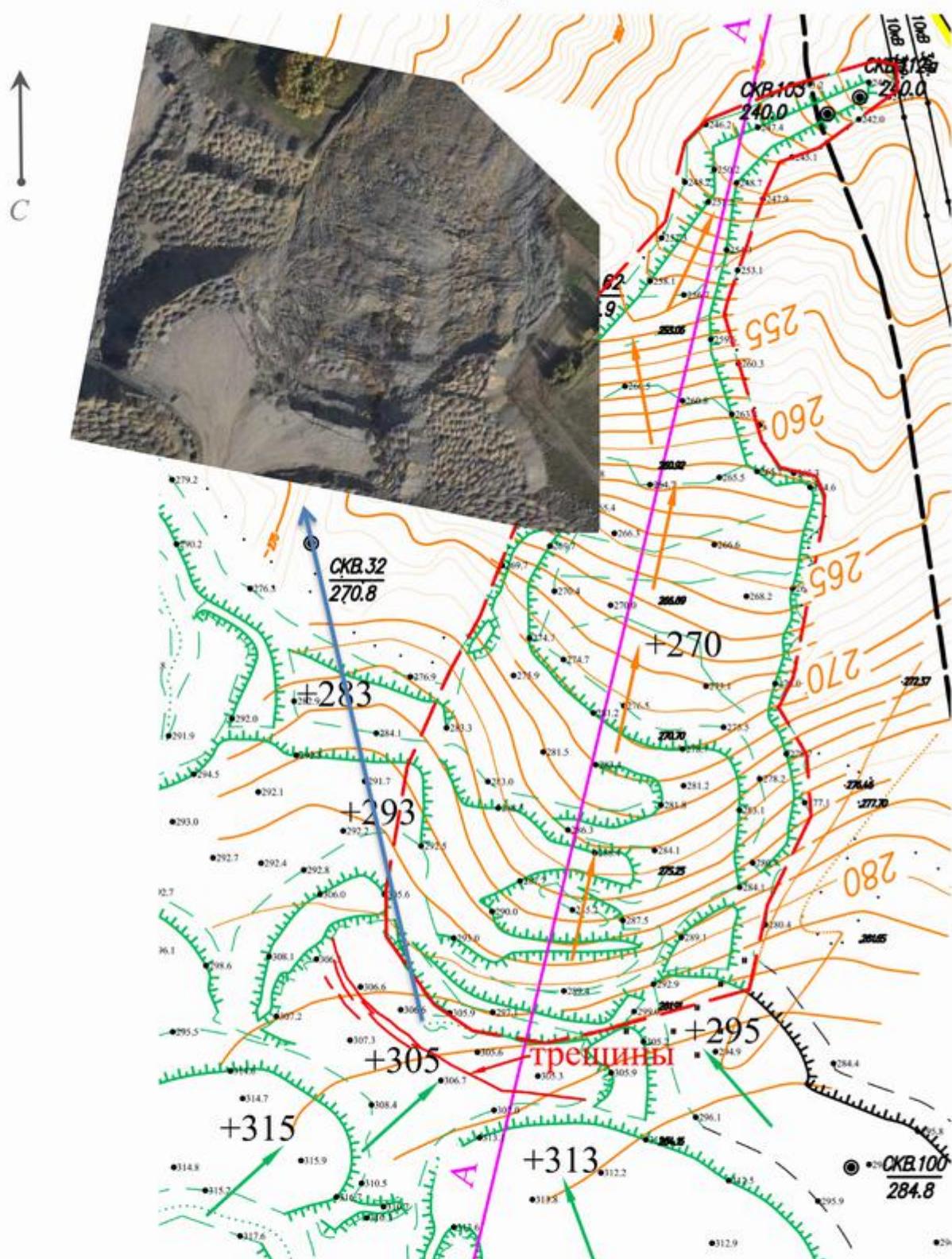


Рисунок 1.8 – Фрагмент ортофотоплана и маркшейдерского плана горных выработок внешнего отвала разреза "Ш" с нанесением положения трещин

- положение отвала после оползня
- изолинии земной поверхности под отвалом
- контур оползня
- линия сечения
- направление формирования отвала
- направление склона

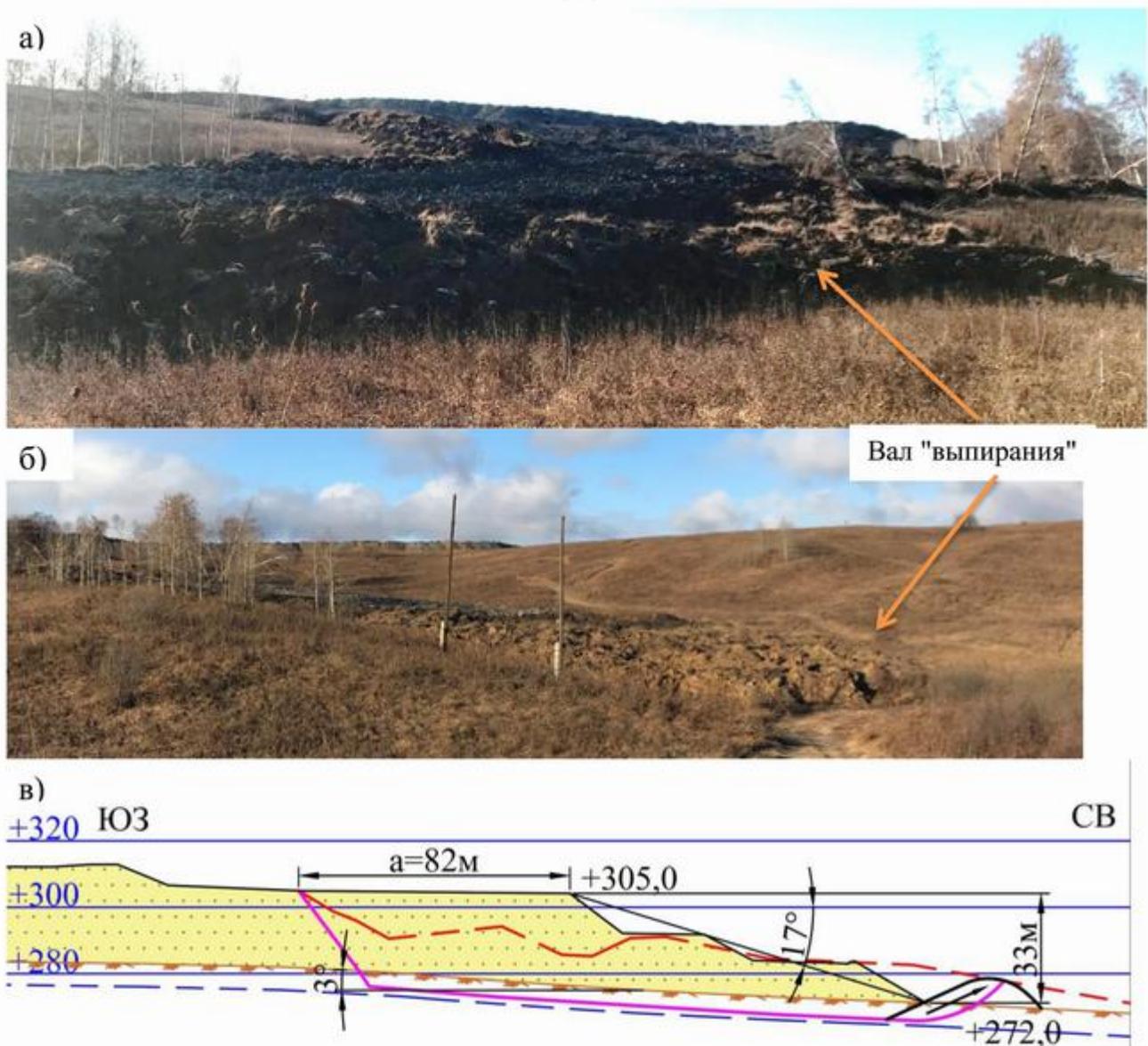


Рисунок 1.9 – Подподошвенный оползень внешнего отвала разреза "Ш":
а и б) фотоснимки оползня; в) сечение А-А по внешнему отвалу

Условные обозначения:

	контур отвала до оползня		поверхность скольжения
	контур отвала после оползня		земная поверхность

Имевшие место инциденты и аварийные ситуации [27-31] наглядно демонстрируют риски возникновения крупных деформаций отвалов вскрышных пород, расположенных на наклонном основании, связанные с отсутствие геомеханического мониторинга при формировании отвалов.

Практика эксплуатации отвалов и расследование причин возникновения деформаций насыпных сооружений показывают (рисунок 1.10), что 32% нарушения устойчивости отвалов произошли при формировании внешних отвалов

на слабом основании, 23% – при наличии логов, водоразделов на площадке под отвал и наклонного основания, 25% – из-за неправильной технологии подготовки основания и порядка формирования отвалов, 15% – вследствие гидрогеологических факторов (создания техногенных водоносных горизонтов в основании или теле отвала) и 5% другие причины (природная и техногенная сейсмика, нагрузки от оборудования, превышающие несущую способность пород) [21, 23].

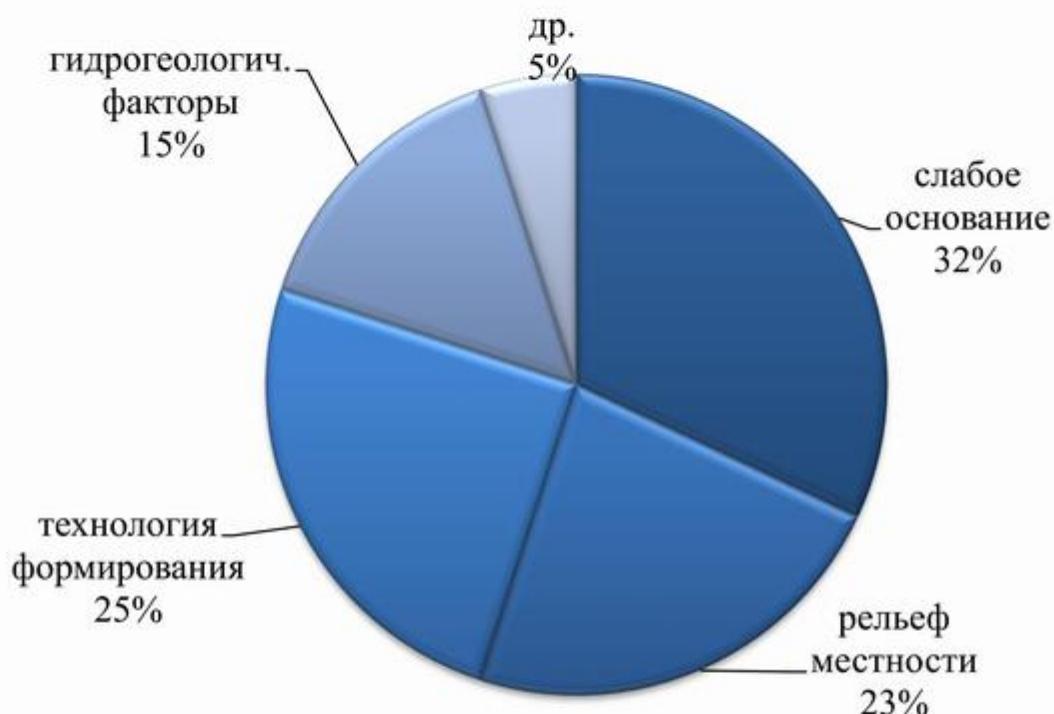


Рисунок 1.10– Причины возникновения деформаций отвалов вскрышных пород

Опыт ведения геомеханического мониторинга, приведенный анализ причин возникновения деформаций на отвалах подтверждает, что своевременное обнаружение деструктивных процессов возможно при условии геомеханического сопровождения процесса формирования отвалов, которое включает в себя ряд задач:

- изучение физико-механических характеристик отвальной массы и сопротивления сдвигу пород основания;
- разработка и внедрение эффективной системы геомеханического мони-

торинга состояния откосов отвалов;

- оценка риска развития деформаций и нарушения устойчивости;
- обоснование качественных и количественных критериев прогноза устойчивости откосов отвалов;
- обоснование параметров отвалов, обеспечивающих их устойчивость;
- разработка рекомендаций по стабилизации оползневых явлений.

Из всех вышеперечисленных задач ключевой проблемой, требующей первоочередного решения, является отсутствие требований к геомеханическому мониторингу отвалов на наклонном основании: не установлены механизм и схемы смещения отвальной массы, а также наиболее уязвимые участки отвалов, на которых высокий риск развития деформаций.

Основными причинами деформаций является то, что нагрузки и воздействия природного и техногенного характера, оказывающие влияние на устойчивость откосов отвалов, были недостаточно изучены либо не учтены при разработке проектной документации или в процессе эксплуатации сооружений.

1.2 Нагрузки и воздействия, влияющие на устойчивость отвалов

Долговременную устойчивость внешних и внутренних отвалов, определяют различные нагрузки и воздействия, которые можно разделить по подобию нагрузок, определенных строительными нормами [32]. Постоянными считаются нагрузки, которые действуют на сооружение постоянно (например, собственный вес сооружения), временные (вес технологического оборудования, температурные нагрузки и т.д.) и особые нагрузки (сейсмические природного и техногенного характера и т.д.), которые проявляются при определённых условиях (рисунок 1.11).

Различное сочетание нагрузок может привести к изменению напряженно-деформированного состояния и спровоцировать деформацию отвала. Устойчивость отвала определяется отношением удерживающих сил $F_{уд}$, действующих по наиболее напряженной поверхности скольжения, к сдвигающим силам $F_{сд}$ по этой же поверхности (рисунок 1.12).



Рисунок 1.11 – Нагрузки и воздействия, влияющие на напряженно-деформированное состояние отвалов

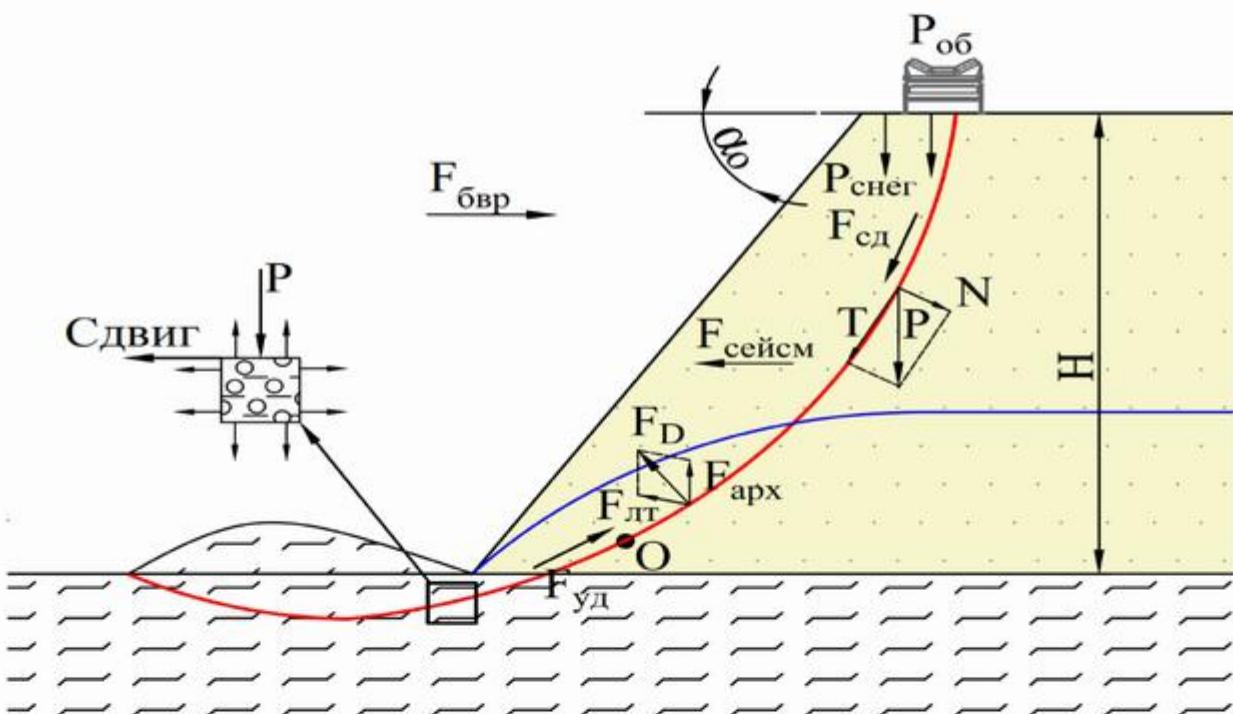


Рисунок 1.12 – Схема влияния нагрузок и воздействий на напряженно-деформируемое состояние откоса отвала

Сдвигающие силы ($F_{\text{сд}}$) действуют на участке призмы активного давления, где угол наклона поверхности скольжения α достигнет значение равное углу внутреннего трения пород ϕ .

Удерживающие силы ($F_{\text{уд}}$) действуют на участке призмы упора, где угол наклона поверхности скольжения α меньше угла внутреннего трения пород ϕ .

При равенстве сдвигающих и удерживающих сил ($F_{уд}=F_{сд}$) отвал находится в состоянии предельного равновесия. При незначительном увеличении сдвигающих сил (например, сил гравитации за счет увеличения высоты отвала) может произойти нарушение устойчивости сооружения.

Постоянна нагрузка от **собственного веса сооружения** (сила веса) определяется силами гравитации призмы возможного обрушения P , которая расположена выше наиболее напряженной поверхности скольжения и направлена вертикально вниз. Сила веса отвальных пород делится на касательную T и нормальную N составляющие.

При размещении на отвале технологического оборудования (автосамосвал, экскаватор, конвейер и др.) возникают **статические** (за счет веса оборудования) и **динамические** (работы выемочно-погрузочного оборудования, разгрузки автосамосвала) **нагрузки**. Установлено, что при вибрационных колебаниях оборудования угол внутреннего трения грунта не изменяется, снижение сопротивления сдвигу происходит вследствие уменьшения сжимающих или увеличения сдвигающих напряжений в период действия динамической нагрузки. При этом динамическая нагрузка превышает статическую ($P_{об}$) в несколько раз [33].

Водонасыщенность пород существенно снижает устойчивость отвала и определяется [34]:

- наличием в теле отвала безнапорного водоносного горизонта, который формируется за счет инфильтрации атмосферных осадков по площади отвала, подстилаемого относительным водоупором;
- наличием водоемов или водоносных пластов вблизи отвала.

Кроме этого, в основании отвала возможно залегание напорного водоносного пласта или грунтового (безнапорного) водоносного горизонта. При отсыпке отвалов естественный режим водоносных пластов существенно изменяется, и напоры подземных вод могут повышаться за счет изменений условий их питания и испарения по площади отвала, а также за счет изменений условий поверхностного стока в районе ведения горных работ.

Гидростатическое взвешивание и гидродинамическое давление явля-

ются векторными величинами. Гидростатическое взвешивание, проявляющееся архимедовыми силами $F_{\text{арх}}$, направлено по вертикали вверх (в направлении, противоположном направлению гравитационных сил). Гидродинамическое давление – объемная сила, ориентированная в каждой точке массива в направлении напорного градиента. Для оценки действия гидродинамических сил необходимо построение линий тока, ориентация которых зависит от фильтрационной неоднородности массива и распределения напоров на фиксированных границах [34].

Суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления проявляется как гидростатическое давление, распределенное по поверхности скольжения, по нормали к ней и изменяющее только нормальную составляющую; на касательную составляющую гидростатическое давление существенного влияния не оказывает [33, 35].

Деформации отвалов и их оснований следует оценивать в пределах эффективных напряжений, формирующихся за счет увеличения высоты отвала. Величину эффективных напряжений определяют с учетом гидростатического взвешивания пород отвала и его основания. Сжимаемыми следует считать породы, в которых под действием ожидаемых или реализованных эффективных напряжений возникает дополнительное поровое (избыточное над гидростатическим) давление [36]. Сжимаемыми являются водонасыщенные глинистые породы.

Сейсмическое воздействие $F_{\text{сейсм}}$ – это колебательное движение грунта, вызванное природными (землетрясения) факторами и вызывающее сдвиг сооружения. Сейсмическая сила действует в центре тяжести массива грунта и направлена горизонтально в сторону сдвига. Техногенные сейсмические воздействия (взрывы) действуют аналогично сейсмической силы природного происхождения.

Климатические воздействия оказывают существенное воздействие на напряженно-деформированное состояние отвалов. Количество атмосферных осадков, мощность снегового покрова и продолжительность его таяния влияют на питание водоносных горизонтов. Температурные воздействия с постоянными циклами замораживания и оттаивания, глубина сезонного промерзания пород вызывают морозное пучение, а затем осадку при оттаивании [37].

Таким образом, откос отвала находится под воздействием внутренних реактивных сил сопротивления и внешних нагрузок и воздействий, стремящихся вывести его из равновесия. Степень влияния активных сдвигающих нагрузок, в пределах которых допустимы отклонения фактических параметров ПТС "отвал-основание" от проектных, не установлена [38].

Но, даже если самым тщательным образом изучить все нагрузки и воздействия на откосы отвалов, возникновение деформаций полностью исключить невозможно, так как в процессе ведения горных работ под воздействием природных и техногенных факторов происходит изменение напряженно-деформированного состояния отвального массива. Избежать деформаций откосов отвалов позволяет управление их устойчивостью за счет мер реагирования, установленных по результатам геомеханического мониторинга. Данные геомеханического мониторинга сопоставляют с качественными и количественными критериями, характеризующими уровень геомеханического риска развития деформаций и на этой основе, прогнозируют устойчивость ПТС "отвал-основание".

1.3 Прогноз устойчивости откосов отвалов, расположенных на наклонном основании

Первый документ, который регламентировал действия по геомеханическому мониторингу за состоянием бортов, уступов и откосов отвалов - "Методические указания по производству маркшейдерских наблюдений за оползневыми явлениями на угольных карьерах" [39] был издан в 1955 году. Позднее, на основании изучения деформации бортов и отвалов, особенностей развития различных видов нарушений устойчивости, проведя многолетние испытания по исследованию физико-механических свойств отвальных массивов и их оснований, учеными института ВНИМИ и ВИОГЕМ была разработана "Инструкцию по наблюдениям за деформациями бортов..." (1971 г.) [40]. В 1987 году как дополнение к "Инструкции по наблюдениям за деформациями бортов..." [40] учеными ВНИМИ разработаны "Методические указания по наблю-

дениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости" [41]. Приведены схемы деформирования массивов горных пород в различных горно-геологических условиях, отличительные признаки различных типов деформаций и стадии развития оползня. Более подробно изложены требования к методике наблюдений, появились новые методы геомеханического мониторинга и применяемые приборы. Добавлен отдельный раздел, посвященный точности и периодичности наблюдений, даны рекомендации к конструкции реперов и закладке наблюдательных станций для контроля устойчивости бортов. При этом информация по геомеханическому мониторингу отвалов отсутствует.

В 2021 году вступили в силу ФНиП "Правила обеспечения устойчивости..." [2]. Пункт 52 вышеупомянутых "Правил обеспечения устойчивости..." [2] гласит, что в процессе эксплуатации объектов ведения открытых горных работ для своевременного выявления деформационных процессов и прогнозирования опасных ситуаций должен вестись комплекс наблюдений, включающий визуальные и инструментальные наблюдения за устойчивостью отвалов. При этом действующий в настоящий момент основной нормативный документ регламентирует требования только к точности инструментальных наблюдений. В "Методических указаниях по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов, уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов" [42] приведены пояснения к ФНиП "Правила обеспечения устойчивости..." [2]. Хотя документ содержит краткие сведения о методах геомеханического мониторинга и периодичности наблюдений за откосами отвалов, его практическая ценность ограничена из-за неконкретных и неясных рекомендаций по выбору конструкции наблюдательной станции и отсутствием обоснованных критериев оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании. Остальные моменты, касающиеся мониторинга отвалов, дублируют перечисленные ранее документы [39-41], которые ориентированы на работу с оптическими приборами или методами фотограмметрии.

Для проведения геомеханического мониторинга раньше применяли методы геометрического нивелирования II класса [43, 44], полигонометрии I разряда [45]. В настоящее время с целью сокращения объёмов полевых и камеральных работ осуществляется переход на альтернативные методы наблюдений. Спутниковое определение координат (GPS – или ГЛОНАСС – технологий) – это метод определения координат любой точки на поверхности Земли с использованием системы позиционирования спутниковых систем [46]. Многие специалисты и ученые делятся своим опытом использования метода спутникового определения координат для мониторинга различных объектов [47-54]. Главное преимущество метода – получение координат реперов наблюдательной станции в формате X, Y, Z и возможность установить смещения объекта наблюдений в плане и по высоте.

Для внедрения метода спутникового определения координат проведены одновременные измерения с применением полигонометрии 4-го класса, нивелирования IV-го класса. Сравнительный анализ измерений показал, что точность определения смещений практически совпадает, а вот переход к методу спутникового определения координат позволяет сократить затраты времени в 10-15 раз [46].

Метод лазерного сканирования позволяет получить 3D модель участка контролируемой местности. Смещение объектов определяется разностью поверхностей, полученных из нескольких серий наблюдений [51, 55-57]. Но без использования специальных марок смещения возможно определить только в трехмерном пространстве, без возможности установления горизонтальных и вертикальных деформаций.

Все более активное применение находят бесконтактные методы мониторинга, когда необходимы площадные наблюдения труднодоступных и опасных участков. Метод геомеханического мониторинга по результатам космических радарных съемок [58-61] позволяет установить смещения поверхности с точностью нескольких сантиметров. Для выполнения радарной интерферометрии не требуется установки специального оборудования и проведения полевых работ,

использование архивных космоснимков позволяет увидеть изменение объектов в определенный момент времени, но для получения надежных результатов интерферометрии необходимы контроль и калибровка с применением данных классических методов мониторинга [44, 49, 57-69].

Недостаток данного метода [70] заключается в том, что для полного интерферометрического мониторинга необходимо наличие твердой отражающей поверхности на наблюдаемом объекте. Например, отвалы вскрышных пород подвергаются самозастианию, а такие участки обладают низкой когерентностью между циклами измерений, поэтому результаты наблюдений могут быть недостоверны. Метод космического радарного интерферометрического мониторинга лучше использовать в комплексе с другими методами наблюдений, ввиду относительно малой изученности вопроса о влиянии внешних факторов на точность измерений.

Ю.И. Кантемиров также рекомендует использовать метода космической радарной интерферометрии как дополняющий и повышающий эффективность маркшейдерско-геодезических наблюдений [63]. Он приводит методику [64] перехода от интерферограмм к получению векторов смещения в форме трех составляющих (X , Y , Z), что очень важно для оценки состояния свежеотсыпанных отвалов, когда процесс уплотнения отвальной массы не завершился.

Современный способ ведения геомеханического мониторинга объектов – наземная радарная интерферометрия [71, 72]. После обработки отсканированных данных получается 3D модель наблюдаемого объекта с возможностью построения графиков изменения скорости смещения. Смещения объекта наблюдений показываются на цифровой модели в цветовом формате без возможности установить смещения в вертикальной и горизонтальной плоскости.

Пороговое значение скорости смещения, при котором прибор оповещает о возникновении деформаций, устанавливается исходя из наблюдений за бортом карьера "Железный" АО "Ковдорский ГОК" [73, 74] для различных стадий деформаций. При этом для отвалов вскрышных пород критериальные значения скорости смещения не установлены.

Геомеханический мониторинг отвалов с помощью аэрофотограмметрических измерений [5] позволяет создать цифровую модель объекта наблюдений. Поскольку этот способ обладает низкой точностью (0,1÷0,2 м по высоте и 0,2-0,3 м в плане), то его применение допустимо только для контроля макродеформаций и выявления новых опасных участков [75].

С точки зрения уменьшения экономической составляющей и времени производства работ, а также увеличения точности, целесообразно для геомеханического мониторинга использовать беспилотные авиационные системы (БАС) [76].

На ортофотопланах, выполненных БАС, возможно увидеть незначительные трещины и осьпи, которые проявляются даже под снеговым покровом. Данный вид мониторинга удобно применять в труднодоступных местах, на отвалах большой протяженности, а также в зимнее время года. Мониторинг с помощью БАС можно использовать для ведения упрощенных наблюдений (за трещинами и их раскрытием), как дополнение к инструментальным методам или визуальным наблюдениям [77, 78].

Один из неблагоприятных факторов, влияющих на устойчивость отвалов вскрытых пород, является формирование водоносных горизонтов в основании или теле отвала и образование избыточного порового давления. Большой вклад в изучение гидрогеомеханики техногенных массивов внесли ученые А.М. Гальперин, В.А. Мироненко, Ю.А. Норватов, В.В. Мосейкин, Ю.И. Кутепов, В.В. Ческидов [36, 79-86].

Возникающее под действием уплотняющих нагрузок избыточное поровое давление грунтов является переменной во времени величиной. Натурные измерения порового давления в отвалах вскрытых пород необходимы для оценки состояния водонасыщения и производятся при помощи стационарных датчиков и штанговых пьезодинамометров или комбинированных зондов [34, 79, 87, 88].

По результатам наблюдений за поровым давлением производят сравнение фактических величин с предельными значениями и при необходимости выпол-

няют оценку устойчивости отвала с учетом величины избыточного порового давления.

Большую популярность при ведении геомеханического мониторинга имеют геофизические методы, которые можно использовать для ведения гидро-геологического мониторинга и выявления аномальных зон. Общее число геофизических методов или модификаций превышает 100. По используемым физическим полям Земли геофизические методы исследований подразделяют на [89]: гравиметрические, магнитные, электромагнитные, сейсмические, ядерно-физические и термические.

Применительно к мониторингу состояния отвалов вскрышных пород возможно определить положение поверхности скольжения, а также выделить аномальные зоны (обводненные, образование пустот и др.) геофизическими методами сейморазведки и электроразведки. Электрическое зондирование позволяет определить положение слоев пластичной консистенции [90] в отвале и его основании, а сейморазведка – наличие водоносных горизонтов в верхней части породной толщи. Данные методы возможно использовать в комплексе с основными маркшейдерско-геодезическими и гидрогеологическими наблюдениями.

Проведённый обзор накопленного опыта выявил существенный дефицит обоснованных методик геомеханического мониторинга отвалов вскрышных пород и результатов наблюдений на фактических отвалах. Это обуславливает необходимость установления критериальных значений, позволяющих своевременно оценивать уровень геомеханического риска развития деформаций.

Каждый метод наблюдений при проведении геомеханического мониторинга позволяет установить характеристики массива, влияющие на его состояние и позволяющие учитывать их при оценке устойчивости ПТС "отвал-основание". При этом только метод маркшейдерско-геодезических наблюдений и спутникового определения координат дают возможность определять величину и скорость смещения массива в горизонтальной и вертикальной плоскостях, что для прогноза состояния отвалов является ключевым фактором.

Вместе с тем нужно понимать, что суждения об опасности смещения мас-

сива определяется правильно выбранной методикой проведения наблюдений, включающей следующие элементы:

- требования к точности;
- выбор контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей требуемую точность измерений;
- обоснование конструкции наблюдательной станции в соответствии с наиболее вероятной схемой деформирования отвального массива;
- выбор метода наблюдений;
- интерпретация результатов;
- обоснование критериальных показателей, определяющих уровень риска развития деформации и нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание";
- прогноз устойчивости ПТС "отвал-основание".

Появление высокопроизводительного оборудования, новых методов геомеханического мониторинга, а также отсутствие в нормативных и методических документах [1, 2, 39, 41, 42, 91] информации о механизмах деформирования отвальных массивов (в зависимости от наклона основания, типа пород отвала и грунтов основания) и требований к критериальным показателям прогноза устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном основании по результатам мониторинга ставит перед необходимостью обновления существующей методической базы по геомеханическому мониторингу отвалов.

1.4 Выводы, цель и задачи исследования

1. Отработка месторождений полезных ископаемых открытым способом сопровождается формированием отвалов вскрышных пород. В условиях высокой стоимости аренды земельных участков, ограничения их площади под размещение отвалов при значительном увеличении объёмов вскрышных пород, участились случаи оползней отвальных массивов, которые приводят к катастрофическим последствиям.

2. В вопросах геомеханического обоснования устойчивости при формиро-

вании отвалов на наклонном основании не установлен механизм смещения отвальной массы и участки отвалов с повышенным риском развития деформаций.

3. Под воздействием различных нагрузок и воздействий на откосах отвалов вскрышных пород развиваются деструктивные процессы. Диапазон допустимых значений активных сдвигающих нагрузок, в пределах которых фактические параметры ПТС "отвал-основание" могут отклоняться от проектных без угрозы потери устойчивости не установлены.

4. Отсутствие в нормативной документации четких требований к геомеханическому обоснованию устойчивости отвалов вскрышных пород, расположенных на наклонном слоистом основании, ставит нас перед необходимостью установления критериальных показателей, которые позволят прогнозировать уровень геомеханического риска на основе геомеханического мониторинга и разрабатывать меры реагирования.

Цель работы – геомеханическое обоснование устойчивости откосов отвалов, расположенных на наклонном основании, обеспечивающее повышение безопасности горных работ за счёт предотвращение деформаций на ранней стадии их проявления.

Идея работы заключается в использовании закономерностей деформационных процессов и взаимосвязанной с ними скорости смещения отвальной массы по контакту с наклонным основанием для обоснования критериев геомеханического риска, характеризующих устойчивость откосов отвалов.

Задачи исследований:

- определить механизм оползневых деформаций на основе типизации природно-технической системы "отвал-основание", анализа риска нарушения устойчивости и геомеханического мониторинга;
- установить влияние нагрузок и воздействий на устойчивость природно-технической системы "отвал-основание";
- обосновать критерии оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА СМЕЩЕНИЯ ОТВАЛЬНЫХ МАССИВОВ НА ОСНОВЕ ТИПИЗАЦИИ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "ОТВАЛ-ОСНОВАНИЕ", АНАЛИЗА РИСКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Опыт эксплуатации, а также геомеханический мониторинг отвалов вскрышных пород указывают на участившиеся случаи нарушения устойчивости этих сооружений [21, 24]. При этом есть многочисленные примеры, где ярусы отвала высотой до 90 м, расположенные на наклонном (до 15 градусов) основании, не имеют признаков деформаций (рисунок 2.1) и отвалы с высотой всего около 33 м на пологом (до 5 градусов) основании подвержены циклическим оползням (см. рисунок 1.9,в).

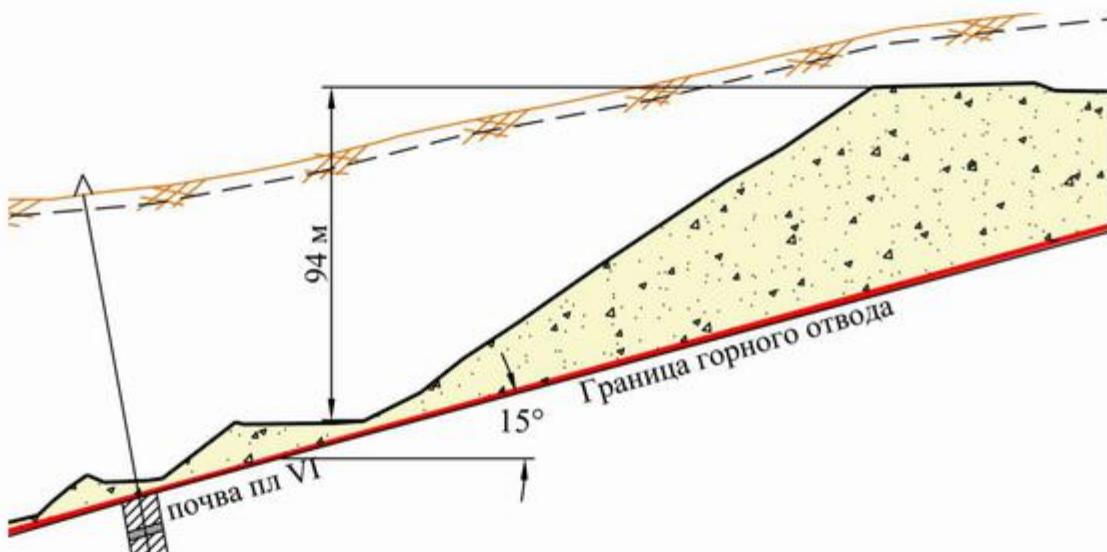


Рисунок 2.1 – Внутренний отвал на наклонном прочном основании

По исследованиям ряда ученых, специалистов [3, 6-9, 13] и автора [20, 22] характеристики основания оказывают большее влияние на устойчивость отвала, чем отвальная масса вскрышных пород. Поэтому при оценке устойчивости отвалов следует рассматривать напряженно-деформированное состояние природно-технической системы (ПТС) "отвал-основание". В этой связи актуальна задача по установлению схемы деформирования природно-технических систем (ПТС) "отвал-основание", так как от этого зависят виды мониторинга [10, 84], организация процедуры контроля, а также оценка состояния ПТС "отвал-основание".

2.1 Структуризация системы геомеханического мониторинга

Структуризация системы геомеханического мониторинга выполнена с применением концепции многослойной и многоэшелонной иерархической структуры [92]. Иерархическая структура представляет собой многоуровневую форму организации объектов, в которой объекты более низкого уровня подчиняются объектам более высокого уровня (рисунок 2.2).

1 УРОВЕНЬ – классификация ПТС "отвал-основание" (по типу пород отвальной массы и основания; по геоморфологическим условиям площадки под отвал).

2 УРОВЕНЬ – схемы деформирования. Разрабатываются по результатам типизации ПТС "отвал-основание" для каждого сочетания природных и техногенных условий формирования.

3 УРОВЕНЬ – конструкция наблюдательной станции (расположение профильных линий, опорных и рабочих реперов) выбирается в соответствии со схемой деформирования ПТС "отвал-основание".

4 УРОВЕНЬ – критериальные значения, т.е предельные значения количественных и качественных показателей состояния ПТС "отвал-основание", соответствующие допустимому уровню риска нарушения устойчивости.

5 УРОВЕНЬ – методика наблюдений включает методы, периодичность и точность наблюдений, средства измерений (контрольно-измерительную аппаратуру), интерпретацию результатов наблюдений.

6 УРОВЕНЬ включает в себя сопоставление результатов наблюдений с критериальными показателями, определяющими уровень риска развития деформации и нарушения устойчивости.

Для типизации ПТС "отвал-основание" по условия формирования, влияющим на её устойчивость, анализа всех возможных вариантов сочетания типа отвала и его основания и оценки условий, при которых существует высокий риск развития деформаций и нарушения устойчивости откосного сооружения в качестве научного метода системной структуризации воспользуемся системным

анализом. Идея метода системного анализа заключается в расчленении сложной проблемы на подпроблемы, этапы до определенного уровня, используя признаки типизации, т.е. построение иерархической схемы, упрощающей процедуру анализа сложной проблемы.



Рисунок 2.2 – Иерархическая структура системы геомеханического мониторинга природно-технической системы "отвал-основание"

Приняв за нулевой уровень главную цель – управление устойчивостью ПТС "отвал-основание", декомпозируем ее на три вида отвальной массы: I – скальные породы (среднее значение временного сопротивления сжатию $R_c=50-120$ МПа), II – смесь песчано-глинистых и скальных пород ($R_c=15-50$ Мпа); III – глинистые породы ($R_c<1$ Мпа) [27].

В свою очередь для каждого вида отвальной массы выделим четыре группы по типу пород основания (второй уровень иерархической схемы), сопротивление сдвигу которых способствует удержанию гравитационных сил либо увеличению тангенциальных сил, приводящих к смещению отвальной массы, и определяют положение поверхности скольжения по слабому контакту или слабому основанию отвала [2]:

- А. Прочное (скальные, полускальные и песчано-гравийные породы, сопротивление сдвигу которых не ниже, чем у отвальной массы);
- Б. Слабое (слой, мощностью более 2 м, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы);
- В. Слабый контакт (слой, мощностью не более 2 м, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы);
- Г. Земная поверхность, подработанная подземными горными работами.

Опыт формирования отвалов [93] и исследование причин их деформаций показали, что отвалы, расположенные на наклонном основании, когда угол внутреннего трения основания ϕ' больше угла его наклона β сохраняют устойчивость при большой высоте. Например, на разрезе "С" ярус внутреннего отвала из смеси скальных (85%) и песчано-глинистых (15%) пород достигает высоты 94 м (см. рисунок 2.1). Отвал сформирован на почве пласта VI, которая сложена алевролитами. Угол наклона основания 15° , угол внутреннего трения по контакту "отвал-основание" – 22° . Проверочными расчетами установлено, что устойчивость отдельных ярусов и отвала на полную высоту обеспечивается с коэффициентом устойчивости больше нормативного значения – 1,2.

Под влиянием внешних нагрузок и воздействий сопротивление сдвигу пород основания в процессе его эксплуатации уменьшается. В этом случае, при достижении условия – $\phi' \leq \beta$ априори без разработки противодеформационных мероприятий устойчивость отвала не будет обеспечена. Вследствие этого, при типизации ПТС "отвал-основание" (третий уровень иерархической схемы) сле-

дует выделить два условия: угол внутреннего трения пород основания ϕ' больше (1) либо меньше (2) угла его наклона β .

В свою очередь характеристики пород основания отвалов подвержены воздействию группы факторов (четвертый уровень иерархической схемы), оказывающих как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивость – это морфология естественного (с - склон или л - лог) и техногенного (мульда сдвижения при подработке поверхности подземными горными работами (рисунок 2.3) рельефа земной поверхности.

Иерархическая схема типизации ПТС "отвал-основание" (рисунок 2.4), построенная методом системного анализа, отражает 42 варианта возможных сочетаний условий, определяющих состояние отвала вскрышных пород в части его устойчивости.

Условные обозначения к рисунку 2.4 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Условные обозначения к рисунку 2.4

Признак типализации	Обозначения на иерархической схеме			
Тип отвальной массы	I – скальные породы ($R_c=50-120$ МПа)	II – смесь песчано-глинистых и скальных пород ($R_c=15-50$ МПа)	III – глинистые породы ($R_c < 1$ МПа)	
Тип основания отвала	A. прочное	B. слабое	V. слабый контакт	Г. подработанная земная поверхность
Соотношение угол наклона β основания отвала сопротивлению сдвигу по подошве отвала ϕ'		1. $\beta < \phi'$		2. $\beta > \phi'$
Направление откоса отвала относительно вектора максимального оседания η_{max} мульды сдвижения	3. "+" - от вектора η_{max}		4. "-" - к вектору η_{max}	η_{max} – вектор максимального оседания мульды сдвижения земной поверхности при подработке
Морфология рельефа основания		c. склон		l. тальвег лога

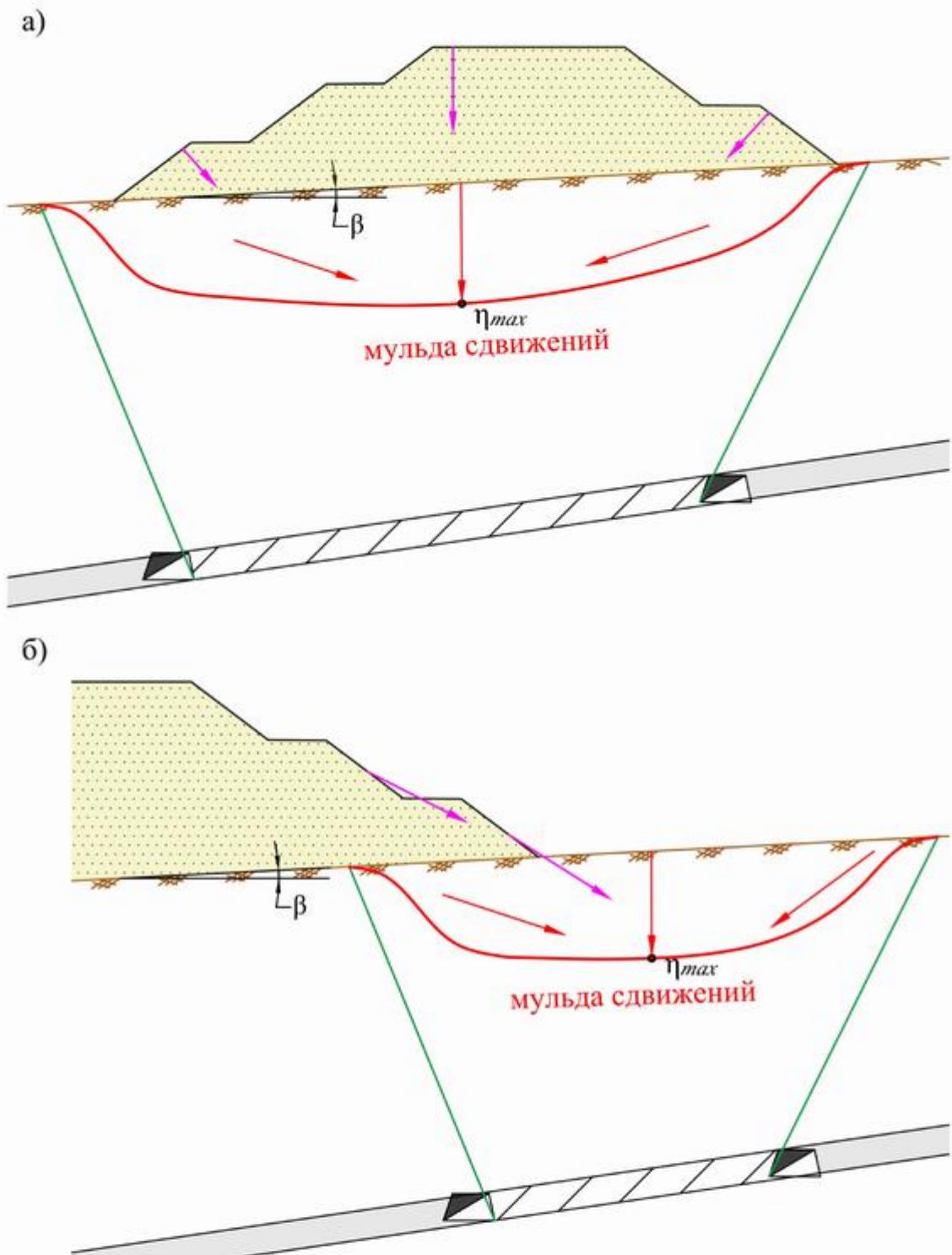


Рисунок 2.3 – Схема расположения отвалов вскрышных пород на подработанной подземными горными работами территории:

а) откос отвала не совпадает с направлением вектора максимального оседания земной поверхности; б) откос отвала совпадает с направлением вектора

Условные обозначения:

- граница зоны влияния подземных горных выработок;
 - направление смещения отвала;
 - направление смещения земной поверхности;
 - η_{max} — вектор максимального оседания мульды сдвижения земной поверхности

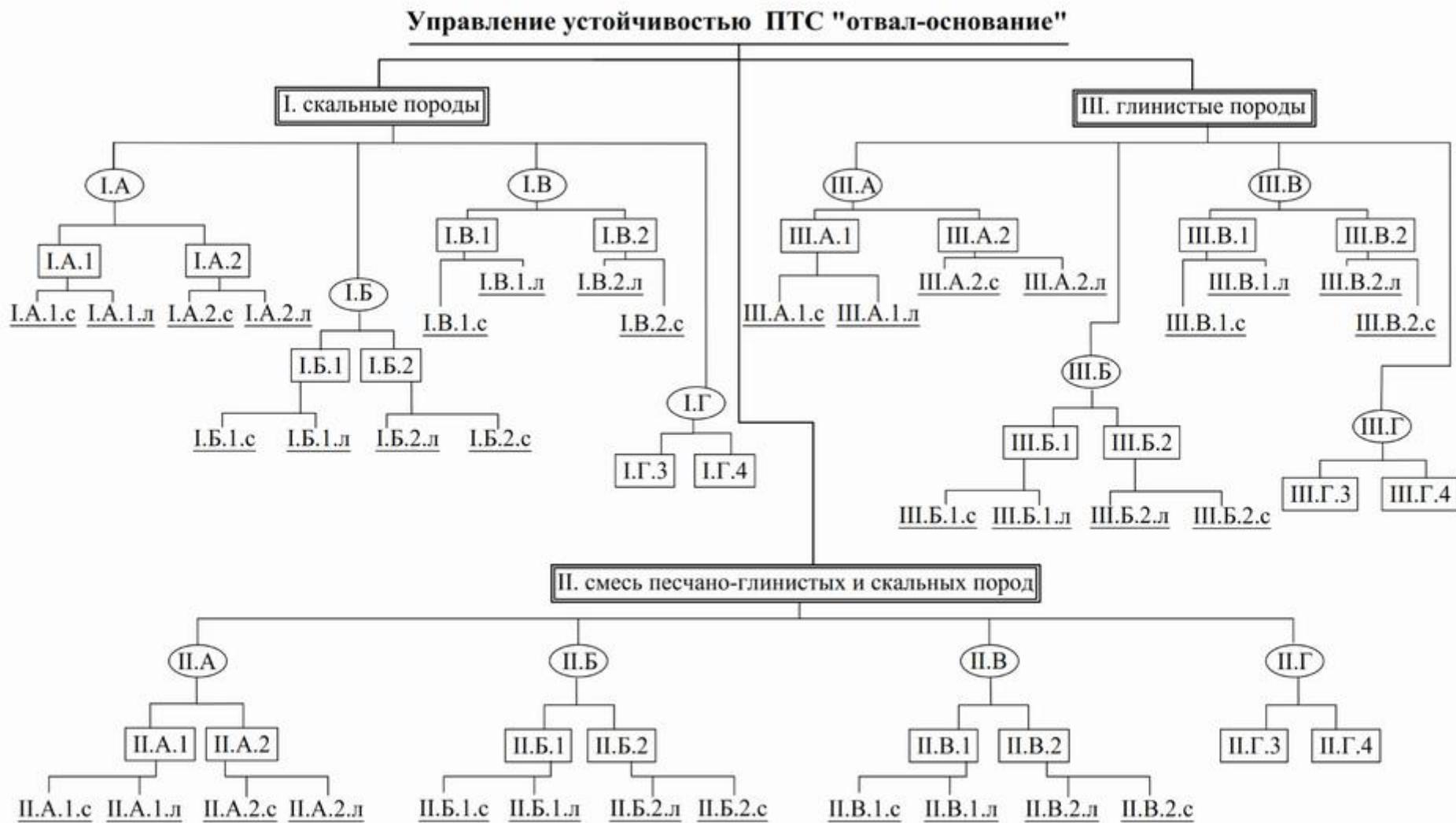


Рисунок 2.4 – Иерархическая схема типизации природно-технической системы "отвал-основание" по условиям формирования, влияющим на устойчивость

2.2 Механизмы и схемы деформирования природно-технических систем "отвал-основание"

Логический анализ иерархической схемы (см. рисунок 2.4) позволяет перейти к вероятным схемам деформирования ПТС "отвал-основание" для установления сценариев развития деформаций и их вероятностей.

В настоящее время в практике используются следующие методы анализа риска развития деформаций и возникновения аварии [94]: "Что будет, если ...?" ("What - if?"); "Проверочный лист" ("Check List"); "Анализ вида и последствий отказов" (Failure Mode and Effects Analysis – "FMEA"); "Анализ вида, последствий и критичности отказов" (Failure Mode, Effects and Critical Analysis – "FMECA"); "Анализ дерева отказов" (Fault Tree Analysis – "FTA"); "Анализ дерева событий" (Event Tree Analysis – "ETA"); "Анализ барьеров безопасности"; "Анализ опасности и работоспособности технологической системы" (Hazard and Operability Study – "HAZOP"); "Количественная оценка риска аварий" (Quantitative Risk Assessment – "QRA").

Для установления алгоритма последующих событий, исходящих из основного (деформация ПТС "отвал-основание") как наиболее подходящий из вышеизложенных выбран количественный или полуколичественный метод "Анализ дерева событий" (Event Tree Analysis – "ETA").

В нашем случае за начальное событие принимается превышение качественных показателей уровня опасности 0 – появление крупных (больше 10 см) продольных трещин, заколов. Частота каждого сценария развития деформации ПТС "отвал-основание" рассчитывается путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события [94].

"Дерево событий" с количественной оценкой вероятности реализации каждой из ветвей развития деформации ПТС "отвал-основание" приведено на рисунке 2.5.

Интеграцией иерархической схемы ПТС "отвал-основание" и результатов анализа риска "Анализ дерева событий" (Event Tree Analysis – "ETA") установлено, что в зависимости от природных и техногенных условий фор-

мирования отвалов развитие деформации может произойти по одной из шести схем [17, 35, 93] (таблица 2.2).



Рисунок 2.5 – "Дерево событий" развития деформации природно-технической системы "отвал-основание"

Анализ причин оползней отвалов вскрышных пород позволил определить (см. рисунок 1.10), что механизм смещения отвальных массивов на 70% определяется показателем F , представляющим отношение наклона основания β к сопротивлению сдвига по подошве отвала ϕ' . При $F < 0,7$, вследствие уплотнения отвальной массы, происходит просадка поверхности отвала с одновременным выполнаживанием откоса. При $F = 0,7$ возникают локальные деформации нижних ярусов отвала в форме вращательного сдвига или просадки со сдвигом вдоль контакта до угла устойчивого откоса – деформации в этом случае не представляют опасности для всего отвального массива.

Таблица 2.2 – Схемы деформирования природно-технической системы "отвал-основание"

Номер схемы	Индекс ПТС "отвал-снование" (см. рис. 2.4)	Механизм и схема деформирования
1	I.A.1, I.A.2, II.A.1, I.B.1, I.B.2, II.B.1, III.A.1, III.B.1, I.G.3, II.G.3, III.G.3	Просадка в результате уплотнения, $F < 0,7$
2	II.A.1, II.B.1, III.A.1, III.B.1	Вращательный сдвиг, $F = 0,7$
3	III.A.2, III.B.2, I.G.4, III.G.4	Просадка со сдвигом вдоль контакта, $F = 0,7$
4	II.A.2, II.B.2, II.G.4	Вращательно-плоский сдвиг, $F > 0,7$

5	I.Б.1, II.Б.1, III.Б.1	<p>Вращение с выпором, $F > 0,7$</p>
6	I.Б.2, II.Б.2, III.Б.2	<p>Вращательно-плоский сдвиг с выпором, $F > 0,7$</p>

Условные обозначения:

– отвальная масса;

– слабые (глинистые и суглинистые) породы основания;

a – ширина призмы возможного обрушения;

S – зона сдвига;

h – глубина погружения поверхности скольжения в слабый слой;

ϕ – угол внутреннего трения пород;

$$a = (0,2-0,4)H$$

$$a = (0,3-0,8)H$$

$$a = (0,3-0,8)(H+h)$$

$$S = 2(H+h)$$

$$S = 1,5H$$

$$S = 2H$$

$$b = 2h \operatorname{ctg} \phi$$

$$\varepsilon = 45^\circ - \phi/2$$

– контур отвала;

– поверхность скольжения;

– направление смещения отвала;

– направление смещения пород основания отвала;

b – ширина вала выпирания;

H – высота отвала;

ε – угол между направлением наибольшего главного напряжения и площадкой скольжения;

Расчетные формулы для схем деформирования:

2

3 и 4

5 и 6

Вследствие водонасыщения пород основания, происходит снижение сопротивлению сдвигу по подошве отвала, в этом случае деформации представляют опасность для всего отвала. В зависимости от типа пород основа-

ния, их мощности и угла наклона основания возможно деформирования откосов отвала по следующим схемам:

- вращательно плоский сдвиг (слабое основание мощностью меньше 2 м, наклон основания до 5°);
- вращение с выпором (слабое основание мощностью больше 2 м, наклон основания до 5°);
- вращательно-плоский сдвиг с выпором (слабое основание мощностью больше 2 м, наклон основания больше 5°).

Значения показателя F и условия (индексы ПТС "отвал-основание"), при которых существует риск нарушения устойчивости отвалов, приведены в таблице 2.2.

Схема 1: механизм деформирования в виде просадки в результате уплотнения отвальных пород характерен для всех типов (**I, II, III**) отвальных пород при отсыпке на прочное основание (**A**) и слабый контакт (**B**) и расположении отвала на подработанной территории, когда направление откоса отвала не совпадает (**3**) с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения (см. рисунок 2.3,а).

В результате уплотнения отвальных пород происходит просадка горизонтальных площадок, величина просадки в зависимости от гранулометрического состава отвальной массы, ее мощности и условий формирования составляет 7-10 % от высоты отвала. Одновременно происходит выполаживание откоса на $4-6^\circ$ до устойчивого угла в зависимости от времени стояния откоса без обновления [95].

Схема 2: механизм деформирования вращательный сдвиг (криволинейная поверхность скольжения формируется полностью в породах нарушенного сложения тела отвала, большей частью по контакту слабых и прочных отвальных пород) характерен для песчано-глинистых (**III**) и смеси песчано-глинистых и скальных пород (**II**), при отсыпке на прочное основание (**A**) и слабый контакт (**B**), когда сопротивление сдвигу по подошве отвала ϕ' больше угла наклона β основания отвала (**1**).

Деформации по схеме 2 относятся к оползням надподошвенного типа, которые характерны для отвалов, сложенных слабыми увлажненными породами, при переслаивании сухих и влажных, слабых и прочных пород, а также при наличии в теле отвала захороненного снега. Активизация смещений здесь происходит в период снеготаяния и ливневых дождей.

Схема 3: механизм деформирования в виде просадки со сдвигом вдоль контакта (в верхней части происходит просадка отвальной массы в пределах призмы возможного обрушения, в последующем призма обрушения отрывается от основного массива и смещается по слабому контакту "отвал – основание") характерен для песчано-глинистых пород (**III**) при отсыпке на прочное основание (**A**) или слабый контакт (**B**), когда в процессе эксплуатации сопротивление сдвигу по подошве отвала ϕ' становится меньше угла наклона β основания отвала (**2**), а также для отвалов скальных (**I**) и песчано-глинистых пород (**III**) при размещении на подработанной территории (**Г**), когда направление откоса отвала совпадает с направлением вектора максимального оседания (**4**) мульды сдвижения.

Схема 4: механизм деформирования вращательно-плоский сдвиг (в верхней части поверхность скольжения проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней – по слабому контакту "отвал – основание") характерен для смеси песчано-глинистых и скальных пород (**II**) при отсыпке на прочное основание (**A**) или слабый контакт (**B**), когда в процессе эксплуатации сопротивление сдвигу по подошве отвала ϕ' становится меньше угла наклона β основания отвала (**2**), и при размещении на подработанной территории (**Г**), когда направление откоса отвала совпадает (**4**) с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения.

Схема 5: механизм деформирования вращение с выпором (плавная криволинейная поверхность скольжения в верхней части проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней – в слабых породах основания большой мощности) характерен для всех типов пород (**I**, **II**, **III**) при отсыпке на слабое горизонтальное основание (**Б**) большой мощ-

ности, когда сопротивления сдвигу по подошве отвала ϕ' больше угла наклона β (1) основания.

Схема 6: механизм деформирования вращательно-плоский сдвиг с выпором (плавная криволинейная поверхность скольжения в верхней части проходит в теле отвала по контакту слабых и прочных отвальных пород, в нижней – в слабых породах основания большой мощности со сдвигом вдоль подошвы) характерен для всех типов пород (I, II, III) при отсыпке на наклонное основание, сложенное слабыми породами (Б) большой мощности, когда в процессе эксплуатации сопротивление сдвигу по контакту с основанием ϕ' становится меньше угла наклона β (2) основания.

2.3 Экспериментальные исследования влияния рельефа основания отвала на динамику развития деструктивных процессов

Анализ эксплуатируемых отвалов вскрышных пород показывает, что наиболее уязвимым является участок, формируемый в тальвеге лога, где заливают текучепластичные дисперсные грунты, а также происходит интеграция потоков воды в паводковый период. Таким образом, наличие в основании отвала слоя с низкими характеристиками сопротивления сдвигу и увеличение внешних сдвигающих нагрузок на призму упора за счет потоков воды по тальвегу лога в период паводка и половодья оказывают неблагоприятное воздействие на устойчивость ПТС "отвал-основание". Рассуждения относительно влияния рельефа основания на устойчивость сооружения основаны на экспериментальных наблюдениях за несколькими объектами, в частности данные геомеханического мониторинга, проводимого автором в 2015 – 2017 гг. на внешнем отвале разреза "З"¹ приведены на рисунке 2.6.

В отвал складировалась отвальная масса песчано-глинистых и скальных пород (тип отвальной массы – II). Основанием отвала являлся естественный рельеф земной поверхности, сложенный суглинками и глинами

¹ Процесс деформирования отвала подробно приведен в параграфе 1.1 (см. рис 1.2 – 1.4).

различной консистенции (**Б**). Угол наклона основания ($\beta = 5^\circ$) близкий к значению сопротивления сдвигу по контакту – ($\phi' = 6^\circ$). Основание отвала представлено двумя глубокими оврагами. Индекс ПТС "отвал-основание" по условиям формирования – **П. Б. 1. л** (см. рисунок 2.4). Наиболее вероятная схема деформирования ПТС "отвал-основание" (см. таблицу 2.2) – **5** (вращение с выпором).

Для контроля состояния внешнего отвала на теле оползня и недеформированной части отвала в мае 2015 была заложена маркшейдерская наблюдательная станция. Рабочие реперы наблюдательной станции на недеформированной части отвала расположили по тальвегу лога и на склонах (рисунок 2.7)²:

- по логу (профильная линия 2: реперы 2-2, 2-3, 2-5, 2-6, 2-8, 2-10; скв.3);
- на склонах (профильная линия 3, реперы: 3-2, 3-3, 3-5; профильная линия 1, реперы 1-1 и 1-2 и профильная линия 2: репер 2-1; скв.4);
- в основании отвала (2-11, 3-11).

Анализ пространственно-временного изменения положения ПТС "отвал-основание" по результатам инструментальных наблюдений позволил установить схему и механизм, а также динамику развития деформации: первоначально были зафиксированы смещения вверх и в сторону откоса по реперам: 2-11 и 3-11, расположенным у подошвы отвала, что привело к формированию вала выпирания в нижней части отвала. Через месяц началось смещение отвальной массы вдоль тальвега лога (векторы реперов: 2-3, 2-8, скв.3), в последнюю очередь пришли в активное движение реперы (2-1, 3-2, 3-3, 3-5, 1-2, 1-1, скв.4), установленные на склонах. Векторы этих реперов были ориентированы в сторону тальвега и достигли максимальных величин в плане и по высоте (по реперам 3-2 и 3-3 оседания составили 1577 и 1084 мм, горизонтальные векторы смещений – 267 и 190 мм соответственно).

² План недеформированной части внешнего отвала разреза "З" с положением векторов смещений, построенных по результатам инструментальных наблюдений за период май 2015 – ноябрь 2017.

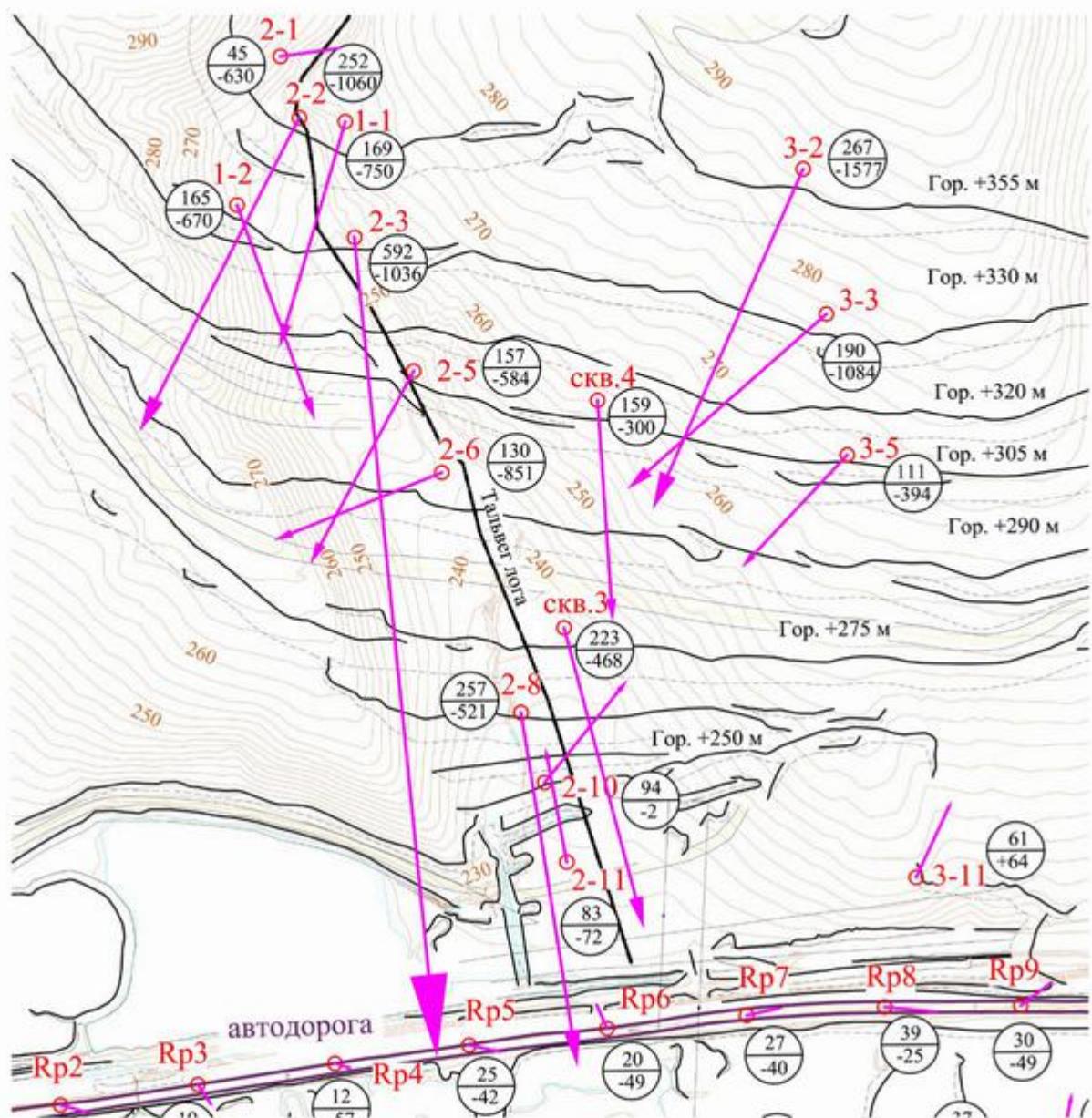


Рисунок 2.6 – План внешнего отвала разреза "3" с положением векторов смещений
Условные обозначения:

— вектор и суммарное плановое смещение за период май 2015 – ноябрь 2017

скв.5 — гидрогеомеханическая скважина, используемая в качестве рабочего репера

— изолинии естественного рельефа



— суммарное смещение репера за период: май 2015 – ноябрь 2017 (в числителе – плановое; в знаменателе – высотное);



— рабочий репер наблюдательной станции



— фактическое положение отвала

Приведенный пример, а также другие экспериментальные исследования, проведённые автором с использованием высокоточных инструментов Topcon GR-5 и Leica GS14 по ряду горных предприятий Кузбасса, позволили

установить, что наиболее активное смещения отвальной массы происходили в пониженных участках рельефа (тальвегах логов).

При этом смещение со склонов происходило в сторону тальвега, затем весь массив смещался вдоль тальвега лога. За счет увеличения веса и нарастающей кинетической энергии отвальная масса перемещалась по тальвегу лога до упора в противоположный склон рельефа. Сдвиговые деформации ПТС "отвал-основание" вдоль контакта происходили при превышении критического значения показателя F ($F > 0,70$). По мере увеличения F начинался процесс вращательного смещения с выпором. При достижении $F=1,0$ происходило нарушение устойчивости отвала.

2.4 Выводы по главе 2

1. Впервые разработана идеально-знаковая модель природно-технической системы (ПТС) "отвал-основание" (рисунок 2.4), структурированная методом системного анализа и адекватно отражающая 42 возможных варианта условий формирования отвалов вскрышных пород, описываемая следующими признаками: тип отвальной массы; тип основания отвала; соотношение угла наклона основания сопротивлению сдвигу; направление откоса отвала относительно вектора максимального оседания при подработке отвала; форма рельефа местности.

2. На основании анализа риска развития деформаций природно-технических систем "отвал-основание" методом "Анализ дерева событий" (Event Tree Analysis – "ETA") установлены возможные сценарии деформаций и их вероятности (рисунок 2.5). Для каждого сценария (результатирующего события), с учетом природных и техногенных условий (тип отвальной массы и основания, угол наклона основания и т.д.), разработаны механизмы и схемы деформирования природно-технической системы "отвал-основание" (таблица 2.2).

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что наиболее активное смещения отвальной массы (с максимальными величинами в плане) происходит в пониженных участках рельефа (тальвегах логов) – стадия

управляемых деформаций. Далее отвальная масса смещается со склонов в сторону тальвега лога – стадия неуправляемых деформаций, когда происходит нарушение устойчивости откосов отвалов. При этом сдвиговые деформации вдоль контакта возникают при отношении наклона основания к сопротивлению сдвига (обозначаемые показателем F) больше 0,7, с увеличением показателя F начинается вращательное смещение с выпором, при $F = 1$ происходит оползень отвала.

Решение первой научной задачи по установлению механизма и схем деформирования отвальных массивов на основе типизации природно-технических систем "отвал-основание", анализа риска развития деформаций и геомеханического мониторинга позволяет перейти к исследованию диапазона допустимых значений нагрузок и воздействий, в пределах которых фактические параметры ПТС "отвал-основание" могут отклоняться от проектных без угрозы потери устойчивости отвалов.

3 УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ "ОТВАЛ-ОСНОВАНИЕ"

3.1 Алгоритм оценки устойчивости природно-технических систем "отвал-основание"

Природно-технические системы "отвал-основание" изменяются в пространстве и во времени и, соответственно, изменяется их объемное напряженное состояние. Под воздействием различных неблагоприятных факторов [96] система может перейти в предельное напряженно-деформированное состояние и в этом случае происходит деформация ПТС "отвал-основание".

Расчет устойчивости откосов выполняют в аналитическом [35] либо графоаналитическом виде [96] методом итерации. Универсальным методом оценки напряженно-деформированного состояния ПТС "отвал-основание" является метод векторного сложения сил [2], позволяющий учитывать контакт отвала с основанием, по которому сопротивление сдвигу значительно меньше, чем по другим направлениям, поэтому этот метод дает более надежные результаты и применяется для всех типов основания отвалов. В этой связи, для исследования влияния нагрузок и воздействий на устойчивость откосов ПТС "отвал-основание" принят метод векторного сложения сил (рисунок 3.1).

Призма обрушения ПТС "отвал-основание" находится под воздействием внутренних сил: Cl_i , $C'l_i$ и Cl_{i-i+1} – сцепления, которые направлены вдоль соответствующих границ блоков; R_i и R_{i-i+1} - реакции блоков - равнодействующая сил трения и нормальной составляющей веса, отклоняются от нормали к границам блоков на угол ϕ . Нагрузки и воздействия, стремящиеся вывести сооружение из равновесия: P_i и P^{ob} – силы гравитации (вес блока) и удельная нагрузка от оборудования, направленные вертикально вниз; D_i и D_{i-i+1} – силы гидростатического давления по границам блоков, направленные по нормали к поверхности скольжения; Q – сейсмическая сила, действую-

ющая в центре тяжести массива грунта, и направлена горизонтально в сторону откоса (в наиболее неблагоприятном случае).

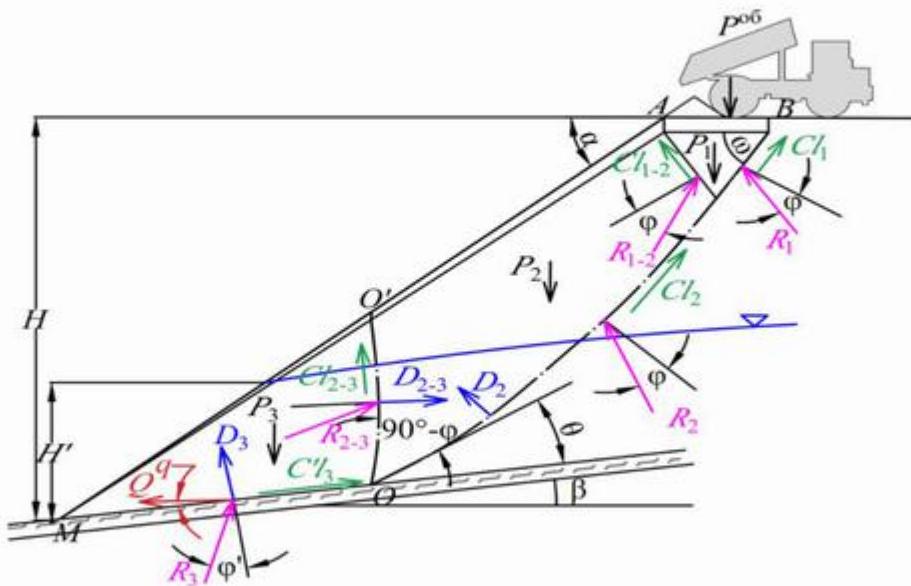


Рисунок 3.1 – Схема к расчету устойчивости откоса ПТС "отвал-основание" методом векторного сложения сил [2]: α – результирующий угол отвала; β – угол наклона основания; ω – угол наклона поверхности скольжения в верхней части; θ – угол излома поверхности скольжения в точке, где выполняется условие специального предельного равновесия; H и H' – высота отвала и техногенного водоносного горизонта в теле отвала; D_i – сила гидростатического давления; P_i и $P^{\text{об}}$ – силы гравитации веса блока и удельная нагрузка от оборудования; Cl_i , $C'l_i$ – силы сцепления; R_i – реакции блоков; ϕ – угол внутреннего трения; Q_i – сейсмическая сила; q – угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы

Любой отвал характеризуется определенными параметрами (H – высота, α – результирующий угол, β – угол наклона основания), физико-механическими свойствами отвальной массы (C – сцепление, МПа; ϕ – угол внутреннего трения, град.; γ – плотность, $\text{т}/\text{м}^3$), сопротивлением сдвигу по контакту с основанием (C' – сцепление, МПа; ϕ' – угол внутреннего трения, град) и находится под влиянием внешних воздействий (сейсмических, гидростатических, гидродинамических) и нагрузок (гравитационных, тангенциальных), представляющих активные сдвигающие силы и препятствующие им внутренние реактивные силы (сцепление, трение, сопротивление сдвигу).

Соотношение сил, действующих на откос, при решении задачи в гра-фоаналитическом виде выражается невязкой многоугольника сил ΔF , вычисляемой при двух различных коэффициентах запаса устойчивости, вводимых в прочностные характеристики пород. Определяется коэффициент запаса

устойчивости при $\Delta F=0$ и сравнивается с нормативным значением. При отличии от нормативного в пределах 5% ($\pm 0,05$), процедуру завершают и считают, что состояние равновесия откоса обеспечивается с коэффициентом запаса, соответствующим нормативному значению. В противном случае (при $\Delta F \neq 0$), изменяют измеряемые показатели или разрабатывают определенные мероприятия, повышающие реактивные силы: частичное или полное удаление пород слабого слоя или контакта без замещения или с замещением прочными неразмокаемыми скальными породами; создание в основании отвала призмы упора из скальных пород; террасирование основания; механическое рыхление пород основания путем замены лопаты экскаватора на механизированный орган шнекового, дробящего или скребкового типа; взрывное нарушение слабых контактов в основании отвала; организация дренажа.

Геомеханическую оценку соотношения активных и реактивных сил, действующих на откос отвала, выполняют методом итерации с учетом мероприятий до выполнения условия – $\Delta F=0$ при нормативном коэффициенте запаса устойчивости для реальной ПТС "отвал-основание".

Алгоритм расчета коэффициенту устойчивости откосов ПТС "отвал-основание" методом векторного сложения сил в графоаналитическом виде приведен на рисунок 3.2.

При определенных параметрах отвала коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" оценивается измеряемыми показателями: физико-механические свойства отвальной массы (сцепление – C , угол внутреннего трения – ϕ , плотность – γ) и характеристики сопротивления сдвигу пород основания отвала (сцепление – C' , угол внутреннего трения – ϕ'), полученными по результатам инженерно-геологических изысканий; угол наклона основания – β ; нагрузка от оборудования – $P^{об}$; гидростатическое давление – D , которое представляет собой суммарное влияние гидростатического взвешивания $D_{взв}$ и гидродинамического давления $D_{гдн}$ и выражается коэффициентом обводнения k ; сейсмическая нагрузка от землетрясений – Q (при вероятности возможного превышения интенсивности землетрясений в течение 50 лет – 10%).

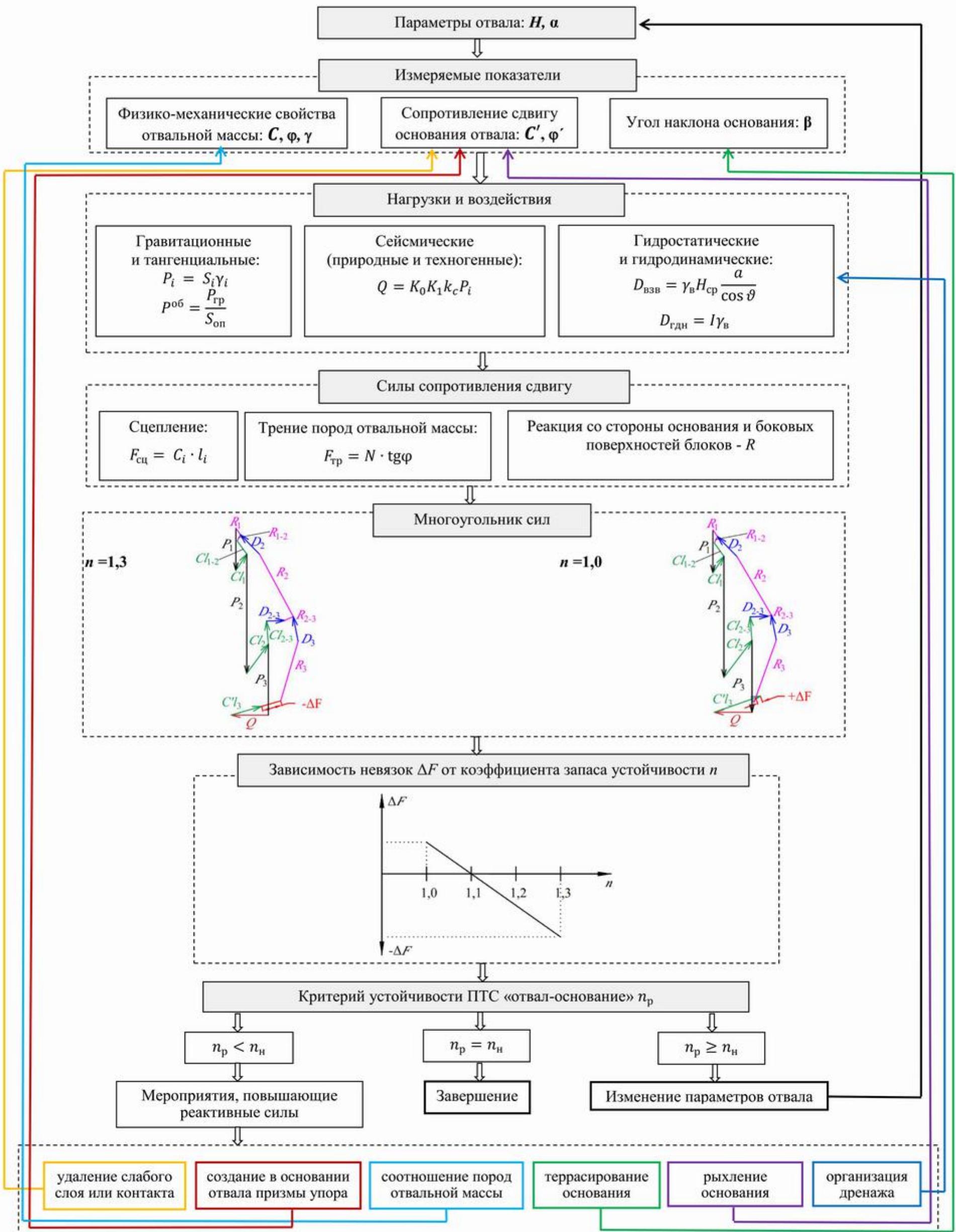


Рисунок 3.2 – Алгоритм оценки устойчивости ПТС "отвал-основание"

P_i – вес рассматриваемого блока, т/м; S_i – площадь блока, м²; γ – плотность, т/м³; $P_{\text{об}}$ – удельная нагрузка от оборудования, МПа; $P_{\text{гр}}$ – общий вес оборудования, т; $S_{\text{оп}}$ – площадь опоры оборудования, м²; Q_i – сейсмическая сила, мН; K_0 и K_1 – коэффициенты, учитывающие назначение сооружения (его ответственность) и допускаемые повреждения сооружений; k_c – коэффициент сейсмичности; $D_{\text{взв}}$ – гидростатическое взвешивание, мН; γ_b – удельный вес воды, т/м³; $H_{\text{ср}}$ – средний напор грунтовых вод в пределах расчетного блока, м; a и ϑ – соответственно ширина (м) и средний угол наклона (град) касательной к поверхности скольжения; $D_{\text{гдн}}$ – гидродинамическое давление, мН; I – напорный градиент.

3.2 Определение нагрузок и воздействий, влияющих на устойчивость природно-технических систем "отвал-основание"

Суммарное действие активных сдвигающих и препятствующих им внутренних реактивных сил сопротивления, определяющих устойчивость откосов природно-технической системы "отвал-основание", оценивается основным критерием – расчетным коэффициентом устойчивости n_p [97] и выражается функцией вида:

$$n_p = F(C, \varphi, \gamma, C', \varphi', H, \alpha, \beta, P^{ob}, k, Q), \quad (3.1)$$

Выразим результативный показатель n_p через измеренные значения аргументов и их приращения (3.2): C и Δ_C – сцепление, φ и Δ_φ – угол внутреннего трения, γ и Δ_γ – плотность отвальных пород; C' и $\Delta_{C'}$ – сцепление и φ' и $\Delta_{\varphi'}$ – угол внутреннего трения по контакту подошвы отвала с основанием; H и Δ_H – высота, α и Δ_α – результирующий угол отвала; β и Δ_β – угол наклона основания; P^{ob} и $\Delta_{P^{ob}}$ – удельная нагрузка от оборудования; k и Δ_k – коэффициент обводнения; Q и Δ_Q – сейсмические нагрузки ПТС "отвал-основание".

В результате преобразований выражения (3.1), установлено, что приращение результативного показателя (допустимое отклонение расчетного коэффициента устойчивости от нормативного значения) обуславливается приращениями аргументов (3.2).

$$\Delta_{n_p} = F(\Delta_C + \Delta_\varphi + \Delta_\gamma + \Delta_{C'} + \Delta_{\varphi'} + \Delta_H + \Delta_\alpha + \Delta_\beta + \Delta_{P^{ob}} + \Delta_k + \Delta_Q). \quad (3.2)$$

В качестве приращения коэффициента запаса устойчивости n_p примем допустимое отклонение от его нормативного значения $\Delta_{n_p} = 0,05$ [98].

3.3 Моделирование природно-технической системы "отвал-основание"

Определим диапазон изменения аргументов в пределах допустимого отклонения коэффициента запаса устойчивости от нормативного значения на

графической модели ПТС "отвал-основание", построенной по результатам экспериментальных исследований 20 внешних отвалов со слабым контактом в основании (см. рисунок 2.4, индекс по системе структуризации – П.В.1.л), на которых произошли деформации сдвига по контакту отвала с основанием.

Матрица с результатами экспериментальных исследований содержит следующие данные по каждому объекту – ПТС "отвал-основание" (таблица 3.1): физико-механические свойства отвальной массы (C – сцепление, кПа; ϕ – угол внутреннего трения, град.; γ – плотность, т/м³); сопротивление сдвигу пород основания, представленного глинисто-суглинистыми породами, прочностные характеристики которых меньше, чем у отвальной массы (C' – сцепление, кПа; ϕ' – угол внутреннего трения, град).

Таблица 3.1 – Матрица с результатами экспериментальных исследований по объектам природно-технических систем "отвал-основание"

Шифр ПТС	Измеренные значения аргументов							
	γ , т/м ³	C , кПа	ϕ , град	C' , кПа	ϕ' , град	H , м	α , град	β , град
1	1,90	20	24	15	9	122	14	6
2	1,98	22	28	13	12	58	12	5
3	2,00	18	19	9	9	120	11	9
4	1,85	15	33	11	11	120	10	10
5	1,92	21	30	15	11	120	14	12
6	2,01	11	27	15	9	120	11	8
7	1,72	15	28	17	13	120	17	8
8	1,65	9	35	5	10	120	29	8
9	2,00	8	21	11	11	80	13	3
10	1,81	14	29	0	5	33	17	3
11	1,95	18	34	23	12	120	25	8
12	1,90	14	31	9	13	120	14	12
13	1,95	22	29	13	12	120	14	12
14	1,90	5	32	5	15	40	11	2
15	1,81	8	32	18	9	120	15	12
16	2,12	35	20	15	16	90	12	9
17	1,90	23	28	22	14	60	20	3
18	2,05	8	31	11	11,3	120	13	6
19	1,84	32	23	20	18	105	11	5
20	1,64	15	28	16	16	100	14	9

Анализом результатов статистической обработки экспериментальных данных (таблица 3.2) для графической модели ПТС "отвал-основание" при-

няты модальные значения следующих характеристик: сцепление отвальной массы C и основания C' , высота H и угол откоса α отвала; среднеарифметические: плотность γ и угол внутреннего трения φ отвальной массы; угол внутреннего трения φ' и угол наклона β основания.

Таблица 3.2 – Статистика результатов исследования аргументов, влияющих на напряженно-деформированное состояния ПТС "отвал-основание"

Статистический показатель	Исследуемая переменная (аргумент)							
	γ , т/м ³	C , кПа	φ , град	C' , кПа	φ' , град	H , м	α , град	β , град
Среднее арифметическое, \bar{X}_i	1,89³	17	28	13	12	100	15	7,5
Мода, Mo	1,90	22	29	15	9	120	14	12,0
Дисперсия, σ^2	0,02	60	21	30	9	887	24	10,7
Стандартное отклонение, σ	0,13	8	5	6	3	30	5	3,3
Минимум, min	1,64	5	19	0	5	33	10	0
Максимум, max	2,12	35	35	23	18	122	29	12,0
Коэффициент вариации, V_σ , %	6,62	47,5	16	43,8	26	30	33	43,6
Расчетные характеристики	1,89	22	28	15	12	120	14	7,5
Шаг интервала, h	0,12	7	4	6	3	22	5	3

Для анализа влияния измеряемых аргументов на коэффициент устойчивости откосов ПТС "отвал-основание", разделили аргументы функции n_p на четыре группы независимых факторов:

- внутренние реактивные силы сопротивления: C , φ и γ – физико-механические свойства отвальной массы, C' и φ' – характеристики сопротивления сдвигу пород основания отвала;
- активные сдвигающие силы: нагрузка от оборудования – P^{ob} ; сила гидростатического давления, выражаемая коэффициентом обводнения – k ; сейсмическая нагрузка от землетрясений – Q ;
- параметры отвала и основания: H – высота и α – результирующий

³ Жирным шрифтом выделены параметры и характеристики, принятые для создания графической модели ПТС «отвал-основание» и последующих расчетов и анализа.

угол отвала; β – угол наклона основания отвала.

Изучение влияния измеренных аргументов на функцию n_p выполнялось на графической модели ПТС "отвал-основание" со среднестатистическими характеристиками (см. таблицу 3.2): $H=120$ м, $\alpha=14^\circ$, $\beta=7,5^\circ$, $C=22$ кПа, $\varphi=28^\circ$, $\gamma=1,89$ т/м³, $C'=15$ кПа, $\varphi'=12^\circ$ (рисунок 3.3).

3.4 Исследование влияния нагрузок и воздействий на устойчивость природно-технических систем "отвал-основание"

Методический подход к проведению исследований влияния аргументов на расчетный коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" заключался в пошаговом выполнении следующих операций:

1. Создание графической модели (рисунок 3.3) со среднестатистическими параметрами экспериментальной выборки (таблица 3.2).
2. Расчет коэффициента устойчивости ПТС "отвал-основание" методом векторного сложения сил путем последовательного изменения аргументов функции (3.1) в интервале от максимального до минимального значения с заданным шагом интервала h (таблица 3.2).
3. Определение уравнения регрессии коэффициента устойчивости n_p от каждого аргумента: C , φ , γ , C' , φ' , H , α , β , $P^{\text{об}}$, k , Q , приведенного в формуле (3.1) и приращений аргументов во всем диапазоне факторных показателей, при которых приращение функции достигнет предельного значения – $\Delta n_p = 0,05$.

3.3.1. Анализ изменчивости физико-механических свойств отвальной массы и сопротивления сдвигу пород основания

Результаты расчета коэффициента устойчивости ПТС "отвал-основание" методом векторного сложения сил последовательным изменением физико-механических свойств отвальной массы и сопротивления сдвигу пород основания приведены в таблице 3.3.

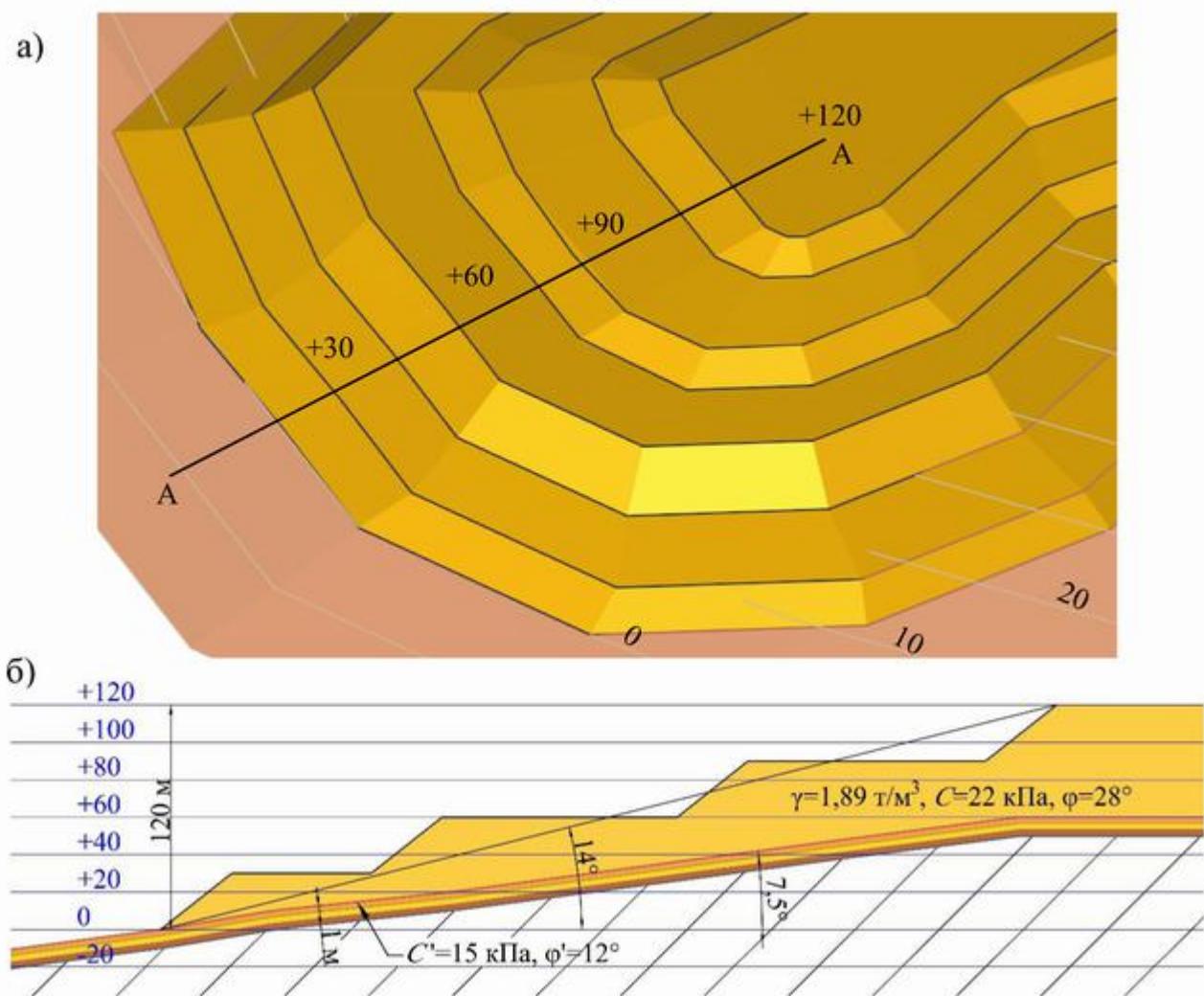


Рисунок 3.3 – Модель ПТС "отвал-основание": а) план;
б) профиль по линии А-А

По результатам оценки влияния физико-механических свойств отвальной массы и сопротивления сдвигу пород основания на коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" (таблица 3.3) установили следующее:

- между результативным (расчетный коэффициент устойчивости) и каждым из факторных показателей существует тесная ($r = 0,99$) линейная зависимость;
- для всего диапазона характеристик плотности, сцепления, угла внутреннего трения отвальной массы и сцепления по контакту отклонение расчетного коэффициента устойчивости от нормативного значения не превысило $\Delta_{n_p} = 0,05$ (коэффициент вариации $V_\sigma = (1 - 6)\%$). В этой связи можно говорить, что эти характеристики не оказывают значимого влияния на коэффи-

циент устойчивости отвалов.

Ранее исследованиями [27, 35] также было обосновано, что в результате уплотнения отвальной массы эти характеристики оказывают положительное влияние на устойчивость отвала.

Таблица 3.3 – Результаты оценки влияния физико-механических свойств отвальной массы и сопротивления сдвигу пород основания на коэффициент устойчивости

Факторный показатель	Коэффициент устойчивости n_p ПТС "отвал-основание" для интервалов					Приращение аргумента, при $\Delta n_p^4 = 0,05$	Коэффициент вариации, $V_\sigma, \%$
	$\gamma, \text{ т}/\text{м}^3$	n_p	$C, \text{ кПа}$	n_p	$\varphi, \text{ град}$		
$\gamma, \text{ т}/\text{м}^3$	1,64	1,76	1,88	2,00	2,12	0,55	
n_p	1,330	1,317	1,306	1,296	1,287		1
$C, \text{ кПа}$	5	12,5	20	27,5	35	30	
n_p	1,278	1,29	1,302	1,313	1,324		1
$\varphi, \text{ град}$	19	23	27	31	35	3,7	
n_p	1,179	1,242	1,295	1,342	1,386		6
$C', \text{ кПа}$	0	5,8	11,5	17,3	23,0	5,0	
n_p	1,173	1,223	1,274	1,325	1,375		6
$\varphi', \text{ град}$	5	8	12	15	18	0,5	
n_p	0,743	0,998	1,305	1,519	1,722		31

Значимым коэффициентом вариации оказался только для угла внутреннего трения по контакту – $V_\sigma = 31 \%$. При углах внутреннего трения по контакту меньше 11° устойчивость ПТС "отвал-основание" не обеспечивается. При уменьшении угла внутреннего трения пород основания всего на $\Delta\varphi'=0,5^\circ$ (при $\varphi'=11^\circ$) расчетный коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" окажется меньше нормативного значения (рисунок 3.4,а).

Среднеквадратические отклонения $\sigma_{n_p/\varphi}$, коэффициента устойчивости n_p , вычисленного по экспериментальным данным от вычисленного по уравнению регрессии n_p^B составило 0,014, погрешность коэффициента корреляции – $m_{r/\varphi} = 0,0019$ (рисунок 3.4,б).

Достоверность связи оценивалась отношением коэффициента корреляции к его погрешности r / m_r . Полученное значение превышает 2,58, значит

⁴ Δn_p – приращение функции

с вероятностью 99% уравнение регрессии отображает зависимость между расчетным коэффициентом устойчивости и углом внутреннего трения основания.

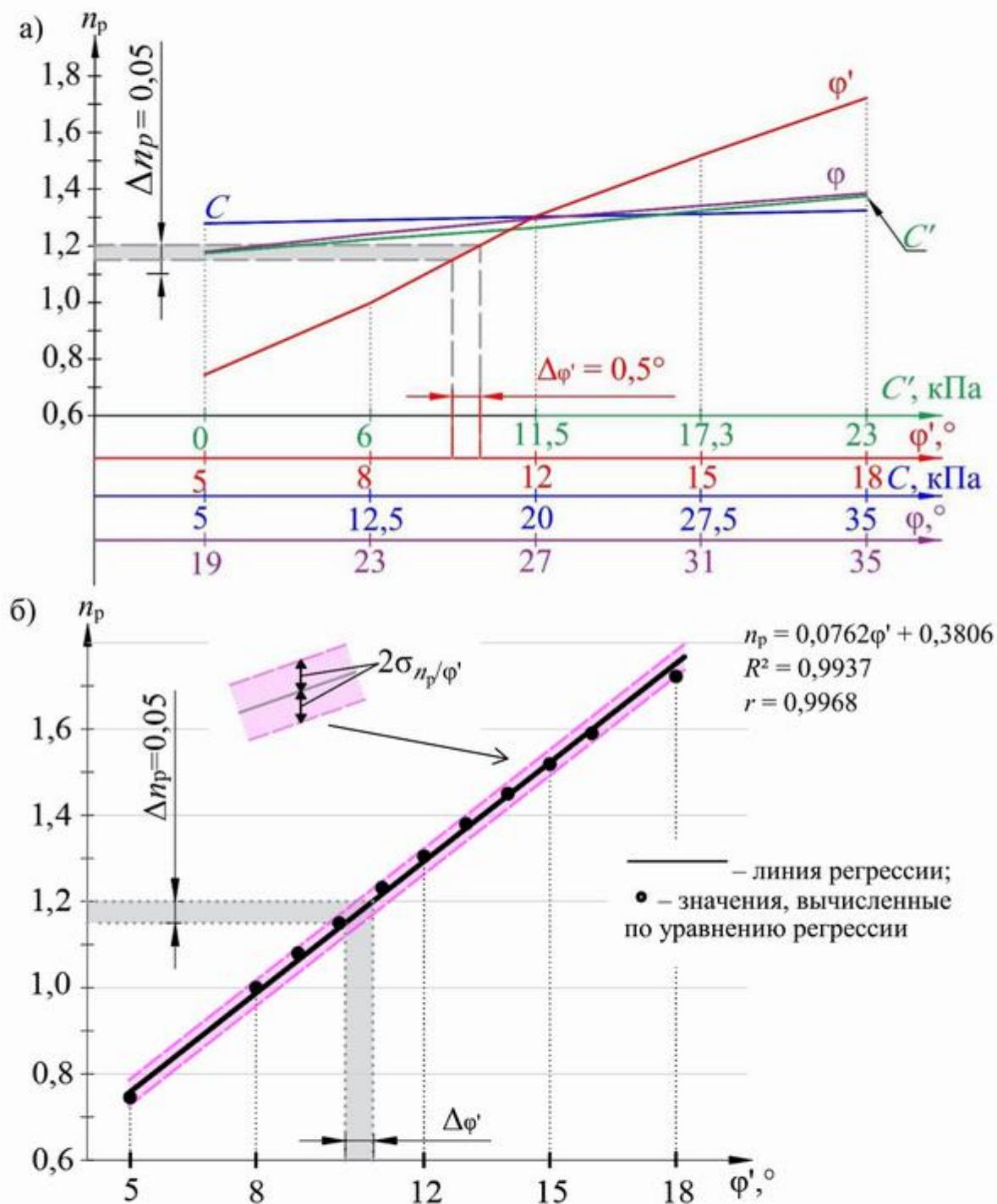


Рисунок 3.4 – Зависимость расчетного коэффициента устойчивости от:

- прочностных характеристик отвальной массы и основания;
- угла внутреннего трения по контакту отвала с основанием

3.3.2. Анализ геометрических параметров ПТС "отвал-основание"

Оценку влияния изменения высоты H и результирующего угла отвала α на напряженно-деформированное состояния ПТС "отвал-основание" выполняли по приведенному выше алгоритму.

Расчет путем последовательных приближений (более 70 циклов) коэффициента устойчивости позволил установить следующие закономерности для отвала из смеси песчано-глинистых (25%) и скальных (75%) пород:

- между расчетным коэффициентом устойчивости и параметрами отвала существует обратная линейная зависимость;

- расчетный коэффициент устойчивости n_p соответствует нормативному – $n_n=1,2$ (рисунок 3.5) при:

- ✓ высоте отвала $H = 120 \pm 12$ м;
- ✓ результирующем угле не больше $\alpha = 17^\circ$;
- ✓ высоте ярусов $H_a = 15$ м с углом естественного откоса $\alpha_a = 36^\circ$.

- напряженно-деформируемое состояние ПТС "отвал-основание" близко к предельному при увеличении высота отвала на $\Delta_H = 12$ м или результирующего угла отвала на $\Delta_\alpha \approx 1^\circ$.

3.3.3. Анализ влияния угла наклона основания

Для оценки влияния приращения угла наклона основания на напряжено-деформированное состояния ПТС "отвал-основание" выполнялся расчет коэффициента устойчивости n_p принятой модели (п.3.2) изменения угол наклона основания β в диапазоне от 0 до 10° с интервалом 3° (рисунок 3.6).

Анализ выполненных исследований показал, что для всего диапазона изменения угла наклона основания расчетный коэффициент устойчивости остается больше нормативного значения, следовательно, устойчивость сооружения при условии: $\varphi' \geq \beta$ будет обеспечена.

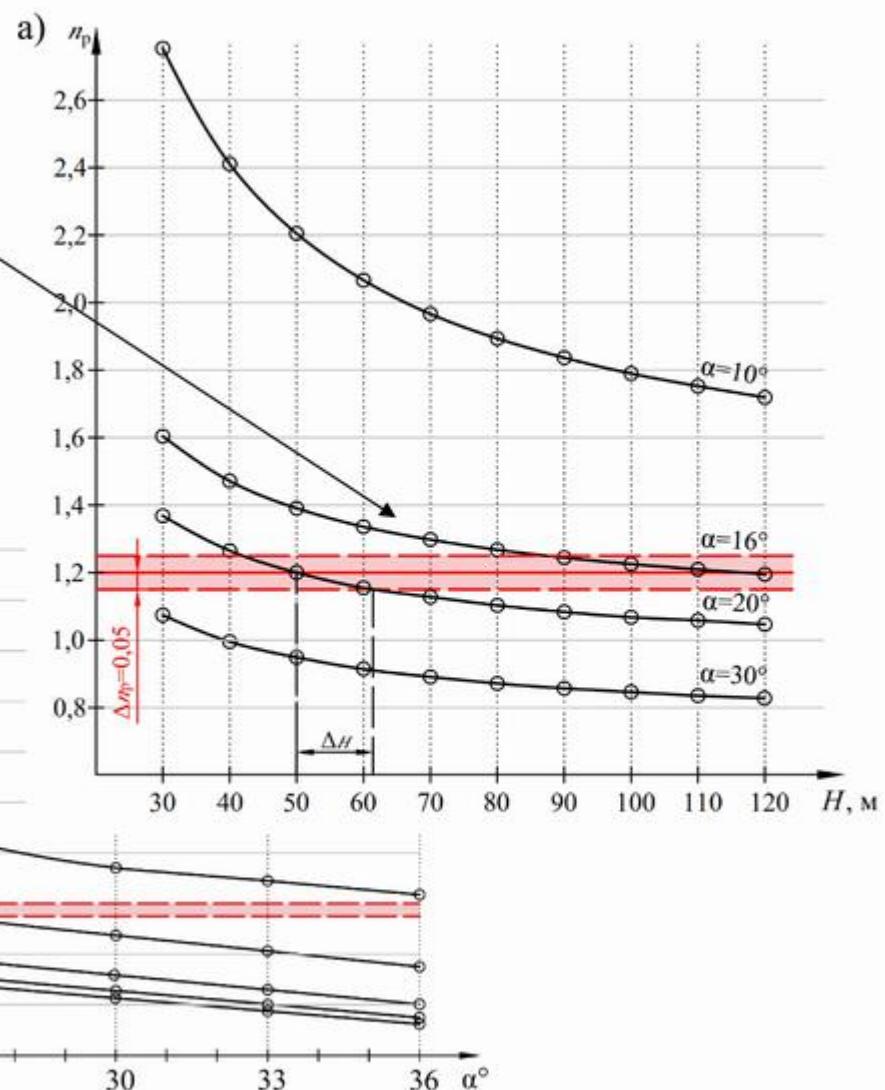
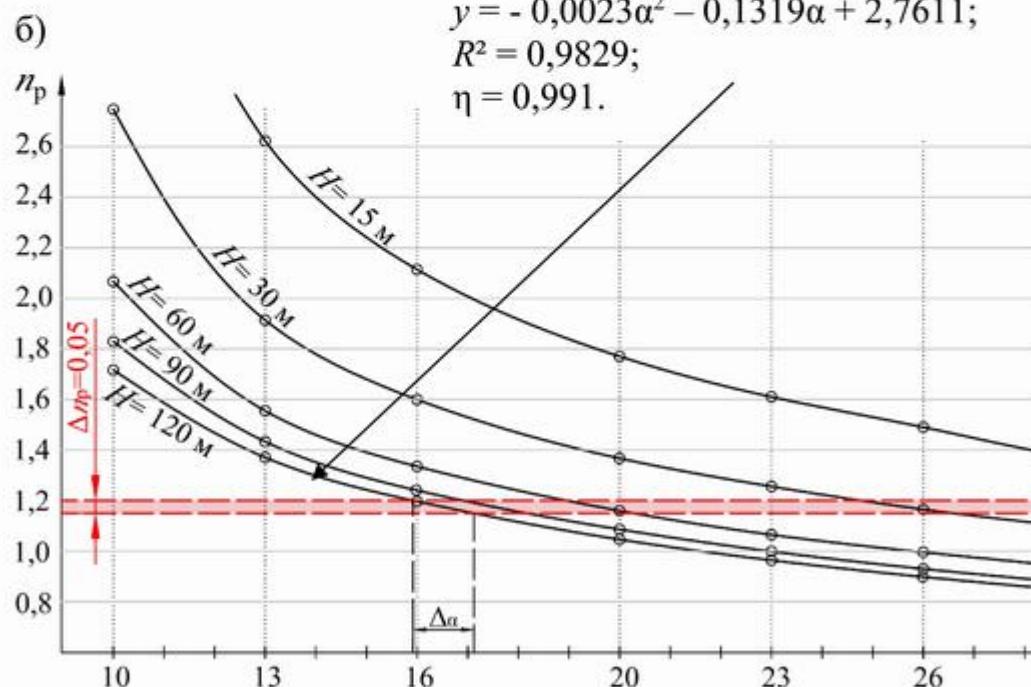


Рисунок 3.5 – Зависимость функции n_p от приращения аргументов: а) высоты H ; б) результирующего угла α

Минимальный коэффициент устойчивости получился при $\beta = 10^\circ$.

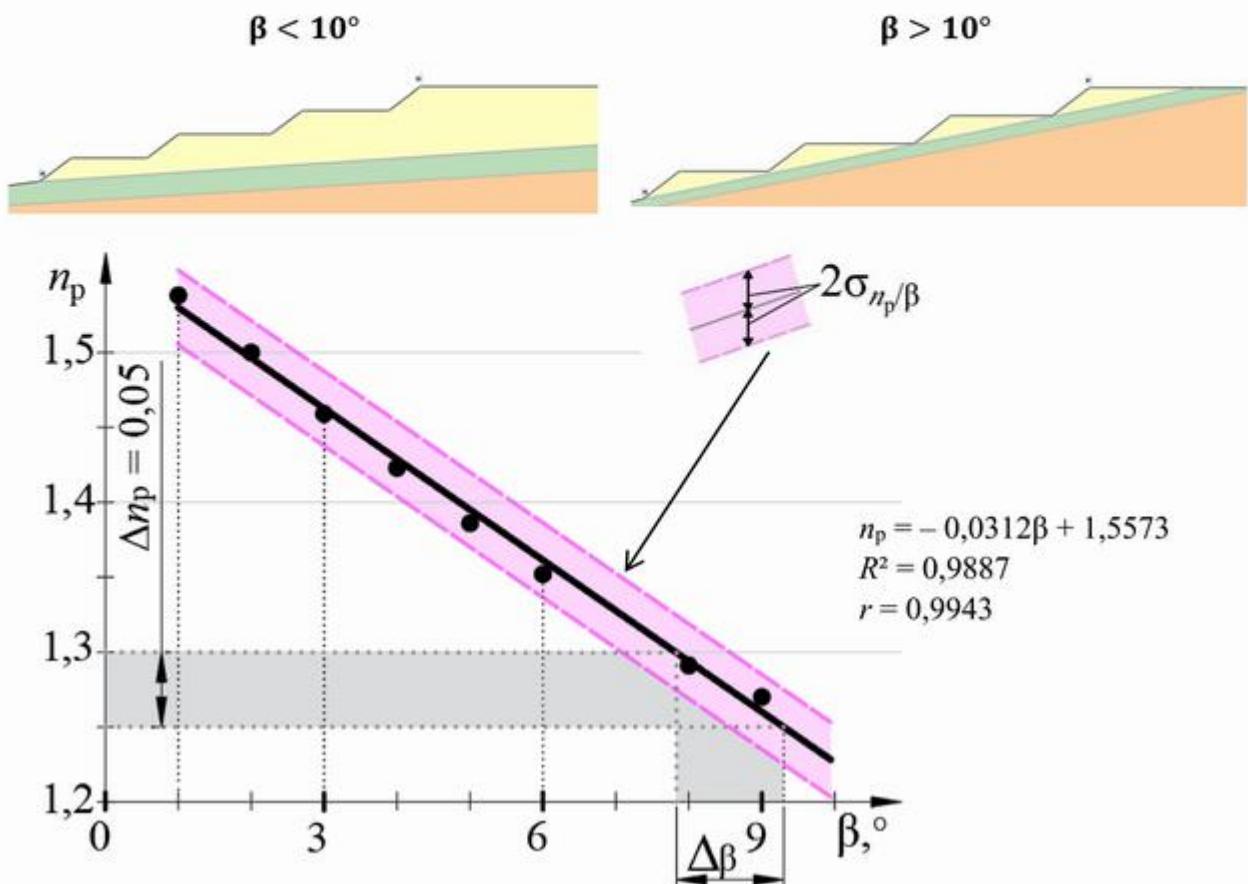


Рисунок 3.6 –Зависимость функции n_p от угла наклона основания β
— линия регрессии; • – значения, вычисленные по уравнению регрессии

Приращение функции n_p на 0,05 происходит при изменении угла наклона основания на $\Delta\beta = 2^\circ$, поэтому при проектировании контура отвала, районировании основания по углу наклона и установлении предельных параметров отвала оптимальный шаг интерполяции 2° .

Среднеквадратические отклонения $\sigma_{n_p/\beta}$ коэффициента устойчивости n_p , вычисленного по экспериментальным данным от вычисленного по уравнению регрессии n_p^B составило 0,012, погрешность коэффициента корреляции – $m_{r/\beta} = 0,0038$ (рисунок 3.6).

Достоверность связи оценивалась отношением коэффициента корреляции к его погрешности r / m_r . Полученное значение превышает 2,58, значит

с вероятностью 99% уравнение регрессии отображает зависимость между расчетным коэффициентом устойчивости углом наклона основания.

3.3.4. Анализ влияния удельной нагрузки от оборудования

Для оценки влияния удельной нагрузки от оборудования, размещаемого в приоткосной зоне яруса отвала, на коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" удельный вес оборудования заменяют эквивалентным слоем отвальной массы. В этом случае условная высота отвала увеличится на величину Δ_h :

$$\Delta_h = \frac{P^{\text{об}}}{\gamma}. \quad (3.6)$$

Исходя из предыдущих исследований (п.3.3.2), где обосновано, что изменение функции n_p на 0,05 произойдет при приращении высоты отвала на $\Delta_H=12$ м, можно говорить, что при размещении в приоткосной части яруса отвала оборудования с удельной нагрузкой, превышающей $\Delta_{p^{\text{об}}} = 0,22$ МПа, расчетный коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" окажется меньше нормативного значения.

3.3.5. Анализ влияния гидростатического взвешивания и гидродинамического давления

Нормальное состояние ПТС "отвал-основание" дренированное, однако, при отсутствии в основании отвала дренажных сооружений, в отвале формируется техногенный водоносный горизонт.

На каждый элементарный блок отвальной массы, расположенной ниже уровня депрессионной кривой, влияют гидростатическое взвешивание и боковое гидродинамическое давление [96]. Гидростатическое взвешивание $D_{\text{взв}}$, уменьшая вес элементарных блоков, уменьшает нормальную и касательную составляющие веса призмы возможного обрушения, а гидродинамическое давление $D_{\text{гдн}}$ увеличивает тангенциальные нагрузки на откос. Таким

образом, суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления проявляется как гидростатическое давление D влияющее на нормальную составляющую веса и направленно перпендикулярно к поверхности скольжения [35]. Влияние гидростатического давления на коэффициент устойчивости отвала оценивается с учётом коэффициента обводнения k , который равен отношению:

$$k = \frac{H'}{H} \quad (3.3)$$

где H и H' – высота отвала и техногенного водоносного горизонта в теле отвала соответственно, м.

Корреляционная модель, подобранная в результате проведенных исследований, отражает обратную линейную зависимость коэффициента устойчивости от коэффициента обводнения k отвала (рисунок 3.7).

Среднеквадратические отклонения $\sigma_{n_p/k}$ коэффициента устойчивости n_p , вычисленного по экспериментальным данным от вычисленного по уравнению регрессии n_p^B составило 0,043, погрешность коэффициента корреляции – $m_{r/k} = 0,0046$.

Достоверность связи оценивалась отношением коэффициента корреляции к его погрешности r / m_r . Полученное значение превышает 2,58, значит с вероятностью 99% уравнение регрессии отображает зависимость между расчетным коэффициентом устойчивости и коэффициентом обводнения.

Анализ корреляционной модели показал:

- влияние коэффициента обводнения k на коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" аппроксимируется линейным уравнением регрессии $n_p = -0,0074k + 1,3727$ (коэффициент корреляции – $r = 0,985$);
- коэффициент устойчивости измениться на допустимую величину $\Delta n_p = 0,05$ при приращении коэффициента обводнения на $\Delta k = 0,07$.

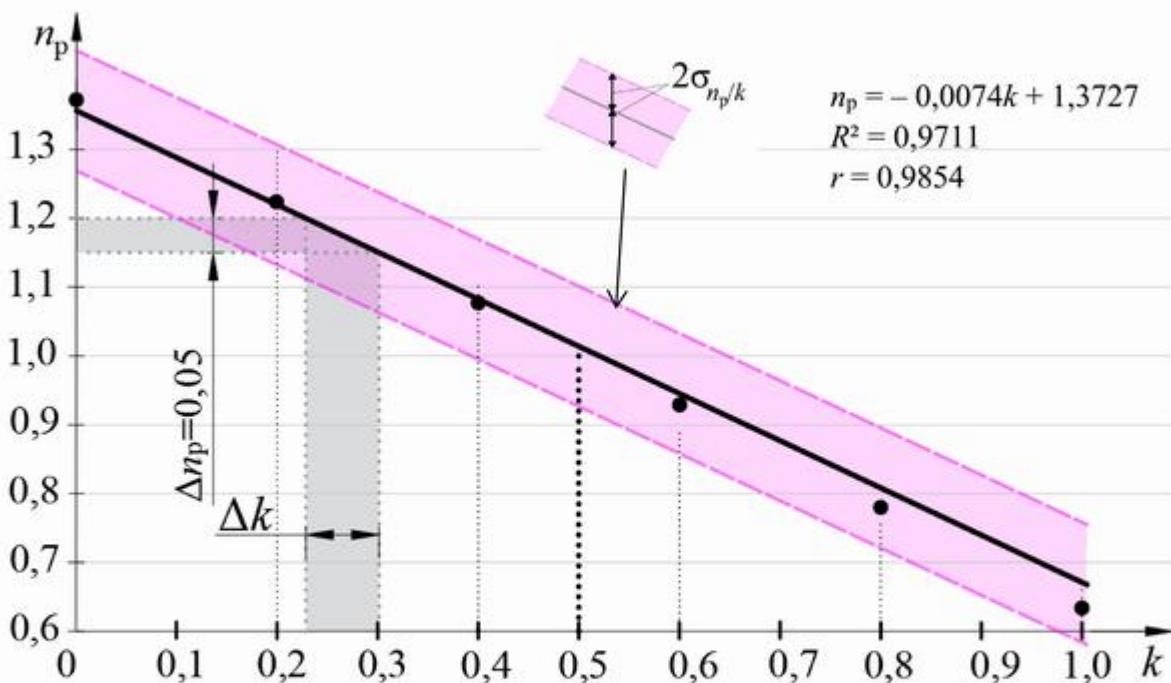


Рисунок 3.7 – Зависимость функции n_p от коэффициента обводнения k
— линия регрессии; • – значения, вычисленные по уравнению регрессии

3.3.6. Анализ влияния природного и техногенного сейсмического воздействия на откос

Сейсмическое воздействие относится к особому сочетанию нагрузок, поэтому влияние сейсмической силы рассмотрено несколько иначе.

В сейсмически активных районах (сейсмичность 7 баллов и более по шкале МСК-64) устойчивость отвалов должна быть обеспечена с учетом действия сейсмической силы от землетрясений. Значение сейсмической силы зависит от коэффициентов, учитывающих: назначение сооружения и его ответственность (K_0); допускаемые повреждения (K_1); и от коэффициента сейсмичности (k_c), который принимается в зависимости от максимального ускорения сейсмических колебаний грунта при вероятности возможного превышения интенсивности землетрясений в течении 50 лет – 10% [2].

Изучение влияния сейсмического воздействия на функцию n_p выполнялось при различных значениях расчетной сейсмической интенсивности (рисунок 3.8).

В результате моделирования установлено:

– влияние сейсмических нагрузок Q на коэффициент устойчивости ПТС "отвал-основание" аппроксимируется линейным уравнением регрессии $n_p = -0,0809Q + 1,8215$ (коэффициент корреляции – $r = 0,986$).

– коэффициент устойчивости измениться на предельную величину $\Delta n_p = 0,05$ при увеличении сейсмической интенсивности на $\Delta Q = 0,5$ балла.

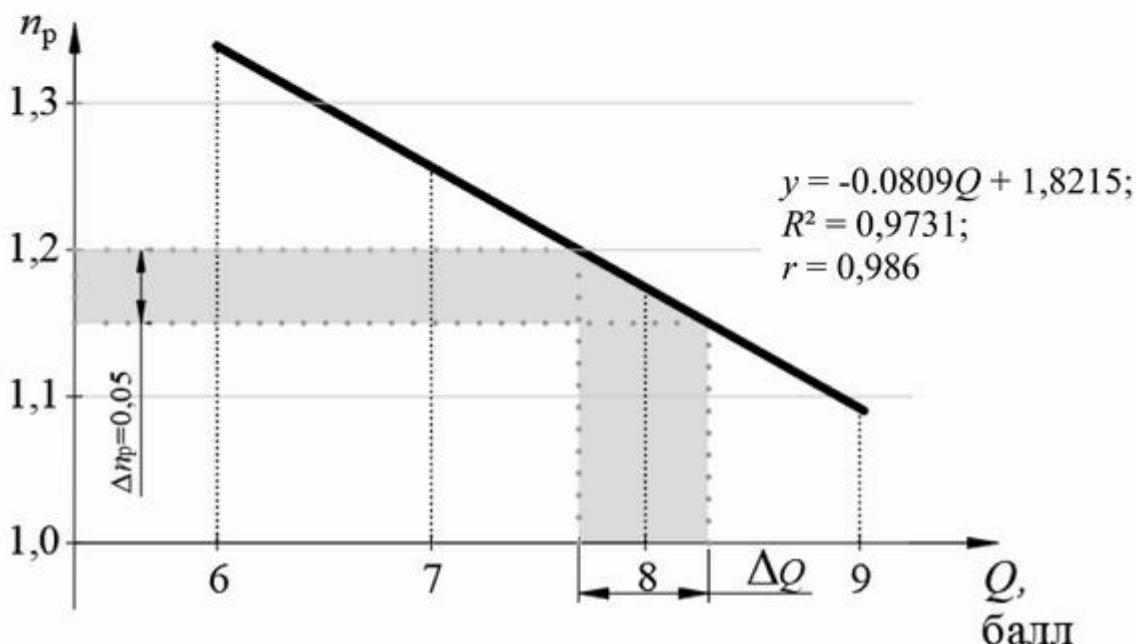


Рисунок 3.8 – Зависимость функции n_p от сейсмических воздействий на откос

3.3.7. Оценка устойчивости по критерию Кулона-Мора методом конечных элементов

Для оценки устойчивости откоса отвала были проведены расчеты распределения значений Кулона-Мора методом конечных элементов [99] для модели ПТС "отвал-основание" со среднестатистическими параметрами экспериментальной выборки (см. таблица 3.2). Расчетная область отвала с сеткой конечных элементов приведена на рисунке 3.9,а. Число узлов сетки конечных элементов составляло более 145 000, а средняя длина ребра конечного элемента – 1 м. Нагрузки расчетной области: отвал и породы основания нагружены собственным весом, определяемым плотностью пород равной 1890 кг/м³ и 2430 кг/м³ соответственно.

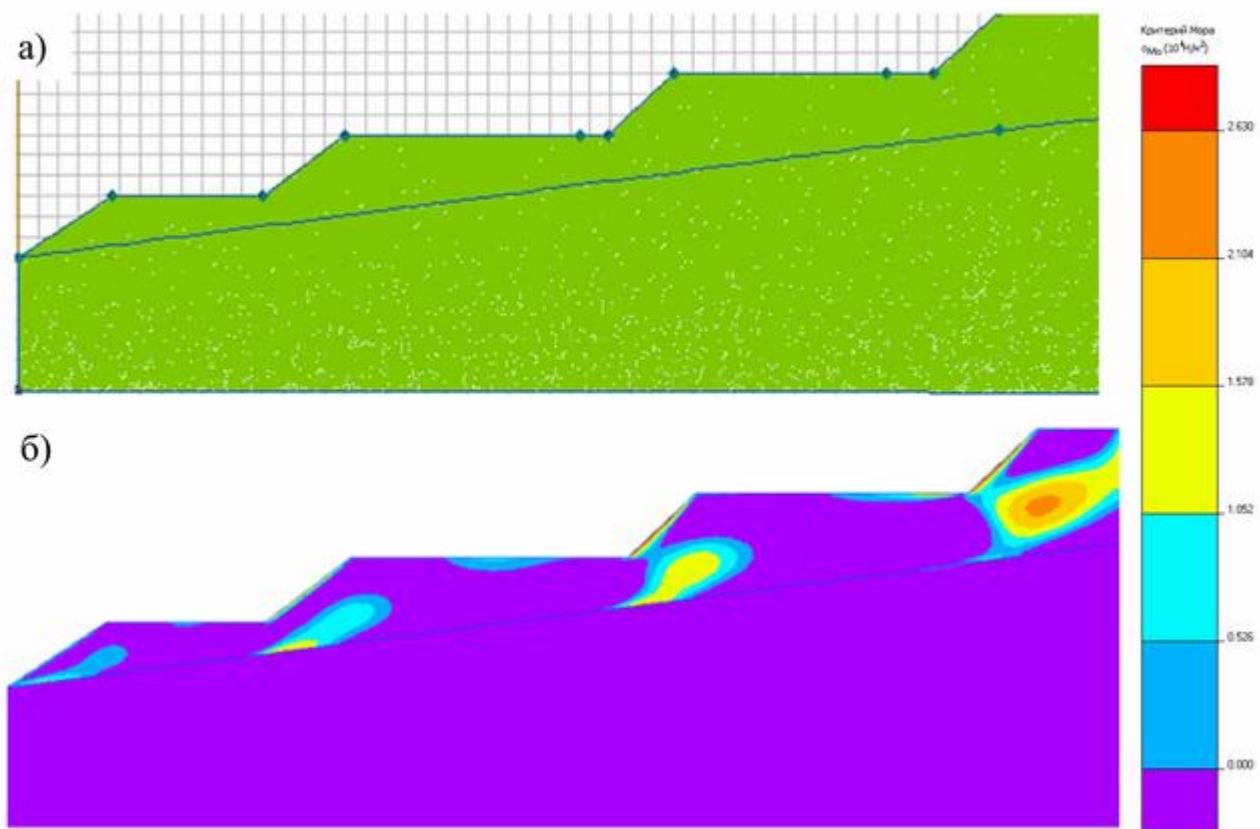


Рисунок 3.9 – Расчетная область модели ПТС "отвал-основание" (а) и распределение значений критерия Кулона-Мора (б)

Границные условия: дневная поверхность свободна от напряжений; на правой границе основания откоса и нижней границе расчетной области нормальные смещения и касательные напряжения отсутствуют; на левой границе задавались нормальные напряжения равные боковому распору при отсутствии касательных напряжений.

Расчетные характеристики: для пород отвала сцепление равнялось 22 кПа, угол внутреннего трения - 28° , модуль деформации - $4 \cdot 10^2$ МПа, коэффициент поперечных деформаций - 0,2; для пород основания отвала сцепление равнялось 15 кПа, угол внутреннего трения – 12° , модуль деформации - $2 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент поперечных деформаций – 0,25.

Предельные значения критерия Кулона-Мора в соответствии с [100] составили для пород отвала 26,3 кПа, для пород основания отвала 24,2 кПа. Распределение значений критерия Кулона-Мора приведены на рисунке 3.9,б.

Результаты расчетов распределения значений критерия Кулона-Мора методом конечных элементов соответствуют имеющимся представлениям о формировании зон предельного состояния, в которых формируется поверхность скольжения в отвале. В рассматриваемом случае наблюдается формирование поверхности скольжения вдоль границы отвала с основанием.

3.3.8. Оценка значимости нагрузок и воздействий на устойчивость природно-технической системы "отвал-основание"

Анализом, проведенным на модели ПТС "отвал-основание" (внешний отвал со слабым контактом в основании – II.B.1) со среднестатистическими параметрами геометрической модели (высота $H=120$ м, результирующий угол $\alpha=14^\circ$, угол наклона основания $\beta=7,5^\circ$); физико-механическими свойствами отвальной массы ($C=22$ кПа, $\varphi=28^\circ$, $\gamma=1,89$ т/м³) характеристиками сопротивления сдвигу пород основания отвала ($C'=15$ кПа, $\varphi'=12^\circ$) получены значения приращений аргументов для каждой группы измеряемых показателей (таблица 3.4) при которых приращение функции Δ_{n_p} не превысит 0,05.

По результатам выполненного моделирования, опираясь на причины возникновения деформаций отвалов, практический опыт проектирования и ведения геомеханического мониторинга отвалов, учитывая значимость нагрузок и воздействий на устойчивость откосов ПТС "отвал-основание", установлен диапазон изменения нагрузок и воздействий, превышение которого влияет на устойчивость природно-технической системы "отвал-основание":

1. Незначительные приращения аргументов: уменьшение угла внутреннего трения ($\Delta_{\varphi'}=0,5^\circ$), увеличение угла наклона основания отвала ($\Delta_\beta=2^\circ$) либо результирующего угла отвала ($\Delta_\alpha=1^\circ$) приведут к превышению допустимого отклонения критерия устойчивости от нормативного значения на 5%.

Таблица 3.4 – Результаты исследований влияния факторных показателей на коэффициент устойчивости отвала n_p

Наименование и условное обозначение аргумента		Значение ¹	Приращения аргументов		Вид и уравнение связи	Коэффициент корреляции (r) или корреляционное отношение (η) ²	
			обозначение	значение			
отвальные породы	плотность γ , т/м ³	$\frac{1,64 \div 2,12}{1,89}$	Δ_γ	0,55	29	обратная линейная $y = -0,0891x + 1,4747$	0,997
	сцепление C , кПа	$\frac{5 \div 35}{22}$	Δ_C	30	136	прямая линейная $y = 0,0153x + 1,2707$	0,999
	угол внутреннего трения φ , град	$\frac{19 \div 35}{28}$	Δ_φ	3,7	13	прямая линейная $y = 0,0126x + 0,9466$	0,997
основание отвала	сцепление C' , кПа	$\frac{0 \div 23}{15}$	$\Delta_{C'}$	5	33	прямая линейная $y = 0,0879x + 1,1728$	0,999
	угол внутреннего трения φ' , град	$\frac{5 \div 18}{12}$	$\Delta_{\varphi'}$	0,5	4	прямая линейная $y = 0,0762x + 0,3806$	0,997
высота отвала H , м		$\frac{33 \div 122}{120}$	Δ_H	12	10	полиноминальная $y = -0,00006x^2 - 0,0128x + 1,9049$	0,992
результатирующий угол наклона отвала α , град		$\frac{10 \div 29}{14}$	Δ_α	1	7	полиноминальная $y = -0,0023x^2 - 0,1319x + 2,7611$	0,991
угол наклона основания β , град		$\frac{0 \div 12}{7,5}$	Δ_β	2	29	обратная линейная $y = -0,0312x + 1,5573$	0,994
коэффициент обводнения k		-	Δ_k	-	0,07	обратная линейная $y = -0,0074x + 1,3727$	0,985
сейсмические воздействия Q , балл		-	Δ_Q	0,5	-	обратная линейная $y = -0,0809x + 1,8215$	0,986

Примечания:

1. В числителе – диапазон изменения аргумента, в знаменателе – принятое к расчету значение.

2. Коэффициент корреляции приведен для линейных уравнений связи; корреляционное отношение – для полиноминальных.

Одновременное отклонение этих аргументов вызовет развитие деформаций и нарушение устойчивости ПТС "отвал-основание".

2. При коэффициенте обводнения отвала $k=0,3$, критерий устойчивости окажется меньше нормативного значения, при последующем повышении уровня воды в теле отвала начинается развитие деформаций и при $k=0,5$ произойдет нарушение устойчивости отвала.

3.5 Оценка риска развития деформаций природно-технических систем "отвал-основание"

Для установления степени влияния исследуемых аргументов функции n_p (3.1) на напряженно-деформируемое состояние ПТС "отвал-основание" воспользовались известной методикой по оценке геомеханического риска развития деформаций и нарушения устойчивости [101, 102].

Основная цель анализа риска развития деформаций – установление степени опасности возникновения деформаций ПТС "отвал-основание" для предупреждения угрозы причинения вреда жизни, здоровью людей, окружающей природной среде, имуществу третьих лиц, государственному или муниципальному имуществу.

Основные задачи – разработка, реализация и своевременная корректировка рекомендаций и (или) мероприятий по уменьшению риска развития деформаций, направленных на снижение масштаба последствий деформации и размера ущерба, нанесенного в случае нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание" [94, 103].

Геомеханический риск развития деформаций ПТС "отвал-основание" количественно оценивался по формуле [2]:

$$P = BO \times TP, \quad (3.4)$$

где ВО – вероятность обрушения, ТП – тяжесть последствий.

Как уже отмечалось в параграфе 3.1, критерием устойчивости природно-технической системы "отвал-основание" при оценке её напряженно-

деформированного состояния является коэффициент устойчивости n_p , который представляет собой соотношение несущей способности пород основания и предельной нагрузки, действующей на систему.

С целью определения потенциально опасных элементов анализируемого сооружения с позиции развития деформаций выполнялось ранжирование основных сценариев по уровню опасности для персонала, населения, имущества и окружающей природной среды с использованием матрицы "частота – тяжесть последствий" [42], приведенной в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Матрица рисков

Категория	Оценка вероятности риска		Последствия				
	качес-твенная	количес-твенная	незначи-тельные	низкие	средние	высокие	чрезвы-чайные
A	весома высокая	> 40%	средний	высокий	высокий	очень высокий	очень высокий
B	высокая	20÷40%	низкий	средний	высокий	высокий	очень высокий
C	средняя	10÷20%	низкий	низкий	средний	высокий	очень высокий
D	низкая	1÷10%	очень низкий	низкий	средний	высокий	очень высокий
E	очень низкая	< 1%	очень низкий	низкий	средний	средний	высокий

Выявлялись причины деформаций ПТС "отвал-основание" с целью определения всех возможных неблагоприятных процессов и событий, которые могут спровоцировать нарушение устойчивости сооружения.

На этапе выявления причинно-следственных связей деформаций ПТС "отвал-основание" [104-107]:

- определялись источники возникновения деформаций;
- проводилось разделение сооружения на составные части для анализа риска развития деформаций на локальных участках;
- выделялись характерные причины возникновения деформаций сооружения;

– определялись основные (типовые) сценарии развития деформаций сооружения с их предварительной оценкой и ранжированием с учетом последствий и вероятностей.

Опасности, способные инициировать развитие деформаций ПТС "отвал-основание" подразделялись на природные и техногенные.

К природным относили ветровые и сейсмические нагрузки, атмосферные осадки, характер дождей, мощность снегового покрова и продолжительность его таяния, температурный режим района, глубину сезонного промерзания и оттаивания пород; к техногенным – массовые взрывы в зоне ведения открытых горных работ, расположенных вблизи сооружения.

При анализе риска развития деформаций учитывался также человеческий фактор: ошибки изысканий, проектирования и эксплуатации ПТС "отвал-основание", неправильные действия или бездействие персонала в аварийных ситуациях. Для определения причин деформаций ПТС "отвал-основание" выполнен "Анализ дерева отказов" (рис. 3.10). Для представленных причин развития деформаций проведена количественная и качественная оценка риска развития деформаций ПТС "отвал-основание".

Количественная оценка при вероятностном расчете устойчивости, включала следующие этапы:

- разработку геомеханической модели сооружения;
- подбор вероятностно-статистических моделей, наиболее адекватно отражающих характерные особенности развития деформационных процессов и учитывающих строение ПТС "отвал-основание";
- оценку вероятности реализации прогноза деформационных процессов (расчетный коэффициент устойчивости $n_p < 1,0$) при различных траекториях развития событий.

Вероятностная оценка устойчивости ПТС "отвал-основание" выполнена в специализированной программе Slide 2.

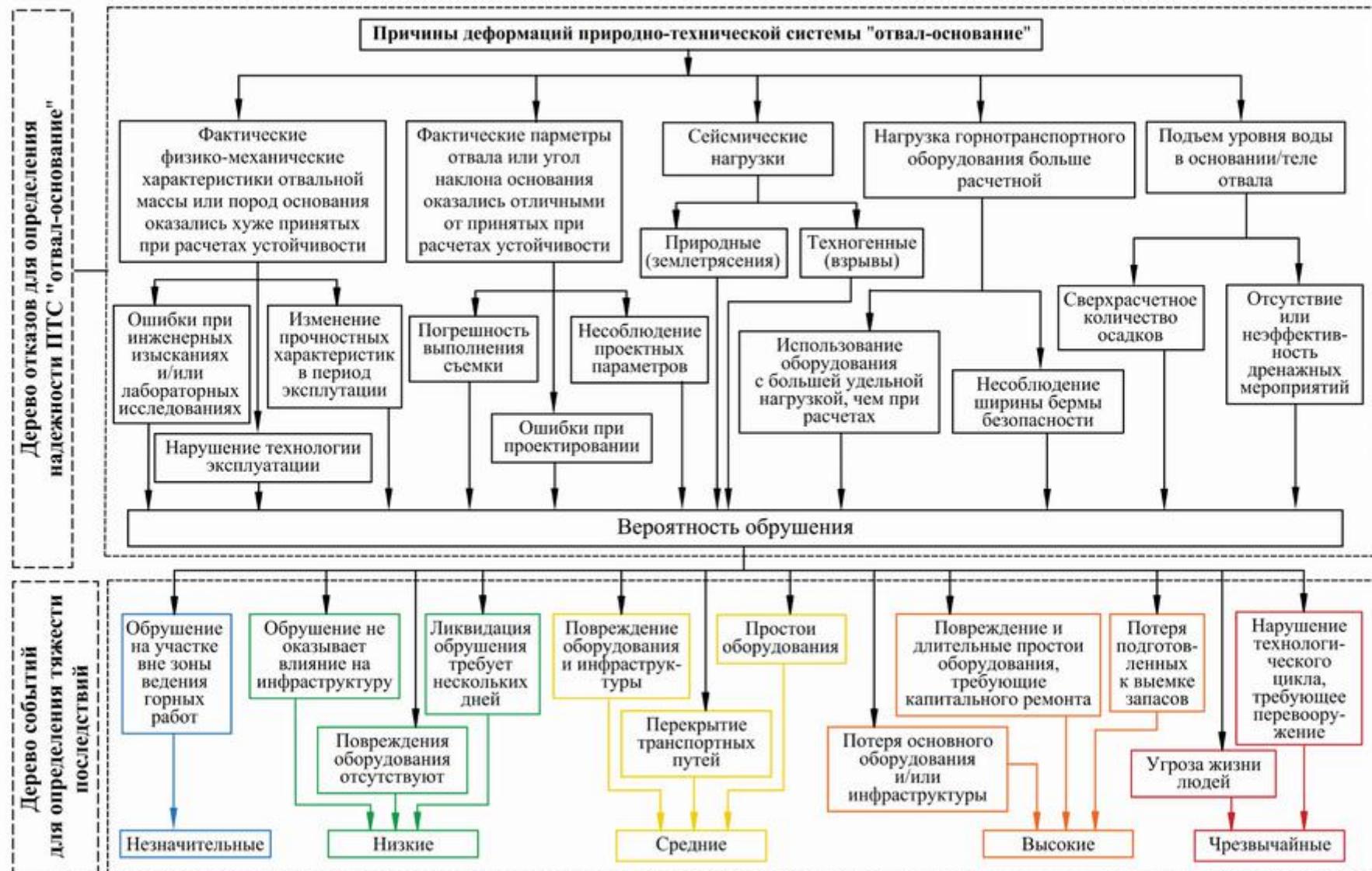


Рисунок 3.10 – Схема оценки риска развития деформаций ПТС "отвал-основание"

Тяжесть последствий деформаций ПТС "отвал-основание" оценивалась качественно и основывалась на выборе одной из пяти категорий: незначительные, низкие, средние, высокие и чрезвычайные. Для определения категории тяжести последствий проведен "Анализ дерева событий", где за начальное событие принято нарушение устойчивости ПТС "отвал-основание" (рисунок 3.10).

После определения вероятности обрушения и тяжести последствий распределялись основные сценарии по уровням риска с использованием матрицы рисков (см. таблицу 3.5).

Вероятность нарушения устойчивости модели ПТС "отвал-основание", используемой в §3.3, по сценарию 5 – значение угла внутреннего трения пород основания оказалось хуже принятого при расчетах.

В качестве расчетной модели использовался наиболее часто встречающийся закон распределения – нормальный, метод статистического моделирования – Монте-Карло [108, 109].

Оценка вероятности реализации прогноза риска развития деформаций для модели ПТС "отвал-основание" (рисунок 3.11) проведена в программном комплексе Slide2 [110].

По результатам многочисленных расчетов точка пересечения накопленной вероятности с абсциссой, соответствующей коэффициенту устойчивости $n_p = 1,0$ на графике кумуляты, соответствует вероятности возникновения деформации – 0,303 (рисунок 3.12) [109].

Вероятность обрушения рассчитывалась по формуле:

$$PF = \frac{\text{numfailed}}{\text{numtotal}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

где numfailed – количество расчетов устойчивости с коэффициентом менее 1,0; numtotal – общее количество расчетов устойчивости.

Тяжесть последствий в результате нарушения устойчивости при возникновении деформации ПТС "отвал-основание" оценивалась на качественном уровне – "средняя": перекрытие транспортных путей.

На основе количественной оценки вероятности обрушения ПТС "отвал-основание" и экспертной оценки, по матрице рисков (см. таблицу 3.5) устанавливается уровень геомеханического риска для каждого сценария развития деформации модели природно-технической системы "отвал-основание" (таблица 3.6) [111, 112].

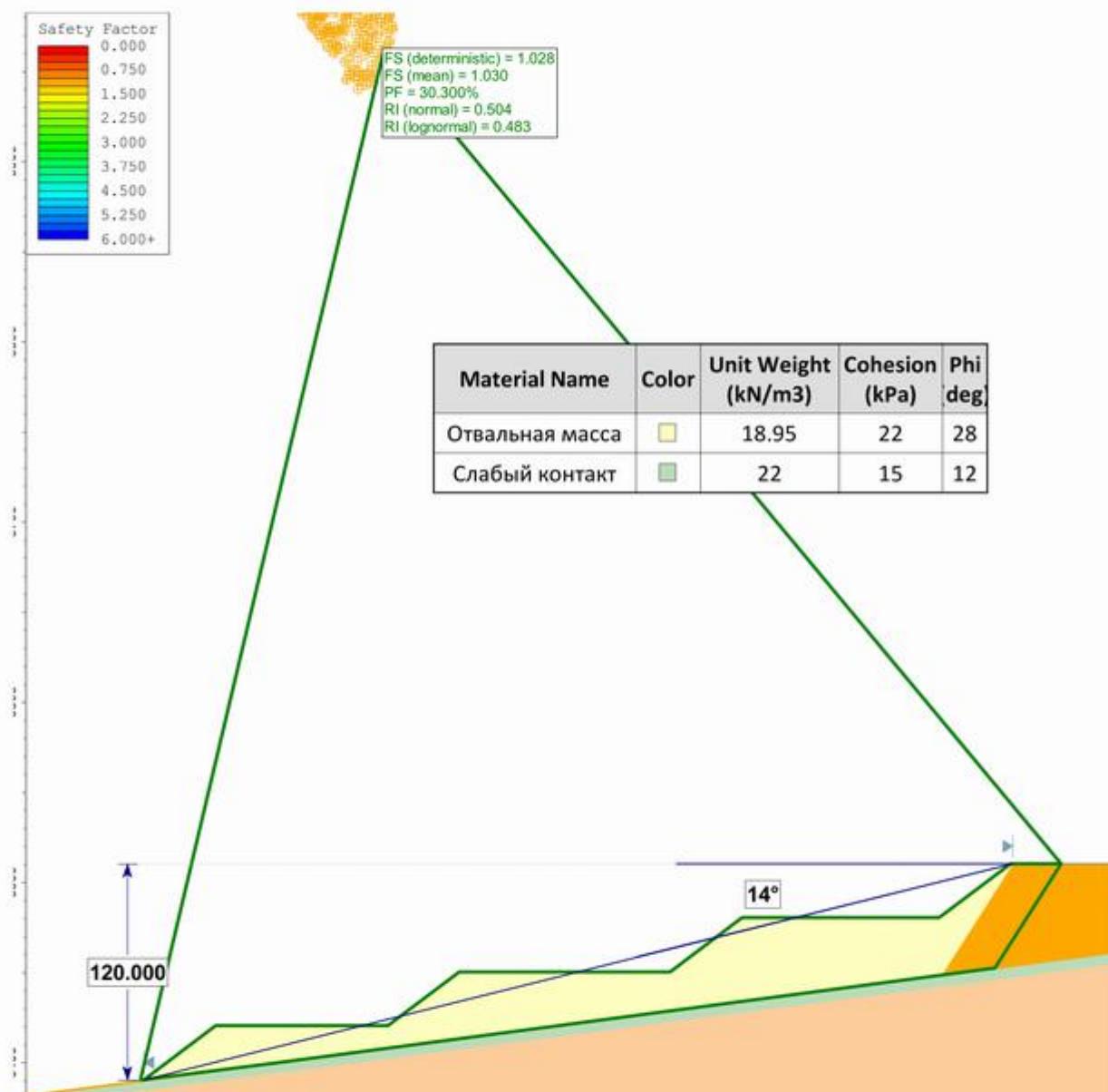


Рисунок 3.11 – Схема к оценке вероятности реализации деформации ПТС "отвал-основание" по сценарию 5:

FS (deterministic) – критерий *n* при детерминистическом расчете;
 FS (mean) – критерий *n* при вероятностном расчете; PF – вероятность обрушения;
 RI (normal) и RI (lognormal) – индекс надежности при распределении коэффициентов устойчивости соответственно нормально и логарифмически; Material Name – имя материала; Color – цвет; Unit Weight, kN/m³ – удельный вес, кН/м³; Cohesion, kPa – сцепление, кПа; Phi, deg – угол внутреннего трения, градус.

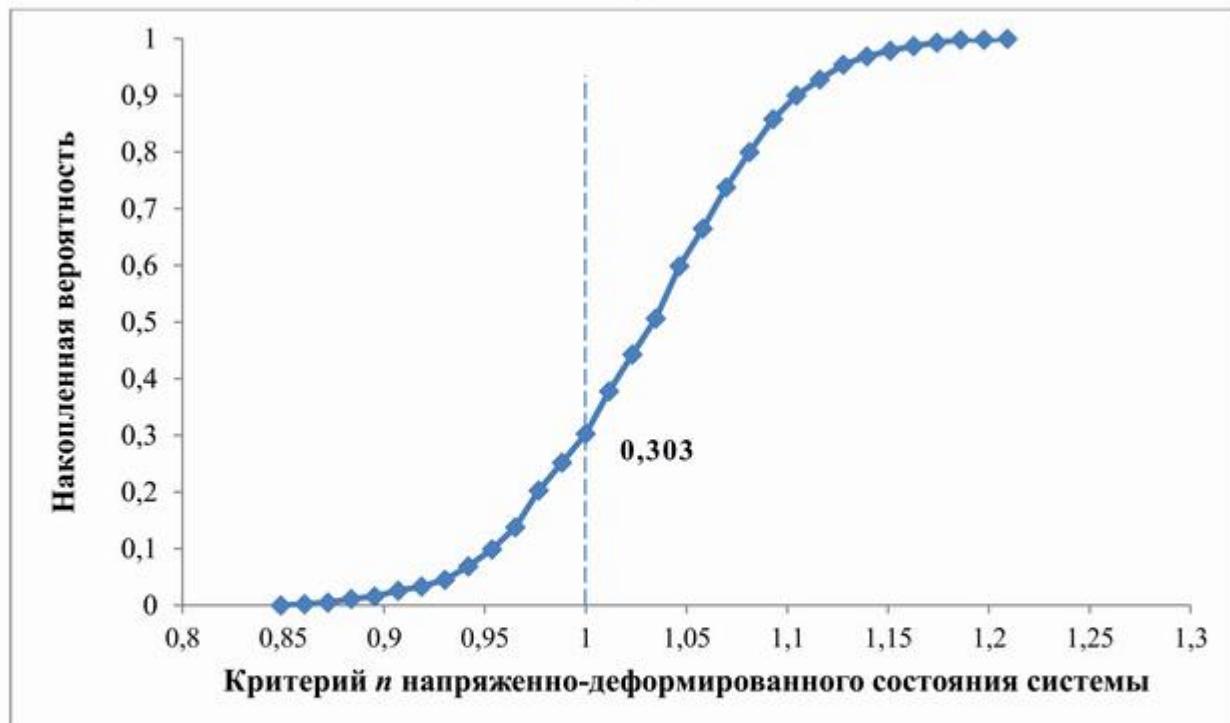


Рисунок 3.12 – Накопленная вероятность (кумулята) коэффициента устойчивости n_p по сценарию 5

Максимальный уровень риска развития деформаций для анализируемой модели ПТС "отвал-основание" прогнозируется как "высокий" – Е4 при высокой степени вероятности по сценариям: значение угла внутреннего трения пород основания оказалось хуже принятого при расчетах; угол наклона основания оказался выше принятого при расчетах; подъем уровня воды в основании/теле отвала. По всем остальным сценариям вероятность возникновения деформации "низкая" или "очень низкая".

Исходя из количественной оценки риска развития деформаций и изучения влияния нагрузок и воздействий (§3.3) для анализируемой модели ПТС "отвал-основание" (индекс по рисунку 2.4 – II.B.1.л) установлено, что увеличение наклона или уменьшение угла внутреннего трения основания, а также подъем уровня воды с вероятностью около 30% приведут к деформации отвала, при этом уровень риска по этим сценариям оценивается как высокий.

Таблица 3.6 – Уровень риска развития деформаций для модели ПТС "отвал-основание"

Сценарий	Вероятность обрушения	Тяжесть последствий	Уровень риска
1	2	3	4
1. Значение плотности отвальной массы оказалось хуже принятого при расчетах	очень низкая (< 1%)	средняя	средний E4
2. Значение сцепления отвальной массы оказалось хуже принятого при расчетах	очень низкая (< 1%)		средний E4
3. Значение угла внутреннего трения отвальной массы оказалось хуже принятого при расчетах	очень низкая (< 1%)		средний E4
4. Значение сцепления пород основания оказалось хуже принятого при расчетах	очень низкая (< 1%)		средний E4
5. Значение угла внутреннего трения пород основания оказалось хуже принятого при расчетах	высокая (30,3%)		высокий B4
6. Превышена проектная высота отвала	низкая (1,8%)		средний E4
7. Превышено проектное значение результирующего угла наклона отвала	низкая (1,3%)		средний E4
8. Угол наклона основания оказался выше принятого при расчетах	низкая (31,2%)		высокий B4
9. Подъем уровня воды в основании/теле отвала	высокая (32,5%)		высокий B4
10. Сейсмические воздействия интенсивнее ожидаемых	очень низкая (< 1%)		средний E4

3.6 Выводы по главе 3

1. Анализом риска развития деформаций методом "Анализ дерева отказов" (Fault Tree Analysis – "FTA") установлены причинно-следственные связи нарушения устойчивости природно-технических систем "отвал-основание" (рисунок 3.6). В результате количественной оценки вероятности обрушения и экспертной оценки тяжести последствий, по матрице рисков установлен уровень геомеханического риска для каждого сценария развития деформаций испытуемой модели (таблица 3.10).

2. Снижение риска развития деформаций и нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание" обеспечиваются за счет внедрения геомеханического мониторинга. На основании сравнения результатов натурных наблюдений с критериальными значениями оценивают уровень риска развития деформаций

и нарушения устойчивости откосов отвалов и разрабатывают специальные мероприятия, повышающие реактивные силы ПТС "отвал-основание", приведенные на рисунке 3.2.

3. Анализ влияния нагрузок и воздействий на напряженно-деформируемое состояние для модели природно-технической системы "отвал-основание" (внешний отвал со слабым контактом в основании – II.B.1) позволил установить:

- незначительные приращения аргументов: уменьшение угла внутреннего трения ($\Delta\varphi'=0,5^\circ$) или увеличение угла наклона основания отвала ($\Delta\beta=2^\circ$), либо результирующего угла отвала ($\Delta\alpha=1^\circ$) приведут к превышению допустимого отклонения коэффициента устойчивости от нормативного значения – 5%. Одновременное отклонение этих аргументов вызовет развитие деформаций и нарушение устойчивости сооружения.

- коэффициент устойчивости природно-технической системы "отвал-основание" связан линейным уравнением регрессии с коэффициентом обводнения, определяющим сопротивление сдвигу по подошве отвала φ' (при коэффициенте регрессии -0,0074). При коэффициенте обводнения отвала $k=0,3$, коэффициент устойчивости окажется меньше нормативного значения, при последующем повышении уровня воды в теле отвала начнется развитие деформаций и при $k=0,5$ наступит предельное напряженно-деформируемое состояние отвала.

Решение второй научной задачи по исследованию влияние нагрузок и воздействий на устойчивость ПТС "отвал-основание", установление регрессионных зависимостей коэффициента устойчивости от факторных показателей и их предельных диапазонов, позволяет перейти к обоснованию критериев оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании на основе геомеханического мониторинга.

4 ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО РИСКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ НА НАКЛОННОМ ОСНОВАНИИ

В соответствии с существующими подходами к геомеханическому мониторингу [37], прогноз устойчивости ПТС "отвал-основание" базируется на характеристиках массива, влияющих на его состояние. При этом обоснованность выводов о потенциальной опасности смещения массива обеспечивается методикой геомеханического мониторинга [113] и интерпретацией его результатов, включающей следующие элементы:

- требования к точности измерений;
- выбор контрольно-измерительной аппаратуры;
- обоснование конструкции наблюдательной станции;
- выбор метода наблюдений;
- интерпретация результатов;
- обоснование критериев оценки уровня геомеханического риска развития деформаций отвалов на наклонном основании;
- оценка уровня геомеханического риска нарушения устойчивости отвалов, расположенных на наклонном основании, и прогноз их устойчивости.

Геомеханический мониторинг отвалов имеет свои особенности, которые связаны с влиянием нагрузок и воздействий на устойчивость сооружений, рельефом местности и процессами уплотнения разрыхленной отвальной массы.

Главными задачами методики геомеханического мониторинга являются: создание конструкций наблюдательных станций, отражающих тип ПТС "отвал-основание", механизмы и схемы деформирования пород отвала и основания и позволяющих обнаружить деформации на начальных этапах их проявления; определение критериальных значений скорости смещения отвального массива для сопоставления результатов инструментальных наблюдений и на этой основе оценивать уровень геомеханического риска развития

деформаций и нарушения устойчивости отвала. В существующей нормативной и методической документации информация в последовательной увязке упомянутых выше аспектов не приводится.

Для решения поставленных задач для природно-технической системы "отвал-основание" выполнена типизация по условиям её формирования, влияющим на устойчивость (см. рисунок 2.4); установлены возможные сценарии развития деформаций и их вероятности (см. рисунок 2.5); разработаны механизмы и схемы деформирования (см. таблицу 2.2); исследовано влияние нагрузок и воздействий на устойчивость откосов (см. таблицу 3.4); выполнена оценка уровня риска развития деформаций и нарушения устойчивости (см. таблицу 3.6); проведены натурные эксперименты по реализации рекомендуемой методики геомеханического мониторинга на горных предприятиях (§2.3).

4.1 Разработка конструкции наблюдательной станции

Конструкция наблюдательной станции включает схему расположения исходных, опорных и рабочих реперов (рисунок 4.1), их привязку к пунктам государственной геодезической сети (ГГС).



Рисунок 4.1 – Состав и назначение реперов наблюдательной станции

В качестве исходных реперов чаще всего используют пункты ГГС, опорные закладывают в местах, где обеспечивается их длительная сохранность.

При разработке конструкции наблюдательной станции ставилась цель - обнаружение деформаций на ранней стадии их возникновения при минимальном количестве рабочих реперов. На основании натурных экспериментов (§ 2.3), анализа вероятных схем деформирования ПТС "отвал-основание" разработаны три вида конструкций наблюдательных станций для проведения инструментальных наблюдений, а также выделены механизмы и схемы деформирования отвалов, когда достаточно выполнять только визуальные наблюдения [93].

Обычно деформации ПТС "отвал-основание" по схемам 1 и 2 (см. таблицу 2.2) не создают серьезных негативных последствий для окружающей среды. Происходит закономерный процесс уплотнения и выплаживания откосов. Поэтому при этих схемах деформирования ПТС "отвал-основание" достаточно вести визуальные наблюдения или съемку беспилотной авиационной системой (БАС) поверхности приоткосной части отвала. Однако, в случае увеличения амплитуды раскрытия трещин, появления трещин криволинейного очертания с замыканием на откос – работы по формированию отвалов нужно остановить и организовать инструментальные наблюдения. При этом конструкцию наблюдательной станции выбирать в соответствии со схемой деформирования ПТС "отвал-основание" (см. таблицу 2.2).

Конструкция наблюдательной станции **НС-1** (рисунок 4.2) рекомендуется для инструментальных наблюдений за отвалами всех типов пород (**I, II, III**), расположенных на прочном (**A**) основании или со слабым контактом в основании (**B**), при наклоне основания согласно с откосом, когда сопротивление сдвигу по подошве отвала ϕ' под воздействием негативных факторов становится меньше угла его наклона β (**2**) это **схемы 3 и 4** деформирования ПТС "отвал-основание".

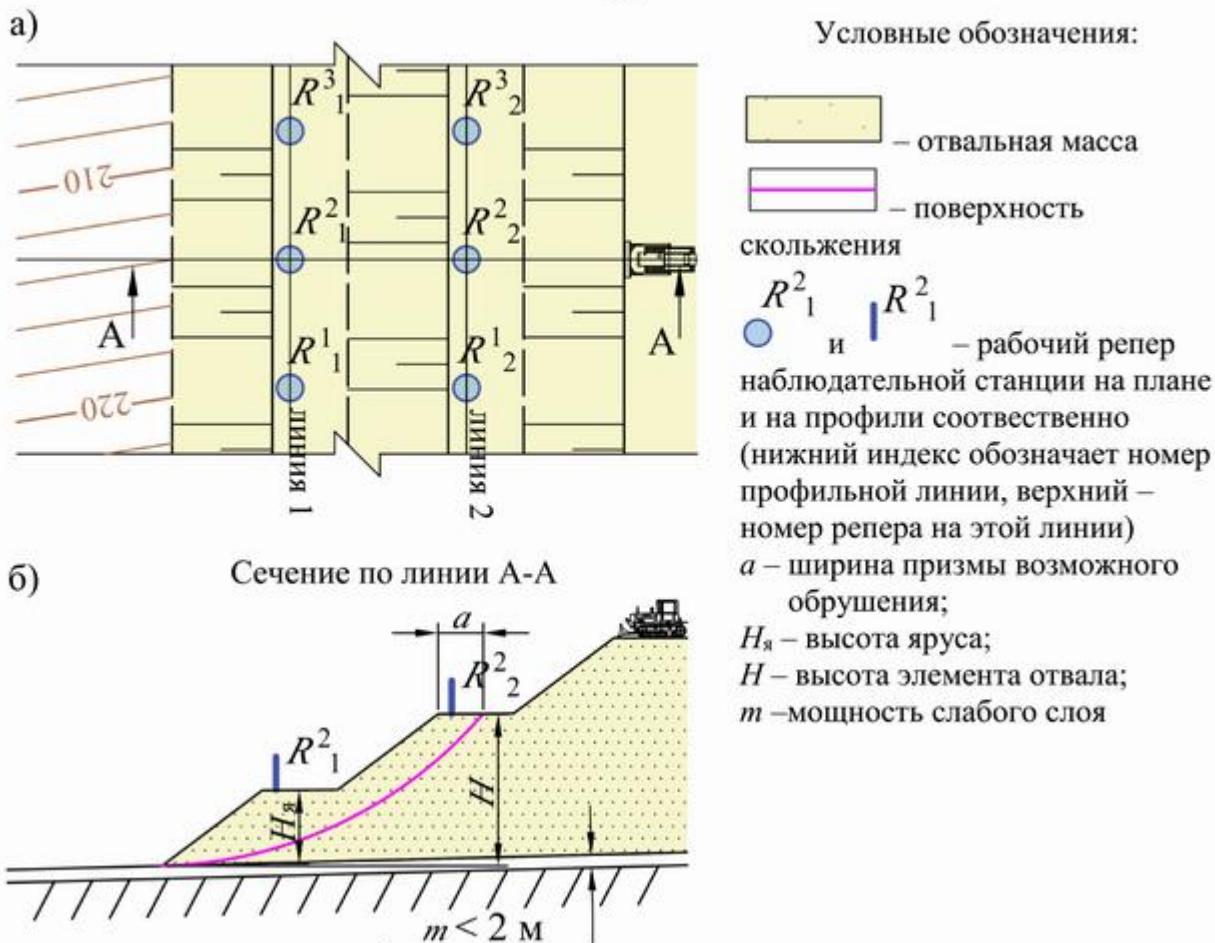


Рисунок 4.2 – Конструкция наблюдательной станции НС-І:
а) план; б) сечение по линии А-А

Деформации по схемам 3 и 4 относятся к оползням подошвенного (контактного) типа. Контактные оползни – наиболее распространенный вид деформаций и приводят к серьезным последствиям, так как смещение отвального массива может происходить до тех пор, пока отвальная масса упрется в препятствие (например, рельеф основания будет иметь обратный уклон). За счет сил гравитации от верхних ярусов по контакту со слоистым основанием, первым начинает смещаться нижний ярус, затем второй и так последовательно происходит сдвиг по подошве всего отвала. При потенциальной возможности деформирования ПТС "отвал-основание" по схемам 3 и 4 необходимо организовать мониторинг от начала формирования отвалов.

Для инструментальных наблюдений рабочие реперы закладывать на двух нижних ярусах отвала вдоль верхней бровки в пределах призмы воз-

многоного обрушения. Такое расположение реперов позволяет на ранней стадии обнаружить начало оползневых процессов.

Смещения, возникающие на нижнем ярусе отвала (реперы R^1_1, R^2_1, R^3_1) могут свидетельствовать о деформации, как яруса, так и отвала в целом. Поэтому необходима профильная линия на втором ярусе. Появление смещений в плане по реперам R^1_2, R^2_2, R^3_2 указывает на деформацию сдвига всего отвального массива.

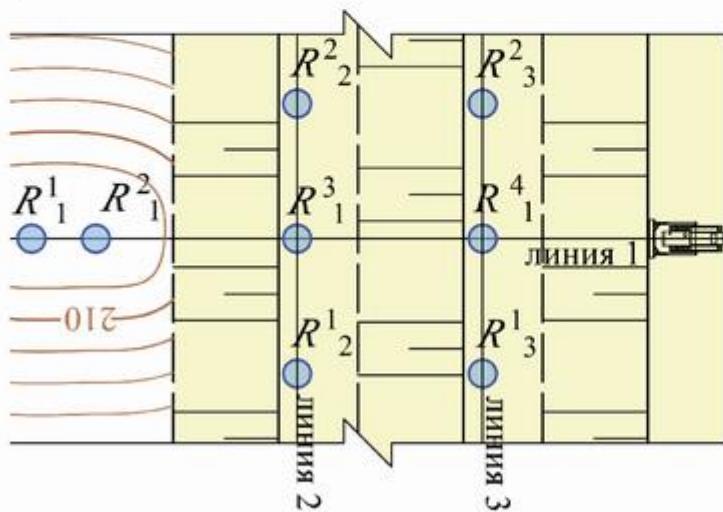
Конструкция наблюдательной станции **НС-II** рекомендуется для инструментальных наблюдений при формировании всех типов отвалов, расположенных на слабом основании (**Б**) и особенно при наличии в основании логов. В этом случае происходит вращение или вращательно-плоский сдвиг с выпором по **схемам 5 и 6** деформирования ПТС "отвал-основание".

Деформации по схемам **5** и **6** относятся к оползням подподошвенного типа, являются наибольшими по объему и последствиям по сравнению с надподошвенными и подошвенными оползнями. В этом случае слабые породы основания под действием гравитационных сил отвальной массы пород выдавливаются перед нижней бровкой в виде вала "выпирания". Как показывают наблюдения, для подподошвенных оползней характерна различная по продолжительности скрытая стадия деформаций, когда отвальная масса пород погружается в слабые породы основания. Деформация может проявляться неожиданно без предварительных внешних проявлений (отсутствие на поверхности отвала трещин, заколов). Поэтому мониторинг за такими деформациями необходимо начинать от начала формирования отвала при этом основное внимание акцентировать на подошву отвала вдоль нижней бровки нижнего яруса, так как первым признаком начала деформаций является появление вала "выпирания".

Для геомеханического мониторинга ПТС "отвал-основание" закладывать наблюдательную станцию, состоящую из трех профильных линий (рисунок 4.3): одну (линия 1) вдоль тальвега лога, вторую (линия 2) – на берме вдоль нижнего (первого) яруса отвала, третью (линия 3) – на берме вдоль

второго яруса. По профильной линии 1 два-три репера закладывать в основании за границей отвала для наблюдения за движением пород в области вала выпирания.

а)



Условные обозначения:

- [Yellow shaded area] – отвальная масса
- [Pink line] – поверхность скольжения
- [Dashed line] – слабое основание
- R^2_1 и R^2_1 – рабочий репер наблюдательной станции на плане и на сечении соответственно (нижний индекс обозначает номер профильной линии, верхний – номер репера на этой линии)

a – ширина призмы возможного обрушения;
b – ширина вала выпирания
 H – высота элемента отвала
 H_a – высота яруса
 H_o – высота элемента отвала

б)

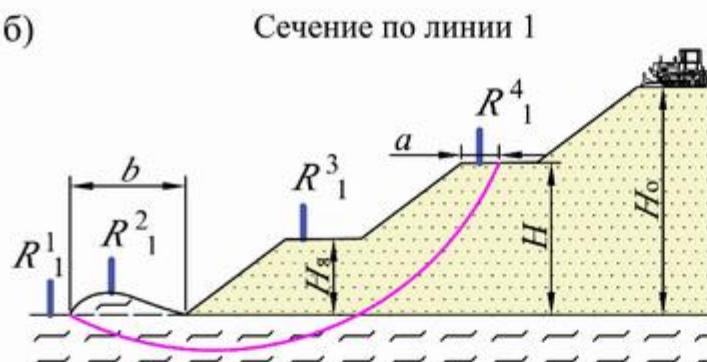


Рисунок 4.3 – Конструкция наблюдательной станции НС-II:
 а) план; б) сечение по линии 1

Для установления границы деформаций на профильных линиях 2 и 3 через 20-50 м (на пологих склонах) закладывать по два репера на каждом ярусе отвала параллельно реперам линии 1 со стороны склонов. При крутых склонах реперы R^2_3 , R^2_2 , R^1_3 и R^1_2 закладывать на линии водораздела.

Ведение работ по отвалообразованию не позволит обеспечить сохранность рабочих реперов, поэтому на действующих отвалах закрепление реперов нужно производить на нижних ярусах, так как смещение отвальных масс происходит по контакту отвала с основанием.

Для реперов R^3_1 и R^4_1 характерно смещение сначала вертикально вниз, затем горизонтально в сторону откоса, для репера R^2_1 – смещение в вертикальной плоскости со знаком "+". Векторы смещения реперов R^2_3 , R^2_2 , R^1_3 и R^1_2 будут иметь направление в сторону тальвега лога.

Конструкция наблюдательной станции **НС-III** рекомендуется при формировании отвалов всех типов (**I**, **II**, **III**), расположенных на подработанной подземными горными выработками территории (**Г**), когда направление откоса отвала совпадает с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения (**4**). Изначально происходит просадка отвальных пород в границах мульды сдвижения (схема **1**), затем, в зависимости от состава отвальной массы, смещение отвала к центру мульды сдвижения (схемы **3** или **4**).

Конструкция наблюдательной станции **НС-III** разработана на основании натурных экспериментов ведения мониторинга отвалов, расположенных на поработанной территории, и с учетом влияния процессов сдвижения на земную поверхность.

Перед закладкой наблюдательной станции нужно отстроить на плане мульду сдвижения, границы плоского дна, точку максимального оседания земной поверхности, рельеф на площадке под отвалом.

Наблюдательная станция **НС-III** должна включать не меньше трех профильных линий (рисунок 4.4): одну (линия 1) вдоль главного сечения мульды сдвижения и тальвега лога, вторую (линия 2) – на берме вдоль нижнего (первого) яруса отвала, третью (линия 3) – на берме вдоль второго яруса. По профильной линии 1 репер закладывать в основании, за границей отвала.

Для установления границы деформации на профильных линиях 2 и 3 закладывать по два репера на каждом ярусе отвала параллельно реперам линии 1 на границе мульды сдвижения – R^2_3 , R^2_2 , R^1_3 и R^1_2 .

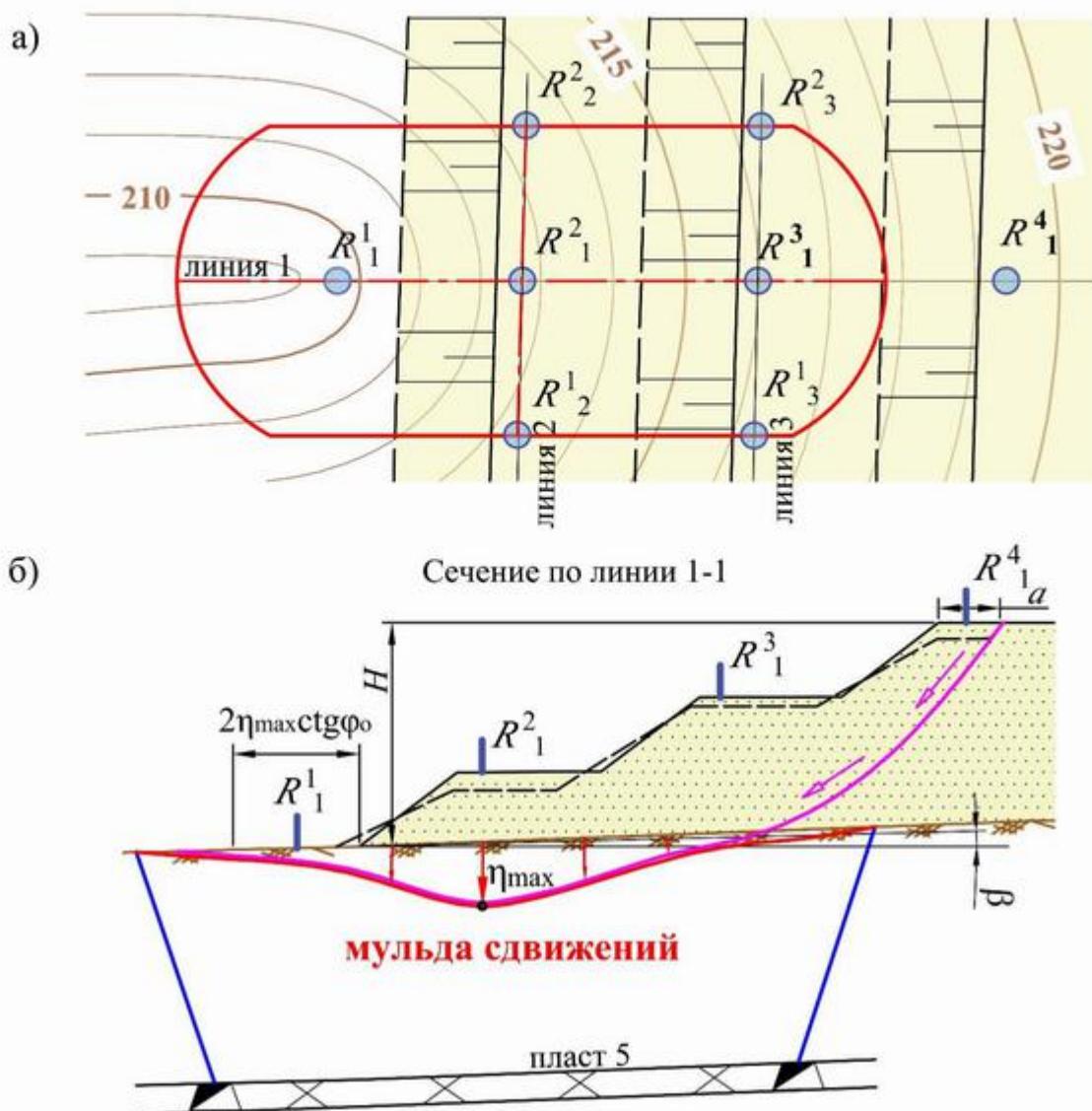


Рисунок 4.4. Конструкция наблюдательной станции НС-III:
а) план; б) сечение по линии 1-1

- отвальная масса
- поверхность скольжения
- – граница мульды сдвижения
- и – рабочий репер наблюдательной станции на плане и на сечении соответственно (нижний индекс обозначает номер профильной линии, верхний – номер репера на этой линии)
- a – ширина призмы возможного обрушения
- H – высота отвала
- ϕ_0 – граничный угол сдвижения в наносах
- – главные сечения мульды сдвижений
- ← – направление оседания дневной поверхности
- ← – вектор смещения отвальной массы

Для реперов R^3_1 и R^2_1 характерно смещение сначала вертикально вниз, затем горизонтально в сторону откоса, для репера R^1_1 – смещение в верти-

кальной плоскости со знаком "минус" характерно осадке в результате подработки, со знаком "плюс" – активизации смещения отвального массива с образованием вала выпирания в основании отвала. Векторы смещения реперов R^2_3 , R^2_2 , R^1_3 и R^1_2 направлены в сторону точки максимального оседания мульды сдвижения.

4.2 Интерпретация результатов геомеханического мониторинга

4.2.1 Требования к точности наблюдений

Точность наблюдений регламентируется нормативной документацией. При этом исходят из целесообразности ориентироваться на минимальные значения, которые поддаются интерпретации, а также на реально возможную точность определения смещений имеющимися средствами и методами измерений.

Для ПТС "отвал-основание" в соответствии с требованиями ГОСТ 24846-2019 [114] класс точности измерений вертикальных и горизонтальных перемещений – IV, для которого допускаемая погрешность измерения перемещений составляет: вертикальных ± 10 мм; горизонтальных ± 15 мм.

Федеральными нормами и правилами (ФНиП) "Правила обеспечения устойчивости..." [2] рекомендована точность положения точек наблюдений при мониторинге отвалов не больше ± 30 мм.

Таким образом, исходя из рекомендаций, определенных ГОСТ 24846-2019 [114], и ФНиП [2], реальной возможности современных высокоточных и точных средств измерений, анализа экспериментальных данных по наблюдениям за объектами горнодобывающих предприятий средняя квадратическая погрешность определения смещения репера для двух серий наблюдений при мониторинге отвалов в плане и по высоте составит – $m_D = 30\sqrt{2} = 42$ мм.

При выборе контрольно-измерительной аппаратуры необходимо руководствоваться среднеквадратической погрешностью определения положения репера, которая зависит от точности прибора и удаленности рабочего репера

от опорного и при мониторинге за отвалом не должна превышать в плане и по высоте ± 30 мм.

4.2.2 Методы наблюдений за деформациями ПТС "отвал-основание"

Выбор метода наблюдений зависит от схемы деформирования ПТС "отвал-основание" (см. таблицу 2.2); скорости развития деформаций; возможности доступа к рабочим реперам наблюдательной станции, рельефа местности.

Обработка результатов геомеханического мониторинга маркшейдерско-геодезическими методами и спутникового определения координат выполняется в программе "*Deformation control*" (рисунок 4.5), алгоритм которой разработан автором.

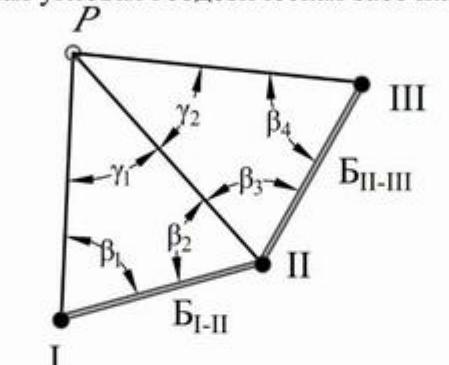
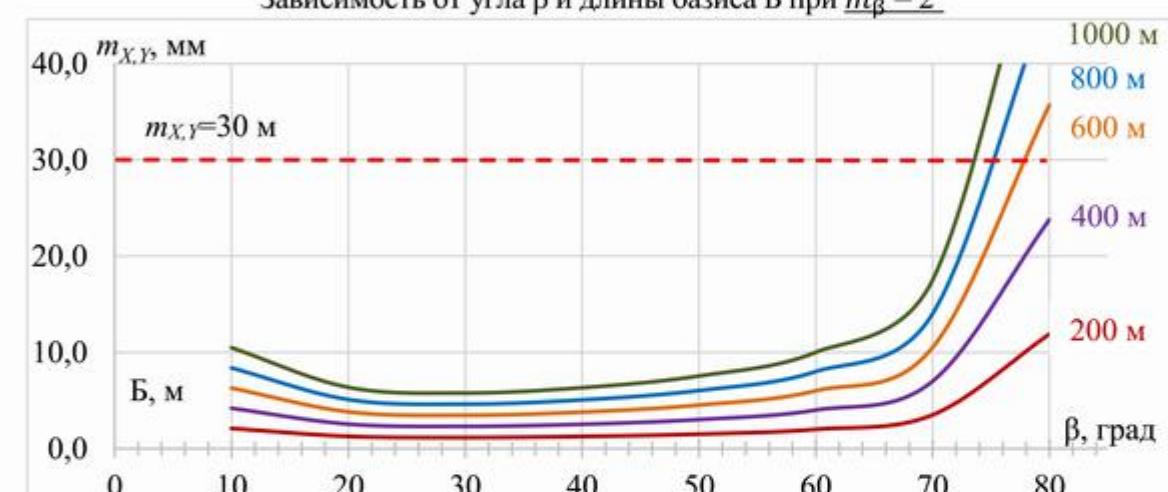
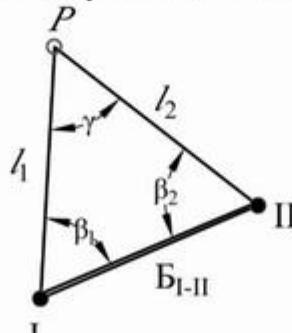
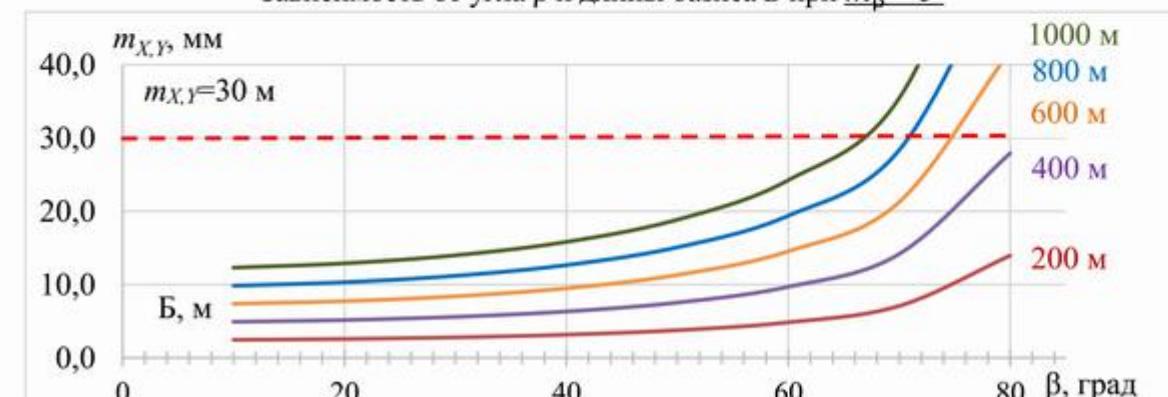
Информация об основных методах наблюдений за деформациями [115-118], формулы и номограммы для определения средней квадратической погрешности (СКП) положения реперов в плане ($m_{x,y}$) и по высоте (m_h) различными средствами измерения и их технические характеристики приведены в таблице 4.1.

4.2.3 Оценка устойчивости отвала по результатам геомеханического мониторинга

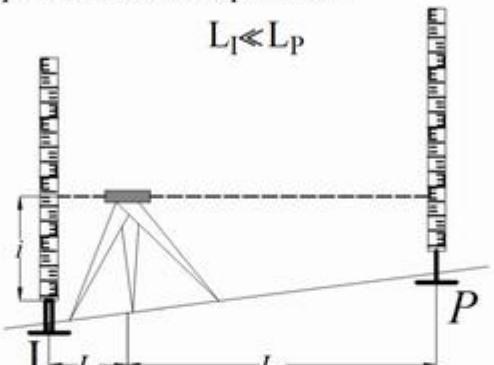
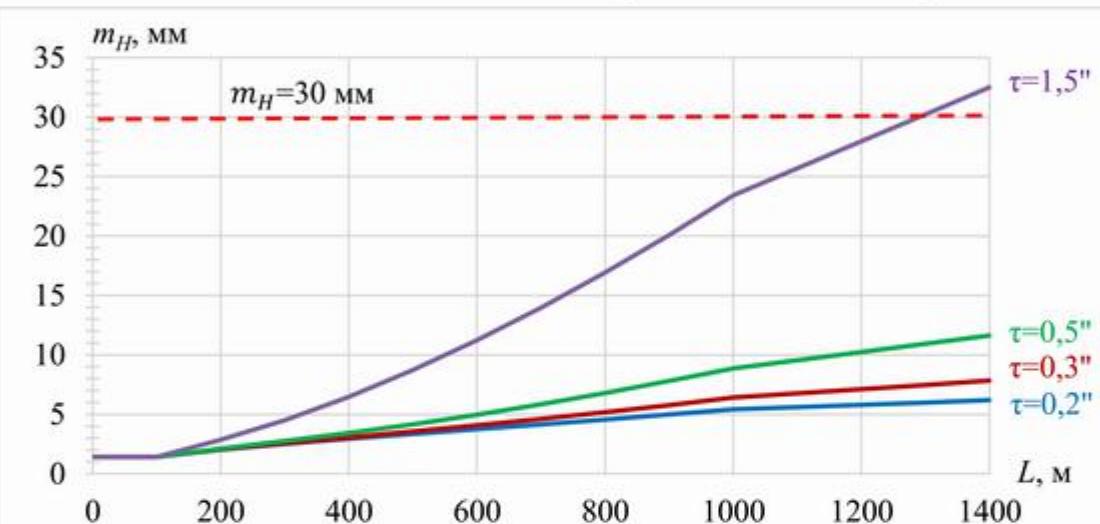
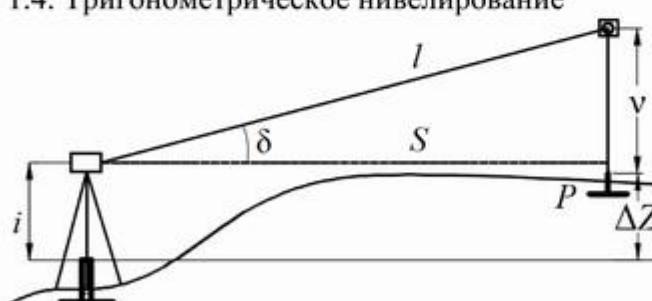
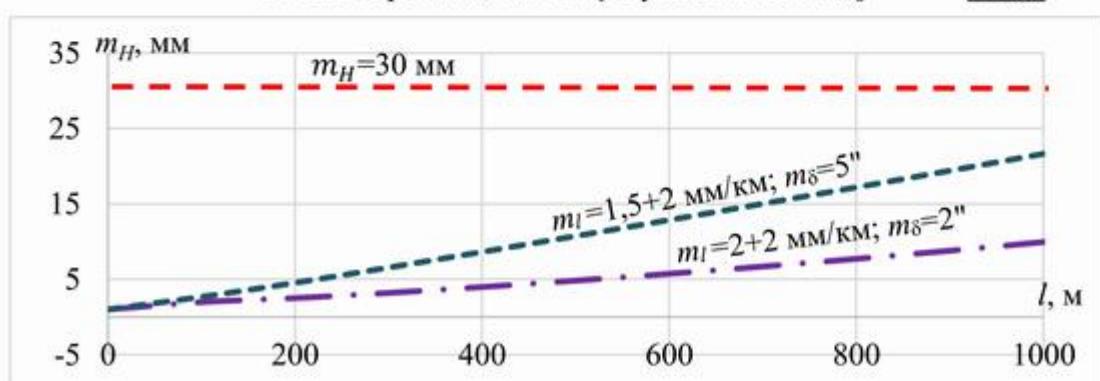
Оценка устойчивости ПТС "отвал-основание" по результатам визуальных и инструментальных наблюдений маркшейдерско-геодезическими методами и спутникового определения координат включает четыре этапа.

1) По абсолютным значениям смещений $\Delta X_{1,2}$ и $\Delta Y_{1,2}$ между первой и второй сериями от исходного положения рабочего репера строят траекторию его смещения в плане (полный вектор $\Delta P_{1,2}$). Рядом с полным вектором подписывают смещение по высоте $\Delta H_{1,2}$. Из конца вектора $\Delta P_{1,2}$ строят полный вектор смещения между второй и третьей сериями $\Delta P_{2,3}$, вычисленный по величинам смещений $\Delta X_{2,3}$ и $\Delta Y_{2,3}$ и т.д.

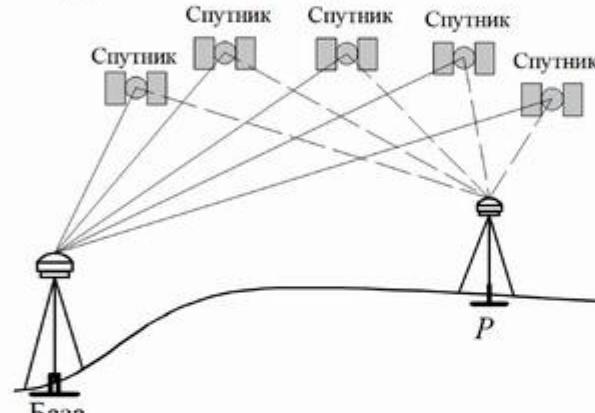
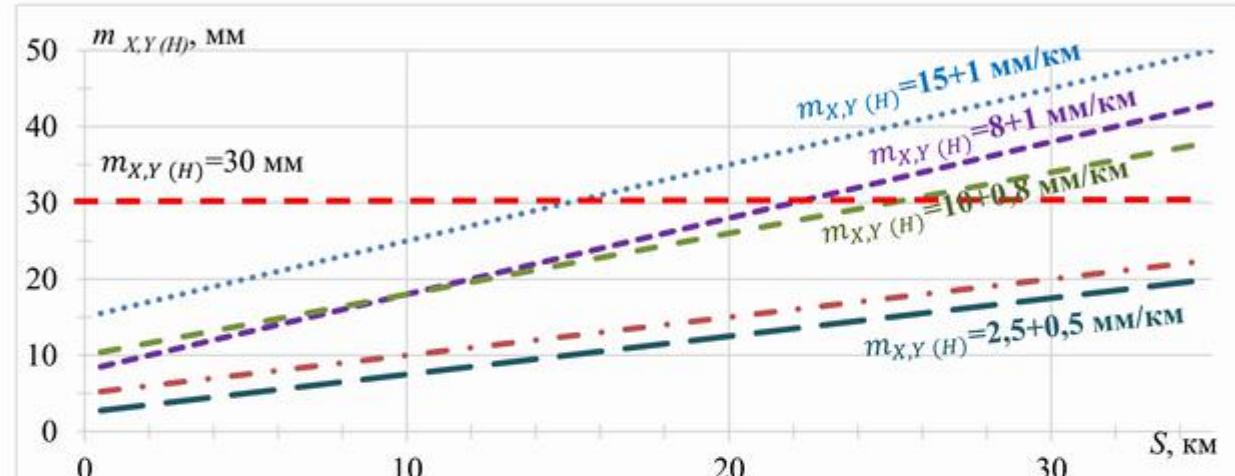
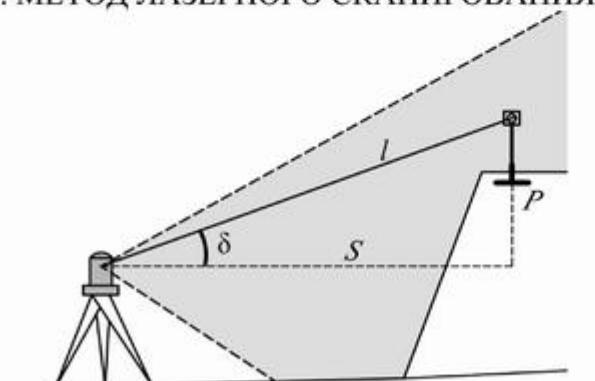
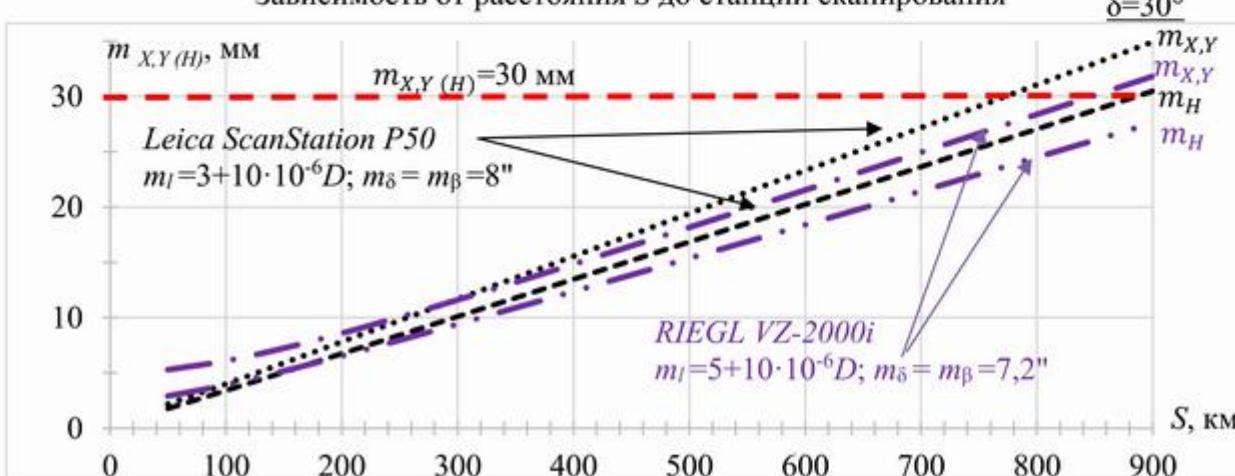
Таблица 4.1 – Методы определения деформаций природно-технических систем "отвал-основание"

Схема и формула определения погрешности положения репера	Номограмма для определения погрешности положения рабочего репера в плане ($m_{x,y}$), по высоте (m_H)
1. МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МЕТОД 1.1. Прямая угловая геодезическая засечка  $m_{x,y} = \frac{m_\beta B}{2\rho\cos\beta\sin2\beta\sqrt{1+\cos^22\beta}}$	<p>Зависимость от угла β и длины базиса Б при $m_\beta = 2''$</p> 
1.2. Прямая линейно-угловая геодезическая засечка  $m_{x,y} = \frac{m_\beta B}{2\rho\cos\beta}$	<p>Зависимость от угла β и длины базиса Б при $m_\beta = 5''$</p> 

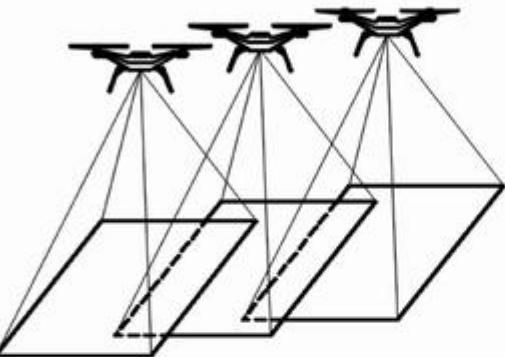
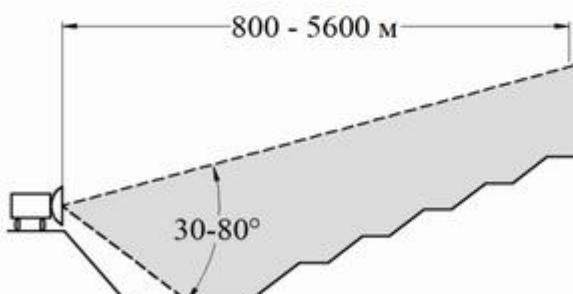
Продолжение таблицы 4.1

Схема и формула определения погрешности положения репера	Номограмма для определения погрешности положения рабочего репера в плане ($m_{x,y}$), по высоте (m_H)																																				
<p>1.3. Геометрическое нивелирование</p>  $L_f \ll L_p$ $m_H = \sqrt{m_\tau^2 + m_{tp}^2 + m_{hp}^2 + m_{d\Delta}^2 + m_o^2}$	<p>Зависимость от длины хода L и погрешности компенсатора τ</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data points from the graph</caption> <thead> <tr> <th>L, м</th> <th>m_H, мм ($\tau=1.5''$)</th> <th>m_H, мм ($\tau=0.5''$)</th> <th>m_H, мм ($\tau=0.2''$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>200</td><td>3</td><td>1.5</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>400</td><td>8</td><td>3.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>600</td><td>15</td><td>6.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>800</td><td>23</td><td>9.5</td><td>6.5</td></tr> <tr><td>1000</td><td>31</td><td>12.5</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>1200</td><td>39</td><td>15.5</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>1400</td><td>47</td><td>18.5</td><td>12.5</td></tr> </tbody> </table>	L , м	m_H , мм ($\tau=1.5''$)	m_H , мм ($\tau=0.5''$)	m_H , мм ($\tau=0.2''$)	0	0	0	0	200	3	1.5	1.0	400	8	3.5	2.5	600	15	6.5	4.5	800	23	9.5	6.5	1000	31	12.5	8.5	1200	39	15.5	10.5	1400	47	18.5	12.5
L , м	m_H , мм ($\tau=1.5''$)	m_H , мм ($\tau=0.5''$)	m_H , мм ($\tau=0.2''$)																																		
0	0	0	0																																		
200	3	1.5	1.0																																		
400	8	3.5	2.5																																		
600	15	6.5	4.5																																		
800	23	9.5	6.5																																		
1000	31	12.5	8.5																																		
1200	39	15.5	10.5																																		
1400	47	18.5	12.5																																		
<p>1.4. Тригонометрическое нивелирование</p>  $m_H = \sqrt{m_l^2 \operatorname{tg}^2 \delta + \frac{m_\delta^2 S^2}{\rho^2 \cos^4 \delta} + m_i^2 + m_v^2 + \frac{m_k^2 S^4}{4R^2}}$	<p>Зависимость от расстояния l между опорным и рабочим реперами, СКП измерения длины m_l и угла наклона m_δ $\delta=30^\circ$</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data points from the graph</caption> <thead> <tr> <th>l, м</th> <th>m_H, мм ($m_l = 1.5+2$, $m_\delta = 5$)</th> <th>m_H, мм ($m_l = 2+2$, $m_\delta = 2$)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>200</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>400</td><td>8</td><td>4</td></tr> <tr><td>600</td><td>12</td><td>6</td></tr> <tr><td>800</td><td>16</td><td>8</td></tr> <tr><td>1000</td><td>20</td><td>10</td></tr> </tbody> </table>	l , м	m_H , мм ($m_l = 1.5+2$, $m_\delta = 5$)	m_H , мм ($m_l = 2+2$, $m_\delta = 2$)	0	0	0	200	4	2	400	8	4	600	12	6	800	16	8	1000	20	10															
l , м	m_H , мм ($m_l = 1.5+2$, $m_\delta = 5$)	m_H , мм ($m_l = 2+2$, $m_\delta = 2$)																																			
0	0	0																																			
200	4	2																																			
400	8	4																																			
600	12	6																																			
800	16	8																																			
1000	20	10																																			

Продолжение таблицы 4.1

Схема и формула определения погрешности положения репера	Номограмма для определения погрешности положения рабочего репера в плане ($m_{X,Y}$), по высоте (m_H)
2. МЕТОД СПУТНИКОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ  $m_{X,Y,H} = a \pm b \cdot S$	<p>Зависимость от расстояния S до базовой станции</p> 
3. МЕТОД ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ  $m_{X,Y} = \sqrt{\frac{m_\beta^2}{\rho^2} l^2 + m_l^2}; \quad m_H - \text{см. схему 1.4}$	<p>Зависимость от расстояния S до станции сканирования $\delta=30^\circ$</p> 

Продолжение таблицы 4.1

Схема и формула определения погрешности положения репера	Условные обозначения
4. ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД 	B — длина базиса между опорными реперами, м; γ — угол при рабочем репере, град; $\beta, \beta_1, \beta_{II}$ — измеренные горизонтальные углы, град; δ — вертикальный угол, град; S и D — горизонтальное проложение, м; l — измеренное расстояние, м; $m_{x,y}$ — погрешность положения рабочего репера P в плане, мм; m_h — погрешность положения рабочего репера P по высоте, мм; m_β — погрешность измерения горизонтального угла, с; m_δ — погрешность измерения угла наклона, с; m_i — погрешность измерения высоты инструмента, мм; m_v — погрешность измерения высоты визирования, мм; m_k — погрешность за рефракцию, мм; m_τ — погрешность обусловлена неточностью установки пузырька цилиндрического уровня в нуль пункте, мм; m_{tr} — погрешность отсчета по рейке, мм; m_{nr} — погрешность за наклон рейки, мм; m_{dc} — погрешность в дециметровых делениях рейки, мм; m_o — погрешность округления отсчета, мм; m_τ — погрешность обусловлена неточностью установки пузырька цилиндрического уровня в нуль пункте, мм; m_l — погрешность измерения длины, мм; τ — погрешность компенсатора уровня, сек; ρ — коэффициент для перехода из градусной меры в радианную; R — радиус земли ($R = 6370$ км); a и b — коэффициенты дальномера, определяемые по паспорту прибора ----- — допустимая погрешность определения положения репера
5. МЕТОД РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ 	----- — допустимая погрешность определения положения репера

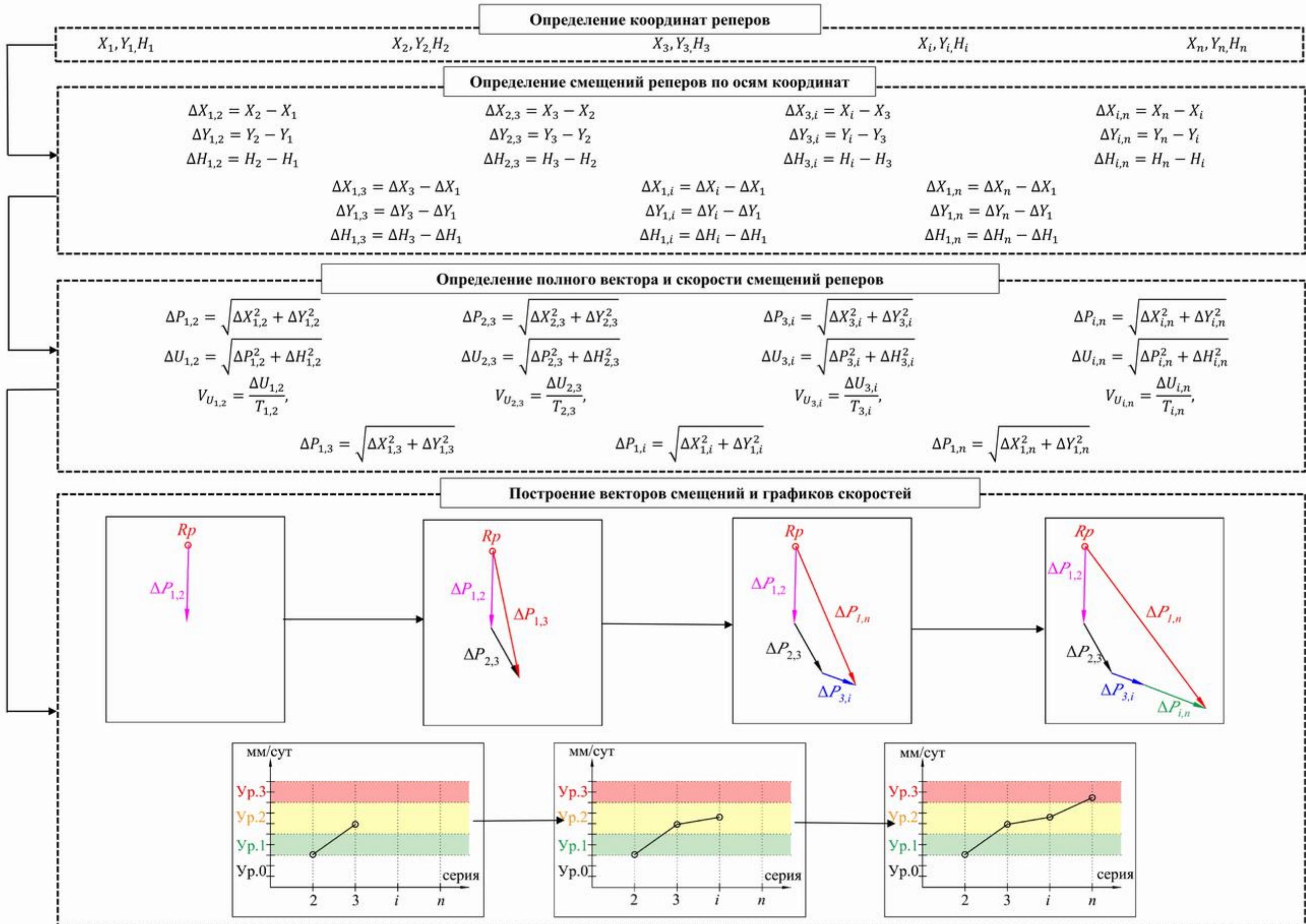


Рисунок 4.5 – Алгоритм интерпретации результатов инструментальных наблюдений за деформациями ПТС "отвал-основание"

С целью уменьшения влияния случайных погрешностей измерений от исходного положения рабочего репера откладывают величины смещений $\Delta X_{1,n}$ и $\Delta Y_{1,n}$ между первой и последней (n -ой) сериями и строят полный вектор смещения за определенный период наблюдений (сезон, год, и т.д.). Плановое (ΔP) и высотное (ΔH) смещения репера характеризуют механизм деформирования (таблица 2.2) массива: если $\Delta P_{1,2} < \Delta H_{1,2}$, говорят о процессе самоуплотнения отвальной массы, при $\Delta P_{1,2} \geq \Delta H_{1,2}$ – о развитии деформации сдвига.

2) Скорости векторов смещения указывают на развитие либо затухание деформационных процессов, по их величинам на качественном и количественном уровнях прогнозируют вероятность развития деформаций и нарушения устойчивости отвала – (ВО).

Анализом визуальных и инструментальных наблюдений устанавливают состояние ПТС "отвал-основание": работоспособное, частично неработоспособное или аварийное и назначают действия по результатам геомеханического мониторинга: уточнить конструкцию наблюдательной станции и периодичность инструментальных наблюдений; определить границу опасной зоны, сократить срок между сериями наблюдений; перейти на дистанционный контроль в режиме реального времени.

Величина и направление векторов смещения позволяют выявить наиболее значимые факторы, влияющие на формирование оползня откоса: рельеф и тип основания, наличие обводненных участков, влияние горных работ, последовательность формирования ярусов отвала и др.

По скорости и направлению смещения векторов оценивают:

- уровень опасности: нормальный, ВНИМАНИЕ, ОПАСНО, СТОП;
- тяжесть последствий (ТП): незначительная, низкая, средняя, высокая, чрезвычайная.

В зависимости от тяжести неблагоприятных последствий принимают технические решения по их снижению: разрабатывают мероприятия, повышающие реактивные силы (см. рисунок 3.2); запрещают ведение горных работ.

3) Ориентация векторов смещений на плане относительно рельефа основания позволяет определить наиболее вероятную схему деформирования ПТС "отвал-основание" (см. таблицу 2.2) и уточнить конструкцию наблюдательной станции (см. рисунки 4.2, 4.3 и 4.4).

4) На основе анализа визуальных наблюдений на качественном уровне, инструментальных – количественном, оценивают уровень геомеханического риска от деформации: весьма низкий; низкий; средний; высокий; очень высокий. В соответствии с уровнем риска нарушения устойчивости отвала определяют меры реагирования: мероприятия не требуются; разработка противооползневых мероприятий по снижению уровня риска до низкого; приостановка работ на участке деформации, вывод людей и техники; запрет на ведение горных работ [2, Приложение 9, таблица 3].

4.3 Определение качественных и количественных критериев оценки результатов геомеханического мониторинга

Для оценки напряженно-деформируемого состояния ПТС "отвал-основание" необходимо сопоставить результаты натурных наблюдений с качественными и количественными диагностическими характеристиками – критериями безопасности, определяющими геомеханический риск развития деформаций и нарушение устойчивости сооружения.

При этом важно понимать, что для свежеотсыпанных отвалов характерны просадки, связанные с уплотнением разрыхленных отвальных пород, которые не представляют опасности. Количественные и качественные характеристики процесса самоуплотнения отвальной массы рассмотрены на графической модели природно-технической системы "отвал-основание" и экспериментальных данных, полученных автором в реальных условиях горных предприятий.

4.3.1. Определение просадок в результате самоуплотнения отвальной массы

Величина просадки в результате уплотнения отвальной массы зависит от ее гранулометрического состава, мощности, угла наклона основания, условий отсыпки, и ориентировочно может быть вычислена методом послойного суммирования по формуле [119]:

$$s = \beta \sum \frac{\sigma_{\text{rp},i} h_i}{E_i}, \quad (4.1)$$

где β – безразмерный коэффициент, равный 0,8; $\sigma_{\text{rp},i}$ – среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в i -ом слое породы по вертикали, кПа; h_i – мощность i -го слоя, м; E_i – модуль деформации i -го слоя породы, кПа.

$$\sigma_{\text{rp},i} = 0,5(\sigma_{z_i} + \sigma_{z_{i-1}}) \quad (4.2)$$

где $\sigma_{z_i}, \sigma_{z_{i-1}}$ – величина вертикального нормального напряжения от нагрузки, создаваемая i -ым слоем породы на глубине z_{i-1} и z_i , кПа.

Расчет просадок в результате самоуплотнения отвальной массы выполнен для модели отвала, принятой по результатам экспериментальных исследований двадцати внешних отвалов со слабым контактом в основании (см. § 3.2), со следующими характеристиками: $H=120$ м, $\alpha=14^\circ$, $C=2,2$ т/м², $\varphi=28^\circ$, $\gamma=1,89$ т/м³.

В зависимости от давности формирования отвала приняты следующие состояния отвальной массы: свежеотсыпанная – срок стояния до одного года; уплотненная – более одного года.

Отвал состоит из 4 ярусов высотой по 30 м: первыми сформированы ярусы гор. +30 м и +60 м; по истечении одного года после завершения отсыпки предыдущих отсыпались ярусы гор. +90 м и +120 м. Состояния отвальной массы от времени её отсыпки приведено в таблице 4.2. Модуль деформации E смеси (песчано-глинистых 25% и скальных 75%) пород состав-

ляет соответственно 16,3 МПа и 25 МПа для свежеотсыпанной и уплотнённой отвальной массы.

Таблица 4.2 – Состояние отвальной массы с течением времени

Горизонт, м	Время стояния яруса отвала, год		
	0-1	1-2	2-3
+30	свежеотсыпанная	уплотненная	уплотненная
+60	свежеотсыпанная	уплотненная	уплотненная
+90	-	свежеотсыпанная	уплотненная
+120	-	свежеотсыпанная	уплотненная

На предыдущий ярус отвала оказывает дополнительную гравитационную нагрузку последующий (вышележащий) ярус. Результаты расчета просадок отвальной массы при углах наклона основания 0° и $7,5^\circ$ приведены в таблице 4.3. Установлено, чем больше угол наклона основания (рисунок 4.6), тем меньше прогнозируются осадки в результате уплотнения.

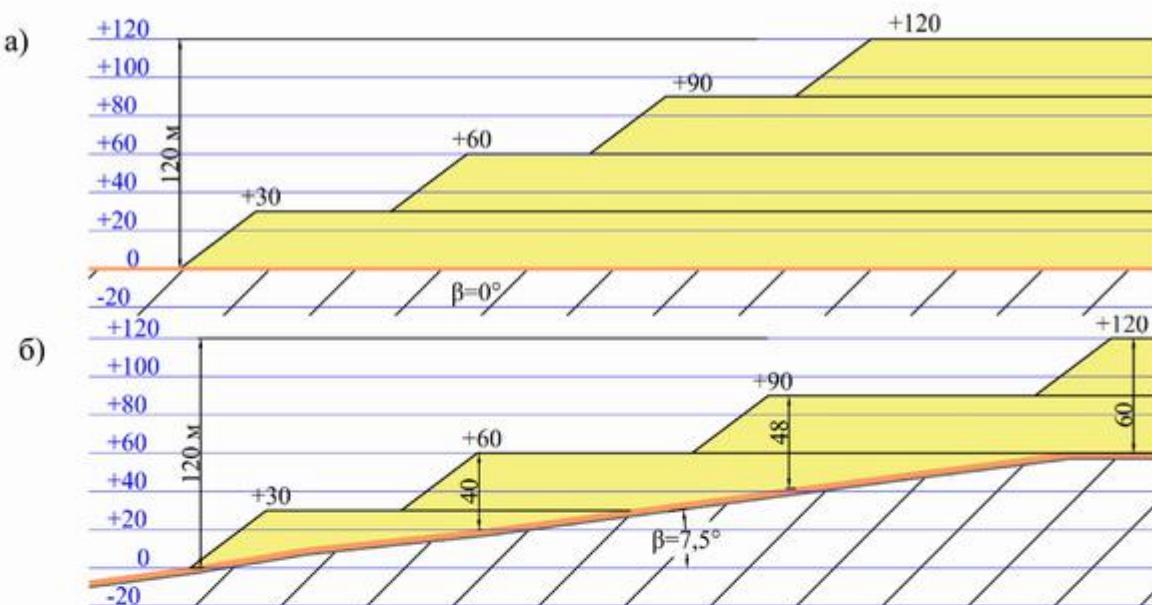


Рисунок 4.6 – Модель отвала при углах наклона основания β : а) 0° ; б) $7,5^\circ$

По полученным значениям просадок и скоростей смещения отвальной массы в вертикальной плоскости при различных углах наклона основания, выявлены определенные закономерности, касающиеся уплотнения отвальной массы:

- максимальные просадки горизонтальных площадок происходят в течение двух лет после начала отсыпки;
- суммарные просадки составляют 5,3 м (при $\beta=0^\circ$) и 7,7 м (при $\beta=7,5^\circ$), средние скорости смещения за весь период 4,8 мм/сут (при $\beta=0^\circ$) и 7,7 мм/сут (при $\beta=7,5^\circ$);
- скорость смещения в вертикальной плоскости в начальный период (первый год) может достигать 10 мм/сут;
- при увеличении угла наклона основания уменьшаются гравитационные нагрузки на основание и нижние ярусы от веса отвала, следовательно, просадки отвальной массы окажутся меньше, чем при отсыпке на горизонтальное основание.

Таблица 4.3 – Прогнозируемые просадки и скорости смещения отвальной массы

	Время стояния отвала, год			
	0-1	1-2	2-3	0-3
Высота отвала, м	60	120	120	120
при $\beta=0^\circ$				
Суммарные просадки, м	1.7	3.6	2.4	7.7
Скорость смещения, мм/сут	4.6	9.8	6.7	7.0
при $\beta=7,5^\circ$				
Суммарные просадки, м	1.4	2.5	1.4	5.3
Скорость смещения, мм/сут	3.9	6.8	3.8	4.8

Прогнозируемые просадки и скорости смещения вследствие уплотнения отвальной массы (см. таблицу 4.3), полученные на модели ПТС "отвал-основание" совпадают с экспериментальными результатами на свежеотсыпанных отвалах фосфогипса, приведёнными в работе [28]: зафиксированы просадки яруса отвала высотой 15 м на 0,25 м/год, высотой 40 м – 1,6 м/год (4,3 мм/сут). В пиковый период скорости проседания площадок достигали 10 мм/сут. За период наблюдений с 2010 по 2016 годы общая просадка отвальной массы для отвала высотой 55 м составила от 6,4 до 8,3 м.

4.3.2. Анализ экспериментальных исследований процесса самоуплотнения свежеотсыпанного отвала

В рамках геомеханического мониторинга опасной зоны – внешний отвал разреза 3⁵, расположенный на наклонном основании, в мае 2015 были заложены реперы наблюдательной станции (рисунок 4.7). В отвал складировались песчано-глинистые и скальные породы (тип отвальной массы – **II**). Основание отвала представлено двумя глубокими оврагами, сложено суглинками и глинами различной консистенции (тип основания – **Б**). Индекс ПТС "отвал-основание" по условиям формирования – **П. Б. 1. л** (см. рисунок 2.4), прогнозируемая схема деформирования – вращение с выпором (см. таблицу 2.2).

В соответствии с наиболее вероятной схемой деформирования для геомеханического мониторинга принята конструкция наблюдательной станции **НС-II** (см. рисунок 4.3). Рабочие реперы заложены на: поверхности (в призме возможного обрушения), откосной части отвала (одна линия над тальвегом лога, две – над склонами) и у подошвы отвала (в предполагаемом районе формирования вала выпирания); вдоль железной и автомобильной дорог, расположенных вдоль подошвы отвала.

Наблюдения велись от опорного репера (базовой станции), расположенного на расстоянии 4,4 км, спутниковой навигационной аппаратурой Topcon GR-5 в режиме RTK (погрешность определения координат: в плане – 10 + 1 мм/км, по высоте – 15 + 1 мм/км). За 3 года выполнено 27 серий наблюдений по отвалу, 11 серий – по железной дороге, 4 серии – по автодороге.

Динамика полного вектора смещения (рисунок 4.8) рабочих реперов, расположенных на отвале, и их скорости (рисунок 4.9)⁶ позволили установить следующую закономерность:

⁵ Процесс деформирования, характеристики отвала и основания подробно приведены в параграфах 1.1 (см. рисунки 1.2 – 1.4) и 2.3 (см. рисунок 2.6).

⁶ На графиках зеленым фоном выделены периоды года, когда смещения реперов на отвале находились в пределах погрешности наблюдений, а скорость уменьшалась (14.10.2015-25.11.2015, 11.04.2016-02.08.2016, 08.08.2017-26.10.2017), желтым – когда смещения превышали погрешность наблюдений, но не

1) Наибольшие плановые смещения произошли в обводнённой части отвала по реперам 2-3 ($\Delta P=592$ мм), который установлен над тальвегом лога, и 3-2 ($\Delta P=267$ мм) – над склоном.

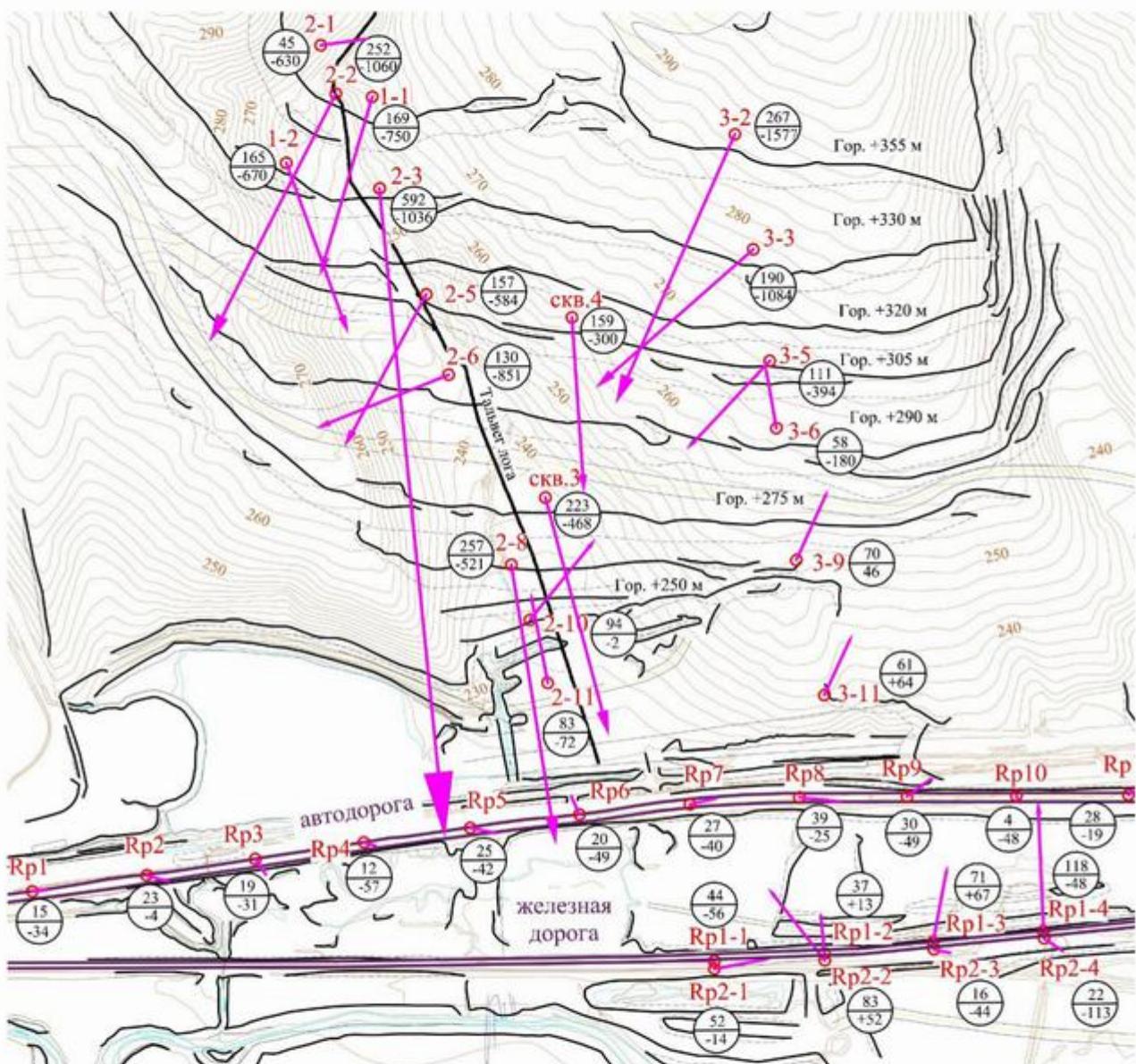


Рисунок 4.7 – План отвала разреза "3" с положением векторов смещений
Условные обозначения:

○ 2-5 – рабочий репер и его номер

$(157 \atop -584)$ – в числителе суммарное смещение в плане, в знаменателе – по высоте за весь период наблюдений

↗ – вектор планового смещения

достигли максимальных значений, скорость смещения увеличивалась (02.06.2015-14.10.2015, 02.08.2016-01.11.16, 22.03.2017-08.08.2017), красным – периоды максимальных смещений реперов и резких скачков скоростей смещений (25.11.2015-28.03.2016, 01.11.2016-22.03.2017).

2) Векторы смещения отвального массива по реперам, расположенным над склоном, направлены в сторону лога, по реперам, расположенным над тальвегом лога – вниз по логу (см. рисунок 4.7).

3) В первый год после отсыпки отвала происходило уплотнение свеже-отсыпанной отвальной массы. Осадки реперов (-159 – -579 мм) больше, чем в 2 раза превышали плановые смещения (76 – 118 мм);

4) Ранней весной (25.11.2015 – 28.03.2016, 01.11 – 22.03.2017) смещения возрастили. Пиковый период отмечен в середине апреля 2016, скорости смещений полного вектора по реперам 2-2 и 2-3 достигали значений 5 мм/сут, при этом визуально новых трещин не было обнаружено.

5) В последующий период года (с 08.08.2017) скорости смещений не превышали 0,7 мм/сут.

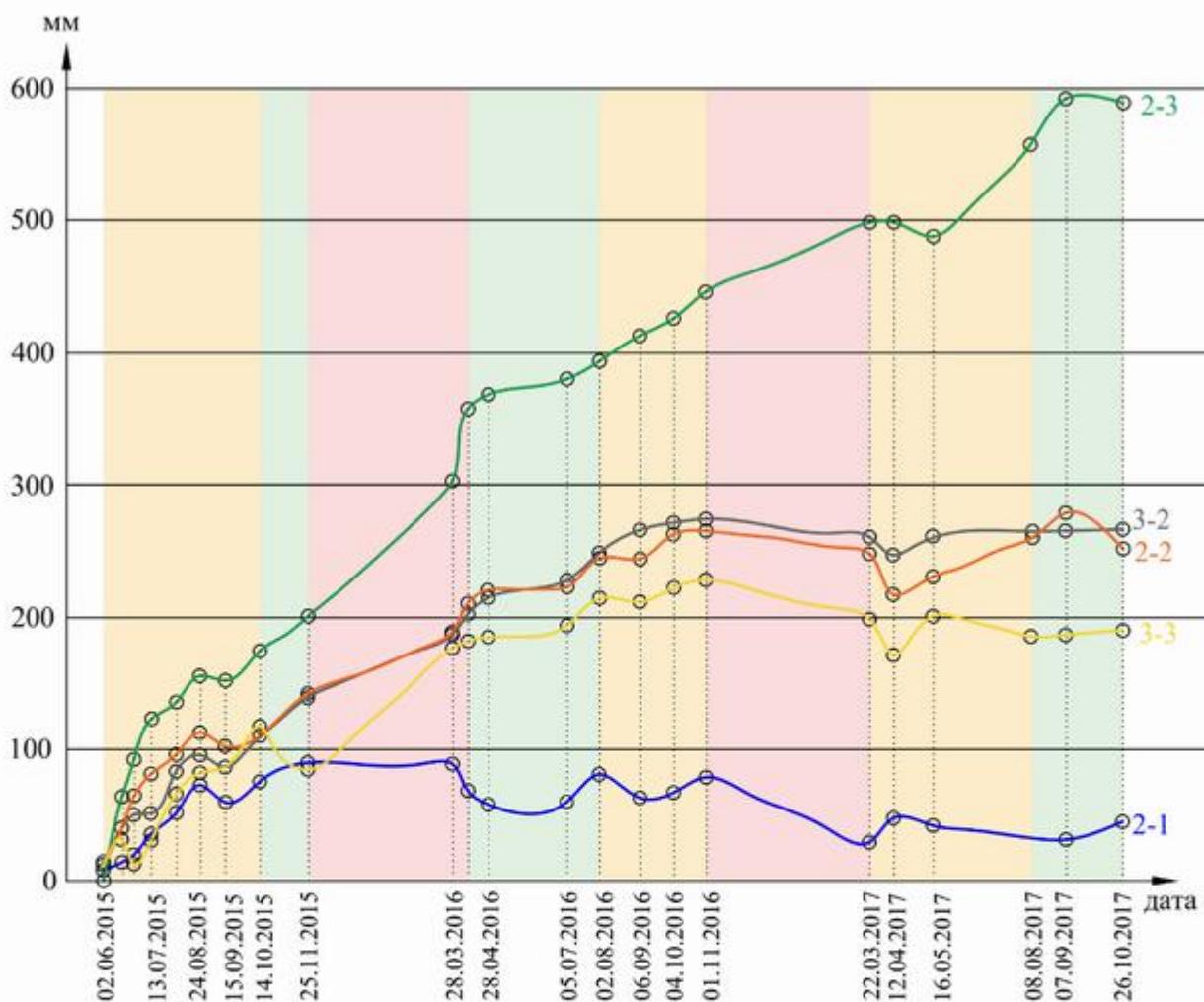


Рисунок 4.8 – Полный вектор смещения реперов на внешнем отвале

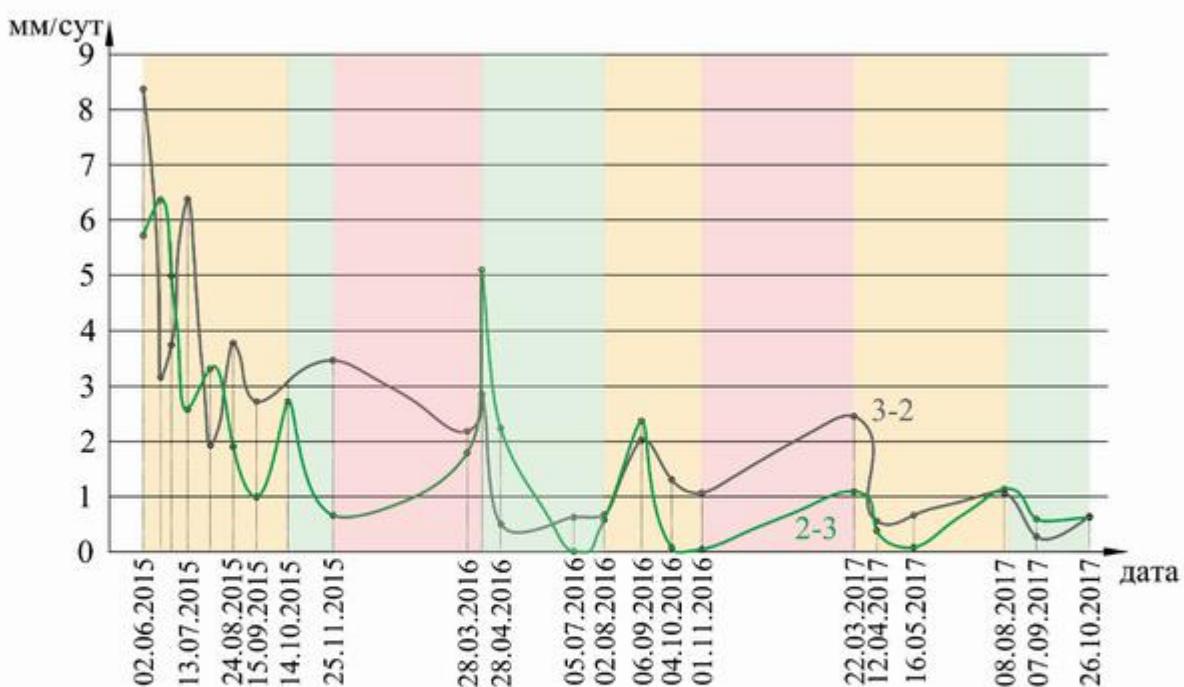


Рисунок 4.9 – Скорости смещения полного вектора реперов на отвале

6) Смещения реперов, установленных вдоль железной и автомобильной дорог, происходили только в вертикальной плоскости (за счет просадки от гравитационных воздействий и уплотнения балластной призмы, песчаной подушки, земляного полотна и грунтов основания дорог).

После 26.10.2017 производили только визуальный контроль, инструментальные наблюдения были прекращены, поскольку за последний календарный год фиксировалось затухание скорости смещений полного вектора с 2,5 до 0,7 мм/сут, по автомобильной и железной дорогам смещения в горизонтальной плоскости находились в пределах погрешности измерений.

Результаты геомеханического мониторинга за свежеотсыпанным отвалом на разрезе "3" позволяют сделать следующие выводы:

1. Конструкция наблюдательной станции, соответствующая типу ПТС "отвал-основание" позволила выявить признаки деформаций на ранней стадии – активное смещение происходило по реперам, расположенным в наиболее обводнённом участке отвала (над оврагом).

2. В первый год формирования отвала за счет самоуплотнения просадки вдвое превышали плановые смещения, скорость смещения полного вектора достигала 10 мм/сут.

3. В последующий период напряженно-деформируемое состояние ПТС "отвал-основание" изменялось в зависимости от времени года и смещения увеличивались только в период активного снеготаяния (водонасыщения отвальных пород), их величины не превышали погрешности измерений.

4.3.3. Определение критических деформаций отвала по экспериментальным данным

Для установления критических значений скорости смещения отвального массива проанализированы результаты геомеханического мониторинга наблюдательной станции, заложенной на внутреннем отвале "З-С".

Высота многоярусного отвала, расположенного на наклонном основании ($\beta \geq 5^\circ$), составляла 100 - 120 м, угол откоса – 20-21°. В отвал складировались песчано-глинистые и скальные породы: тип отвальной массы – **II**. Основанием отвала являлась почва угольного пласта – алевролит на глинистом цементе с углом наклона 9° (тип основания – **B**). Индекс ПТС "отвал-основание" по условиям формирования – **II. B. 1. c** (см. рисунок 2.4).

Для ведения геомеханического мониторинга опасной зоны в 2019 году были заложены реперы наблюдательной станции. В соответствии с наиболее вероятной схемой деформирования – вращательный сдвиг (см. таблицу 2.2) принятая конструкция наблюдательной станции **НС-I** (см. рисунок 4.2).

Наблюдения (2018-2020 гг.) проводились по 25 рабочим реперам методом спутникового определения координат геодезической аппаратурой Leica GS14 в режиме статика (погрешность определения координат: в плане – 5 + 0,5 мм/км, по высоте – 10 + 0,5 мм/км) от опорного репера, расположенного на расстоянии 1,1 км. При этом наиболее информативным в части характеристики процесса сдвига оказался репер Rp 5-3 (рисунок 4.10), расположенный на верхнем ярусе отвала (гор. +338 м).

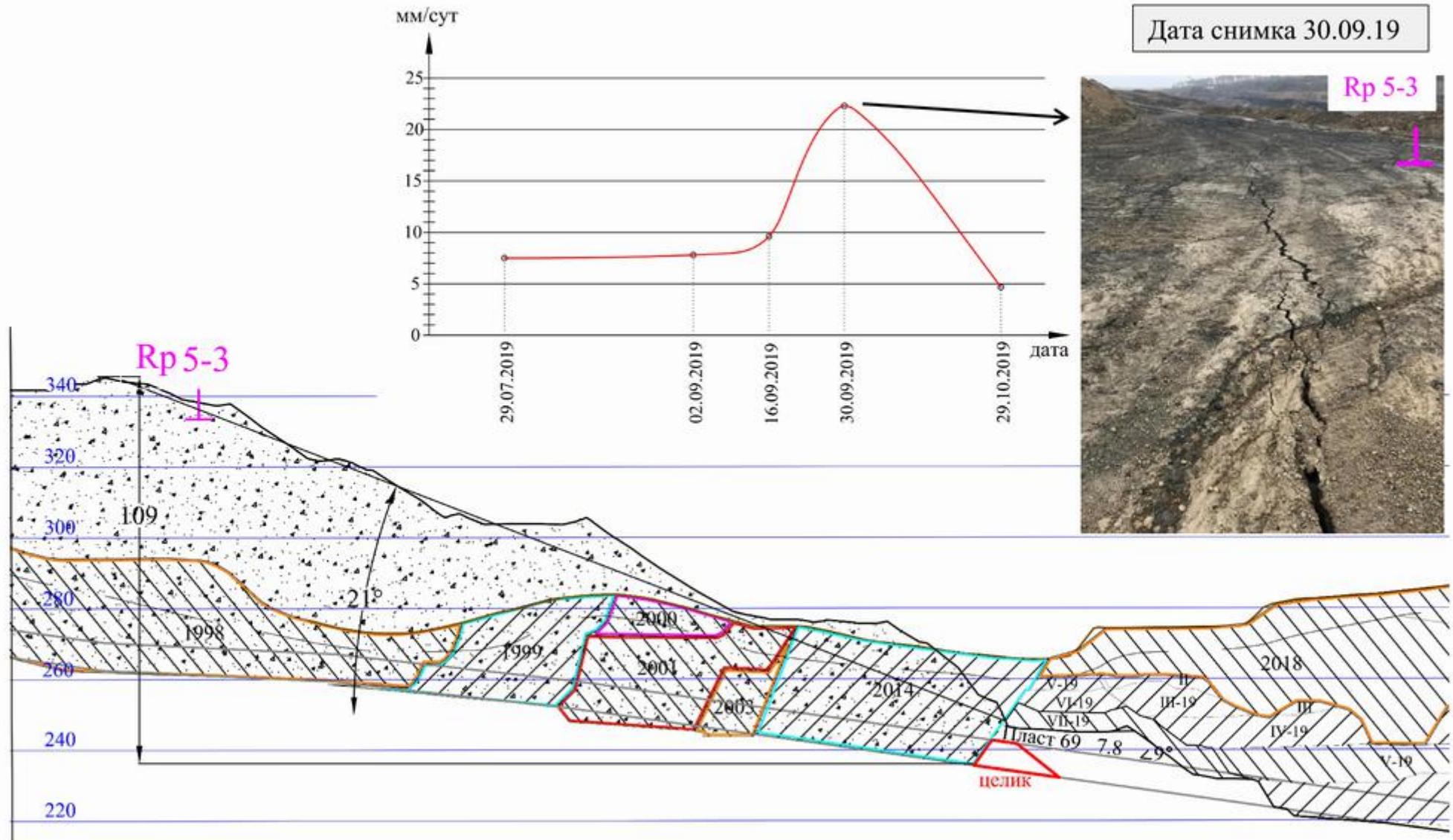


Рисунок 4.10 – а) профиль по внутреннему отвалу "3-С"; б) фотоснимок и в) график смещения полного вектора Rp 5-3

В июле 2018 года горные работы продвинулись к основанию внутреннего отвала, который был расположен поверх планируемых к отработке запасов угля. Для сокращения работ по переэкскавации был оставлен углепородный целик.

По мере приближения вскрышных и добывчих работ к углепородному целику, скорость смещения репера Rp 5-3 (таблица 4.4) увеличивались, а вектор смещения имел направление в сторону выработанного пространства. При этом визуально признаки деформаций не наблюдались.

Первые трещины криволинейного очертания с замыканием на откос на верхнем ярусе отвала вблизи рабочего репера Rp 5-3 были обнаружены в период выпадения большого количества осадков при проведении 5-ой серии наблюдений (30.09.2019). Ширина трещин составляла 10 см, а скорость полного вектора смещения – 22 мм/сут (таблица 4.4). После остановки горных работ отмечалось снижение скорости смещения до 4,7 мм/сут.

Таблица 4.4 – Результаты мониторинга репера Rp 5-3 на отвале "3-С"

Даты наблюдений	Период, сут	ΔH	ΔP	ΔU	V_H	V_P	V_U
02.07.2019 – 29.07.2019	27	-171	109	203	6,3	4,0	7,5
29.07.2019 – 02.09.2019	35	-233	142	273	6,7	4,1	7,8
02.09.2019 – 16.09.2019	14	-108	79	134	7,7	5,7	9,6
16.09.2019 – 30.09.2019	14	-232	209	312	16,6	14,9	22,3
30.09.2019 – 29.10.2019	29	-121	62	136	4,2	2,1	4,7
02.07.2019 – 29.10.2019	119	-865	601	1053	7,3	5,0	8,8

Примечание:

1. В таблице используются обозначения: ΔH , ΔP и ΔU – соответственно смещения в вертикальной, горизонтальной плоскости и полный вектор мм; V_H , V_P и V_U – соответственно скорость смещения в вертикальной, горизонтальной плоскости и полного вектора, мм/сут.

2. Жирным шрифтом выделены максимальные значения.

3. Серой заливкой показаны накопленные смещения за весь период наблюдений

Через год на этом же отвале в 700 м от репера Rp 5-3 образовались трещины с раскрытием до 0,5 м. Скорости смещения за период с мая по август 2020 по реперам 2-7 и г-5, расположенным на верхнем ярусе отвала, активно нарастили и в сентябре (в период осенних дождей) достигли значений 86,6 и 91,6 мм/сут соответственно (таблица 4.5). Руководство предприятия было уведомлено об активной стадии деформации отвала, персонал и обору-

дование выведены из опасной зоны, горные работы остановлены. В ноябре 2020 произошел отрыв массива (рисунок 4.11).

Таблица 4.5 – Результаты мониторинга на внутреннем отвале "З-С" в 2020 году

Репер	18.08.20 – 17.09.20					
	ΔH	ΔP	ΔU	V_H	V_P	V_U
2-7	-958	2414	2597	31.9	80.5	86.6
г-5	-2186	1667	2749	72.9	55.6	91.6
2-8	-210	90	229	7.0	3.0	7.6
2-10	-125	128	179	4.2	4.3	6.0
2-11	-112	49	122	3.7	1.6	4.1
Период, сут	30					

Примечание: в таблице используются обозначения, расшифровка которых приведена в таблице 4.4.



Рисунок 4.11 – Ортофотоплан внутреннего отвала "З-С" с положением реперов и векторов смещения

По результатам геомеханического мониторинга отвала "З-С" установлено:

1. Видимые признаки деформаций отвального массива появляются в период весенних и осенних дождей при скорости полного вектора смещения более 20 мм/сут.
2. В начальный период развития деформаций смещения в вертикальной и горизонтальной плоскостях практически одинаковые, при повышении коэффициента обводнения плановые смещения увеличились в 2 раза по отношению к высотным, массив оказался в состоянии предельного равновесия.

4.4 Обоснование критериев оценки уровня геомеханического риска для прогноза устойчивости природно-технических систем "отвал-основание"

При оценке инструментальных наблюдений всегда возникает вопрос относительно меры точности результатов измерений. Говорить о начале процесса сдвига массива можно в том случае, когда величина смещения пре-взойдет случайные погрешности измерений. Согласно теории К. Гаусса случайные погрешности измерений подчиняются нормальному закону распределения, который описывается функцией вида:

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad t = \frac{\delta}{m}, \quad (4.3)$$

где δ и m – случайная и средняя квадратическая погрешности измерений.

Исходя из вероятности распределения случайных погрешностей измерения (рисунок 4.12) и доверительных интервалов⁷ установим допустимые и предельные погрешности измерений.

При определении **допустимой** погрешности измерения в маркшейдерской практике принимают доверительный интервал равный двум, т.е. интервал $-(-2m) \div (+2m)$, в который попадает 95,5 % погрешностей измерений $m_{\text{доп}} = tm_{\Delta} = 2 \cdot 30\sqrt{2} = 85$ мм.

⁷ Доверительным называется интервал значений, в который попадает истинное значение измеряемой величины с заданной вероятностью.

Для установления **пределной** погрешности измерений принимается доверительный интервал равный трем, т.е. интервал $-(-3m) \div (3m)$, в который попадает 99,7% погрешностей измерений. Таким образом, если смещение репера из двух серий наблюдений превышает предельную погрешность: $m_{\text{пред}} = tm_{\Delta} = 3 \cdot 30\sqrt{2} = 127$ мм, следует говорить о начале деформаций ПТС "отвал-основание" [41, п.6.2.1], при меньших значениях – о погрешности маркшейдерских измерений.

Исходя из опыта эксплуатации ряда отвалов на угольных и рудных месторождениях учёными ВНИМИ [91] было рекомендовано критическое значение скорости смещений, при которой требовалось прекращение работ на отвале и вывод людей и оборудования – 300 мм/сут.

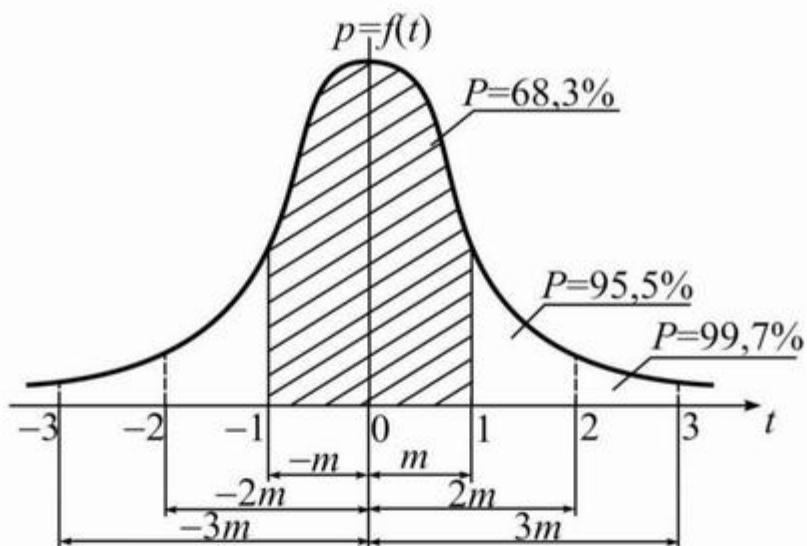


Рисунок 4.12 – Вероятность распределения случайных погрешностей измерения

Нашиими экспериментальными данными было установлено (рисунок 4.13):

- при коэффициенте обводнения отвального массива $k=0,2$ скорость полного вектора смещения составляла около 20 мм/сут, на поверхности отвала появились видимые признаки деформаций отвального массива в виде трещин;

– при коэффициенте обводнения $k=0,5$, скорости полного вектора смещения превысила 92 мм/сут, произошёл отрыв призмы обрушения по трещине, при этом остальная часть отвального массива осталась в устойчивом положении;

- при коэффициенте обводнения $k=0,8$ скорость полного вектора смещения достигла 300 мм/сут. На ряде отвалов произошли крупные оползни, в результате чего были уничтожены объекты инфраструктуры (ЛЭП, автомобильные и железные дороги, малоэтажные здания), засыпаны оползшей отвальной массой земельные участки, реки и водоемы.

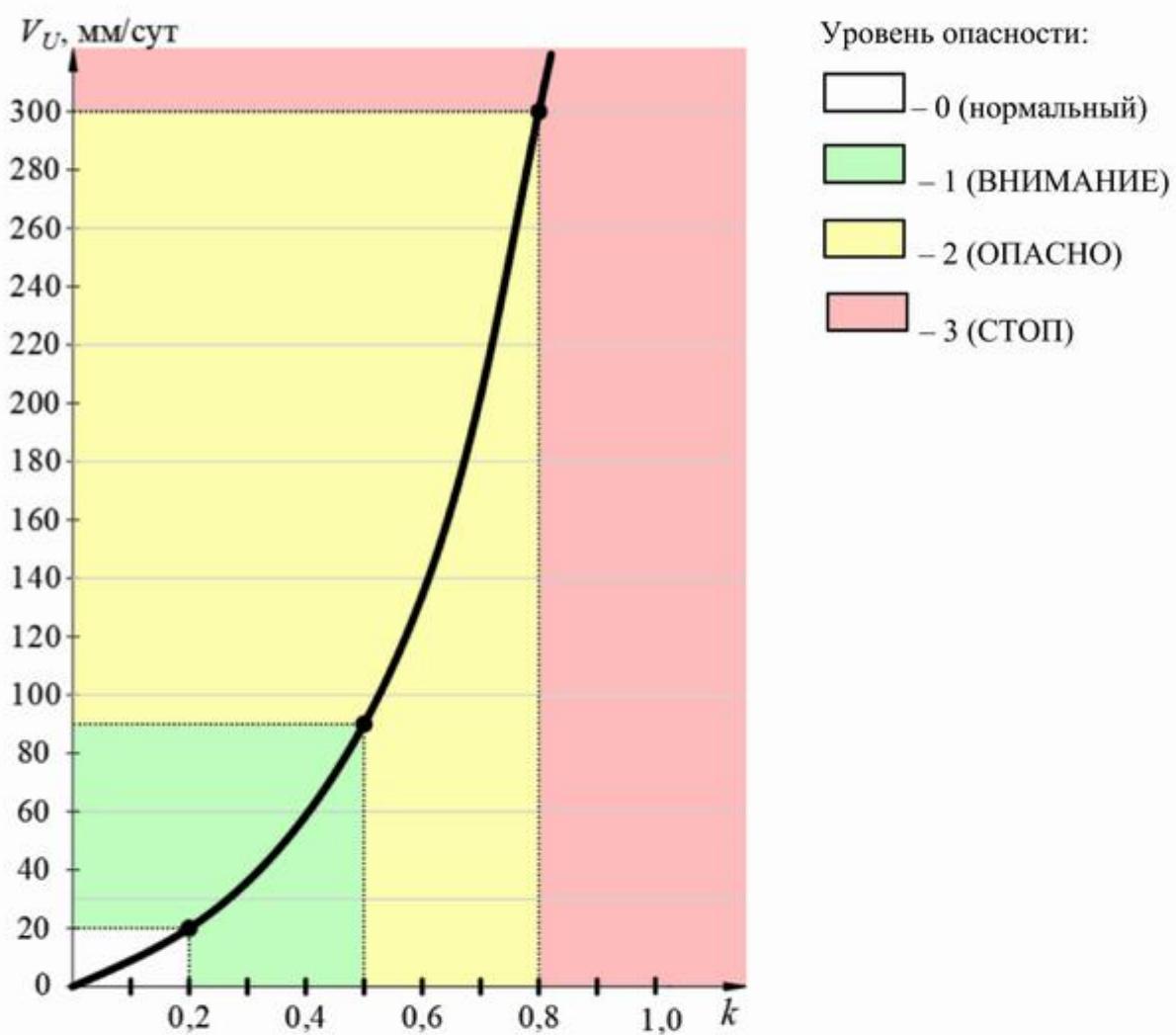


Рисунок 4.13 – Зависимость скорости полного вектора смещения отвальной массы V_U от коэффициента обводнения k

На основании опыты эксплуатации отвалов; анализа оползней, произошедших на отвалах в последние годы (2015 -2025 гг.), а также с учётом

наших экспериментальных данных по результатам геомеханического мониторинга за состоянием отвалов установлены качественные критерии (наличие механических повреждений в приоткосной части отвала, характер изменения скорости и соотношение смещений в горизонтальной и вертикальной плоскостях), характеризующие уровень опасности в части нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание" (таблица 4.6):

- 0 – нормальный уровень – мелкие (до 10 см) продольные трещины; скорость смещений затухает, плановые смещения вдвое меньше просадок.
- 1 уровень ВНИМАНИЕ – крупные (больше 10 см) продольные трещины, заколы, просадки; характер изменения скорости равномерный; плановые смещения равны просадкам.
- 2 уровень ОПАСНО – трещины большой протяженности с замыканием на откос, вертикальные ступеньки; скорость смещения нарастает; плановые смещения вдвое больше просадок.
- 3 уровень СТОП – отрыв призмы возможного обрушения, локальные оползни; скорость смещения нарастает; плановые смещения вдвое больше просадок.

Аналитическими расчетами (§ 4.3), требованиями нормативных документов к точности определения смещений на отвалах (§ 4.2), рекомендациями [91] по их критическим значениям, а также результатами фактических значений смещений, при которых происходило обрушение отвала, установлены количественные критерии для оценки уровня опасности в части нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание" по результатам инструментальных наблюдений – смещения реперов (ΔU), полученные из двух серий измерений за 10 суток при средней скорости полного вектора смещения V_U мм/сут:

- 0 – нормальный уровень – при $V_U = 13$ мм/сут; $\Delta U = 127$ мм.
- 1 уровень ВНИМАНИЕ – при $V_U = 20$ мм/сут; $\Delta U = 200$ мм.
- 2 уровень ОПАСНО – при $V_U = 90$ мм/сут; $U = 900$ мм.
- 3 уровень СТОП – при $V_U \geq 300$ мм/сут.

Таблица 4.6 – Показатели оценки устойчивости отвалов на наклонном основании по результатам геомеханического мониторинга

Состояние	Работоспособное		Частично неработоспособное		Nеработоспособное
	исправное	неисправное	предельно - допустимое	предаварийное	недопустимое (аварийное)
Уровень опасности	–	0 - нормальный	1 - ВНИМАНИЕ	2 - ОПАСНО	3 - СТОП
1	2	3	4	5	6
1. Качественные критерии					
Наличие механических повреждений в приоткосной части отвала	Отсутствие визуальных признаков деформаций	Мелкие (< 10 см) продольные трещины	Крупные (≥ 10 см) продольные трещины, заколы, просадки	Трещины большой протяженности с замыканием на откос, вертикальные ступеньки	Отрыв призмы обрушения; локальные оползни
Характер изменения скорости	–	Затухающий	Равномерный	Нарастающий	–
Смещения в горизонтальной плоскости	–	Меньше просадок	Равны просадкам	Превышают просадки	–
2. Действия по результатам анализа инструментальных наблюдений		Проводить визуальные наблюдения	Провести контрольные инструментальные наблюдения	Уточнить конструкцию НС и периодичность наблюдений	Определить границу опасной зоны, сократить срок между сериями наблюдений
3. Количественные критерии					
Средняя скорость (V_U) полного вектора смещения (ΔU), мм/сут	$V_U < 13$	$13 \leq V_U < 20$	$20 < V_U < 90$	$90 < V_U \leq 300$	$V_U > 300$
Коэффициент обводнения k	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	0,5-0,8	> 0,8
4. Периодичность наблюдений, суток	30	23	15	3	1
5. Уровень геомеханического риска	Весьма низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
6. Меры реагирования в соответствии с уровнем геомеханического риска	Мероприятия не требуется		Разработать противооползневые мероприятия по снижению уровня риска до низкого	Приостановить работы на участке	Запретить ведение горных работ

Для предупреждения нарушения устойчивости ПТС "отвал-основание" важно выдерживать периодичность наблюдений – интервал между сериями наблюдений, который устанавливается с таким расчётом, чтобы за этот промежуток времени скорость смещения массива не достигла критического значения.

Итоговая оценка состояния ПТС "отвал-основание" по уровню опасности и геомеханического риска нарушения устойчивости по результатам натурных наблюдений заключается в сопоставлении фактических показателей с качественными и количественными критериальными показателями уровня геомеханического риска развития деформаций и нарушения устойчивости; установления периодичности наблюдений и мер реагирования в соответствии с уровнем геомеханического риска (таблица 4.6).

Руководствуясь нормативной базой [42, 91, 120] и научными разработками [29, 121-125] установлены качественные и количественные критерии оценки уровня геомеханического риска развития деформаций, характеризующие состояния ПТС "отвал-основание":

– Работоспособное:

- ✓ исправное;
- ✓ неисправное;

– Частично неработоспособное:

- ✓ предельно-допустимое;
- ✓ предаварийное;

– Неработоспособное – недопустимое (аварийное).

При **исправном работоспособном** состоянии отсутствуют признаки новых деформаций (трещины, заколы, просадки) и не развиваются со временем существующие. Характер изменения скорости – затухающий, просадки превышают плановые смещения.

По результатам геомеханического мониторинга смещения реперов между двумя смежными сериями находятся в пределах погрешности измерений и не превышают значение допустимой погрешности $t_{\text{доп}} = 85$ мм, при

средней скорости полного вектора смещения меньше 13 мм/сут и коэффициенте обводнения k меньше 0,1.

При формировании отвала в течение года идет активная стадия самоуплотнения отвальной массы, что не представляет опасности для ведения горных работ. Необходимо проводить постоянные визуальные наблюдения.

Уровень геомеханического риска оценивается как весьма низкий. Мероприятия по снижению уровня риска не требуются.

Работоспособное неисправное состояние ПТС "отвал-основание" соответствует уровню опасности 0 (нормальный режим). Для этого состояния свойственно появление мелких продольных трещин до 10 см. Характер изменения скорости – затухающий, просадки превышают плановые смещения. По результатам геомеханического мониторинга смещения реперов между двумя смежными сериями превышают предельную погрешность измерений $m_{\text{пред}}=127$ мм, при средней скорости полного вектора смещения 13 мм/сут, а коэффициент обводнения k в пределах 0,1-0,2.

Необходимо провести контрольные инструментальные наблюдения.

Уровень геомеханического риска оценивается как низкий. Мероприятия по снижению уровня риска не требуются.

Частично неработоспособное – это состояние ПТС "отвал-основание", при котором хотя бы один критерий безопасности не соответствует критериям работоспособного состояния:

Предельно-допустимое состояния ПТС "отвал-основание" соответствует уровню опасности 1 – ВНИМАНИЕ. Для такого состояния характерно появление крупных продольных трещин, просадок. Характер изменения скорости – равномерный, просадки равны плановым смещениям. По результатам инструментальных наблюдений смещения реперов между двумя смежными сериями за 10 суток превышают 200 мм; скорость смещения полного вектора 20 мм/сут; коэффициент обводнения k более 0,2.

По результатам анализа инструментальных наблюдений уточняют конструкцию наблюдательной станции и периодичность наблюдений.

Уровень геомеханического риска – средний. Необходимо разработать противооползневые мероприятия по снижению уровня риска до низкого.

Предаварийное состояние соответствует уровню опасности 2 – ОПАСНО. Предаварийное состояние наступает, когда появляются трещин большей протяженности с замыканием на откос, вертикальные ступеньки. Скорость смещений имеет нарастающий характер. Плановые смещения вдвое больше просадок.

Скорости смещения полного вектора 90 мм/сут, смещения между двумя смежными сериями 900 мм, коэффициент обводнения k более 0,5. В этом случае нужно определить границу опасной зоны и сократить срок между сериями наблюдений до 3 суток.

Уровень геомеханического риска – высокий. Работы на опасном участке необходимо приостановить.

Недопустимое (аварийное) состояние – уровень опасности 3 – СТОП. Для аварийного состояния характерен отрыв призмы обрушения, появление локальных оползней. Скорость смещений имеет нарастающий характер. Плановые смещения больше просадок. Скорости смещения полного вектора ≥ 300 мм/сут, коэффициент обводнения k более 0,8. Наступает предельное напряженно-деформируемое состояние ПТС "отвал-основание". Нахождение людей в опасной зоне недопустимо, поэтому необходимо перейти на дистанционный контроль в режиме реального времени.

Уровень геомеханического риска – очень высокий, эксплуатация отвала недопустима, необходимо запретить ведение горных работ.

4.5 Выводы по главе 4

- На основании опыта эксплуатации отвалов, наших экспериментальных исследований на деформирующихся отвалах (§2.3), моделирования природно-технической системы "отвал-основание" (глава 3), типизации природно-технической системы "отвал-основание" (см. рисунок 2.4) впервые разра-

ботана конструкция наблюдательных станций, учитывающая механизм и схему деформирования ПТС "отвал-основание" (см. таблицу 2.2), и позволяющая обнаруживать деформации на ранней стадии их возникновения при минимальном количестве рабочих реперов.

2. На основе геомеханического мониторинга научно-обоснованы количественные и качественные критерии оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании (таблица 4.6). Установлена нелинейная зависимость коэффициента обводнения отвала со скоростью полного вектора смещения отвальной массы: при скорости от 20 мм/сут появляются крупные продольные трещины, заколы, просадки, что указывает на начало деформаций, при скорости 90 мм/сут образуются трещины большой протяжённости с замыканием на откос, вертикальные ступеньки – наступает предаварийное состояние, при скорости более 300 мм/сут происходит обрушение отвального массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические решения по геомеханическому обоснованию устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном основании, обеспечивающие безопасность горных работ при открытой добыче полезных ископаемых.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. Актуальность геомеханического обоснования устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном основании обусловлена большим количеством случаев, связанных с деформациями сооружений, недостаточной изученностью механизма смещения отвалов по контакту с основанием, влияния нагрузок и воздействий на их устойчивость, отсутствием в нормативно-методической документации обоснованных критериев оценки геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости природно-технической системы "отвал-основание" по результатам геомеханического мониторинга и оперативного управления геомеханическим риском по снижению вероятности нарушения устойчивости и тяжести последствий от деформаций.

2. Оползнеопасные зоны отвалов вскрышных пород характеризуются типом отвальных пород и пород основания. Действие природных и техногенных факторов при формировании отвалов существенно при расположении отвальной массы пород на наклонном основании, а также на слабом основании большой мощности, сложенном глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы.

Многообразие факторов и условий, влияющих на устойчивость отвалов, исследовано методом системного анализа и отражено в типизации природно-технической системы "отвал-основание" в форме идеально-знаковой модели.

Повышение информативности прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании обеспечивается показателем F , представляющим отношение наклона основания β к сопротивлению сдвигу по подошве отвала ϕ' . При $F < 0,7$, вследствие уплотнения отвальной массы, происходит просадка поверхности отвала с одновременным выполаживанием откоса, при $F = 0,7$ возникают локальные деформации нижних ярусов отвала в форме вращательного сдвига или просадки со сдвигом вдоль контакта до угла устойчивого откоса – деформации в этом случае не представляют опасности для всего отвального массива. Вследствие водонасыщения пород основания, происходит снижение сопротивлению сдвигу по подошве отвала, Сдвиговые деформации вдоль контакта возникают при $F > 0,7$, с увеличением показателя F начинается вращательное смещение с выпором, при $F = 1,0$ происходит оползень отвала.

3. Исследование степени воздействия активных сдвигающих (силы гравитации отвала, нагрузка от оборудования, гидростатическое давление в основании и теле отвала, природные и техногенные сейсмические силы) и препятствующих им (сцепление, угол внутреннего трения отвальных пород; сцепление и угол внутреннего трения по контакту подошвы отвала с основанием) внутренних реактивных сил сопротивления выполнено на графической модели отвала со среднестатистическими характеристиками по основному критерию – расчетному коэффициенту устойчивости n_p методом многоугольника сил.

Установлено, что приращения аргументов: уменьшение угла внутреннего трения ($\Delta\phi' = 0,5^\circ$) или увеличение наклона основания отвала ($\Delta\beta = 2^\circ$) приведут к превышению допустимого отклонения критерия устойчивости от нормативного значения – 5%. Одновременное отклонение этих аргументов вызывает развитие деформаций и нарушение устойчивости сооружения. При коэффициенте обводнения отвала $k=0,3$, коэффициент устойчивости оказывается меньше нормативного значения, при последующем повышении уровня воды в теле

отвала начинается развитие деформаций и при $k=0,5$ наступает предельное напряженно-деформируемое состояние ПТС "отвал-основание".

4. Повышение точности прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании, обеспечивается обоснованными критериями оценки уровня геомеханического риска развития деформаций при ведении геомеханического мониторинга состояния массива.

Геомеханический мониторинг включает: создание конструкции наблюдательной станции с учётом типа природно-технической системы "отвал-основание", механизма и схем деформирования пород отвала по контакту с основанием, позволяющей обнаружить деформации на начальных этапах их проявления; обоснование методики наблюдений, обеспечивающей нормативную точность; оперативную обработку результатов инструментальных наблюдений в программе "Deformation control".

Геомеханическое обоснование устойчивости отвалов на наклонном основании достигается использованием нелинейной зависимости коэффициента обводнения отвала со скоростью полного вектора смещения отвальной массы, при этом скорость от 20 мм/сут указывает на начало деформаций, при скорости 90 мм/сут наступает предаварийное состояние, скорость более 300 мм/сут является критической, при которой происходит обрушение отвального массива.

5. Результаты, выполненных исследований, внедрены в производство при организации геомеханического мониторинга отвалов, расположенных на наклонном основании, на объектах открытой добычи полезных ископаемых Кузбасса (СУЭК-Кузбасс), Сахалинской (Восточная горнорудная компания) и Мурманской (Оленегорский горно-обогатительный комбинат) областей, что способствовало безаварийной эксплуатации отвалов и обеспечению безопасного ведения открытых горных работ.

Основные направления дальнейших исследований: проведение многофакторного корреляционного анализа влияния нагрузок и воздействий на устойчивость отвалов и оценка напряженного состояния этих объектов методом конечных элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб. : ВНИМИ, 1998. – 114 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 № 439 : ввод в действие с 01.01.2021. – Серия 06. Выпуск 11. – Москва : ЗАО НТЦ ПБ, 2023. – 64 с.
3. Гапонов, Ю.С. Геомеханическое обоснование устойчивости породных отвалов с учетом влияния характеристик разрушенной горной массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20 / Гапонов Юрий Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2015. – 22 с.
4. Ивочкина, М.А. Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости отвалов фосфогипса: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Ивочкина Мария Александровна. – Санкт-Петербург, 2013. – 23 с.
5. Клейменов, Р.Г. Комплексный мониторинг техногенных грунтовых массивов гидроотвалов угольных разрезов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Клейменов Роман Геннадьевич. – Кемерово, 2011. – 23 с.
6. Коробанова, Т.И. Геодинамическое обоснование устойчивости отвалов фосфогипса на глинистом грунтовом основании: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Коробанова Татьяна Николаевна . – Санкт-Петербург, 2018. – 24 с.
7. Пуневский, С.А. Инженерно-геологическое обеспечение размещения отвальных насыпей на слабых естественных основаниях: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Пуневский Сергей Александрович. – Москва, 2007. – 22 с.
8. Хашин, В.Н. Технологические способы повышения устойчивости внутренних отвалов на разрезах Кузбасса: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.03 / Хашин Виктор Николаевич. – Прокопьевск, 1983. – 251 с.
9. Шпакова, М.В. Маркшейдерское обеспечение горно-экологического мониторинга устойчивости карьерных откосов на слабом основании: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16, 25.00.36 / Шпакова Мария Владимировна. – Москва, 2011. – 26 с.

10. Жабко, А. В. Расчет устойчивости отвалов на слабом наклонном контакте / А. В. Жабко, Н. В. Волкоморова, Н. М. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – № 1(61). – С. 87-101.
11. Жабко, А. В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Устойчивость отвалов / А. В. Жабко // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 3(43). – С. 67-69.
12. Павлович, А. А. Определение прочностных свойств отвальной массы для оценки устойчивости откосов отвалов / А. А. Павлович, А. Ю. Хорева // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 55-61.
13. Крячко, О.Ю. Управление отвалами открытых горных работ. / О. Ю. Крячко – Москва : Изд-во "Недра", 2080. – 256 с.
14. Несмеянов, Б.В. Теоретические основы, методы и средства обеспечения устойчивости карьерных откосов: автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.15.01, 05.15.11/ Несмеянов Борис Васильевич. – Москва, 2000. – 25 с.
15. Попов, В.Н. Устойчивость отвалов скальных пород : Учебное пособие / В.Н. Попов, С.В. Попов, Б.В. Несмеянов. – Москва : Горная книга, 2010. – 123 с.
16. Попов, С.В. Разработка методов обеспечения устойчивости высоких отвалов на слабом основании: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Попов Сергей Владиславович. – Москва, 2003. – 23 с.
17. Открытые горные работы : справочник / [Сибирская угольная энергетическая компания (СУЭК) ; Трубецкой К. Н. и др.]. - Москва : Горное дело : Киммерийский центр, 2014. - 621 с.
18. Мешков, Г. Б. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год / Г. Б. Мешков, И. Е. Петренко, Д. А. Губанов // Уголь. – 2024. – №3(1168). – С. 18-29.
19. Кутепов, Ю. И. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса / Кутепов Ю.И., Васильева А.Д // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №10. – С. 122 - 130.
20. **Ананенко, Е. В.** Геомеханическое обоснование устойчивой насыпи по тальвегу лога / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 3(107). – С. 35-39.
21. **Ананенко, Е. В.** Анализ причин деформаций отвалов вскрышных пород / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Сборник научных трудов II Между-

народного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ "Проблемы горного дела". Донецк. – 2021. – С. 328-332.

22. Бахаева, С. П. Исследование условий формирования насыпей в лежачем боку залежи / С. П. Бахаева, **Е. В. Ананенко** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 9. – С. 55-64.

23. Bakhaeva, S. Study of the Conditions for Construction of the Haulage Berm in the Deposit Ledger-Wall / S. Bakhaeva, **E. Chernykh** // IVth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. Vol. 105. – P. 01034. – (2019).

24. **Ananenko, E.** The reason analysis of the overburden rock dumps deformation / E. Ananenko, S. P. Bakhaeva // VIth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. – Vol. 315. – P. 01001. – (2021).

25. Заключение №1-2015 по оценке риска аварии в опасной зоне: оползень с западной стороны внешнего отвала №1 и обоснование безопасности работ при восстановлении транспортной инфраструктуры и русла реки Кыргай ПЕ "Разрез Заречный" ОАО "СУЭК-Кузбасс": отчет о НИР. – Кемерово, КузГТУ, 2015.

26. Заключение №093-3/з от 11.12.2017. 4 этап: Оценка риска горных производств и объектов в части геомеханической оценки фактического состояния и прогноза устойчивости внешнего отвала № 1: отчет о НИР – Прокопьевск, СФ АО ВНИМИ, 2017.

27. Васильева, А.Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Васильева Анастасия Дмитриевна. – Санкт-Петербург, 2020. – 20 с.

28. Кутепова, Н.А. Особенности развития деформаций отвалов фосфогипса в г. Балаково саратовской области / Кутепова Н.А., Коробанова Т.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – №10. – С. 132-139.

29. **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.

30. Аナンенко, Е. В. Конструкция наблюдательной станции на основе анализа риска развития деформаций природно-технической системы "отвал-основание" / Е. В. Аナンенко, С. П. Бахаева // Сборник научных трудов III Международного форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков "Проблемы горного дела". Донецк. – 2023. – С. 165-170.

31. Bakhaeva, S. P. The embankment formation for conveyor under harsh conditions / S. P. Bakhaeva, E. V. Chernych // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. Vol. 1. – P. 141-150. – (2019).

32. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия : утвержден и введен в действие Приказом министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 03 декабря 2016 г. N 891/пр : дата введения 2017-06-04 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Доступ из справ.-правовой системы "КонсультантПлюс".

33. Михайлова, Т.В. Обоснование точности маркшейдерского мониторинга грунтовых дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / Михайлова Татьяна Викторовна. – Кемерово, 2013. – 184 с.

34. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Часть 1. Изучение гидрогеомеханических условий строительства, эксплуатации и рекультивации отвальных сооружений. Л.: ВНИМИ, 1989. – 25 с.

35. Бахаева, С. П. Прогноз устойчивости породных отвалов на угольных разрезах / С. П. Бахаева, Е. Н. Заворина ; КузГТУ, СФ ОАО ВНИМИ : – Новосибирск : Изд-во "Наука", 2014. – 152 с.

36. Кутепов, Ю.И. Закономерности формирования порового давления при гидроотвалообразовании и отсыпке сухих отвалов / Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №11. – С. 212-220.

37. Бахаева, С.П. Расчет устойчивости откосов при открытой геотехнологии : Учебное пособие / С.П. Бахаева. – Кемерово : ФГБОУ ВПО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, 2011. – 161 с.

38. Аナンенко, Е. В. Оценка влияния нагрузок и воздействий на напряженно-деформированное состояние природно-технических систем "отвал -

основание" / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 10. – С. 5-21.

39. Методические указания по производству маркшейдерских наблюдений за оползневыми явлениями на угольных карьерах. – М. : Углехиздат, 1955. – 40 с.

40. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л. : ВНИМИ, 1971. – 192 с.

41. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л. : ВНИМИ, 1987. – 115 с.

42. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М.: ИПКОН РАН, 2022. – 90 с.

43. Кенесбаева, А. Мониторинг смещений земной поверхности при разработке месторождений углеводородов / Кенесбаева А., Турбеков С.В., Кузнецова И.А. // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – №2. – С. 42-44.

44. Васильев, Ю.В. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Самотлорском геодинамическом полигоне / Васильев Ю.В., Юрьев М.Л., Яковлев С.И., Филатов А.В., Погодин П.В. // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №4. – С. 38-43.

45. Лизункин, В.М. Исследование устойчивости бортов карьера при комбинированном способе доработки месторождения "Т" / Лизункин В.М., Волохов А.В., Лизункин М.В. // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2016. – №12. – С. 153-165.

46. Айтказинова, Ш.К. Современные методы геодезических наблюдений за деформациями в зоне строительства метрополитена / Айтказинова Ш.К., Кыргизбаева Г.М., Мадимарова Г.С. // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – №4. – С. 58-60.

47. Шамганова, Л.С. Применение спутниковой геодезии в горном деле / Шамганова Л.С. // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – №4. – С. 35-39.

48. Желтышева, О.Д. Современные технологии мониторинга устойчивости бортов карьеров / Желтышева О.Д., Ефремов Е.Ю. // Маркшейдерия и недропользование. – 2014. – №5. – С. 63-66.
49. Горбунов, О.Н. Проектирование систем наблюдений за сдвижением горных пород на геодинамических полигонах месторождений углеводородного сырья / Горбунов О.Н., Дроздов А.О. // Маркшейдерия и недропользование. – 2017. – №6. – С. 20-24.
50. Корякин, А.Ю. Обработка и интерпретация спутниковых геодезических наблюдений с целью выявления смещений земной поверхности и геодинамического мониторинга состояния недр в процессе эксплуатации Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / Корякин А.Ю., Жариков М.Г., Билянский В.В., Затырко В.А., Стеблов Г.М. // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – №6. – С. 54-56.
51. Вердиев, С.Б. Вопросы оптимизации совместной работы RTK GPS и лазерного сканера при исследовании деформаций высотных конструкций / Вердиев С.Б., Годжаманов М.Г. // Маркшейдерия и недропользование. – 2019. – №6. – С. 57-59.
52. Романько, Е.А. Организация маркшейдерских наблюдений за деформациями на месторождении Юбилейное ООО "Башкирская медь" / Романько Е.А., Ковырзин К.Л. // Маркшейдерский вестник. – 2014. – №4. – С. 22-24.
53. Юнаков, Ю.Л. Геолого-маркшейдерское обеспечение мониторинга состояния устойчивости карьерных откосов для сложноструктурных месторождений на примере Кия-Шалтырского нефелинового рудника / Юнаков Ю.Л., Патачаков И.В., Боос И.Ю., Фуртак А.А. // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №2. – С. 40-43.
54. Розанов, И.Ю. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах / Розанов И.Ю., Кузнецов М.А., Достовалов Р.Н. // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2017. – №4. – С. 100-106.
55. Усанов, С.В. Современные системы лазерного сканирования для мониторинга деформаций при открытых разработках / Усанов С.В., Кольцов П.В., Белячков С.В. // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – №4. – С. 40-44.

56. Белов, Н.С. Специфика применения технологии наземного лазерного сканирования при мониторинге береговой зоны / Белов Н.С., Волкова И.И., Шаплыгина Т.В., Данченков А.Р. // Маркшайдерский вестник. – 2014. – №5. – С. 49-51.
57. Вальков, В.А. Геодезический контроль деформаций высотных сооружений на основе лазерного сканирования / Вальков В.А., Мустафин М.Г. // Маркшайдерский вестник. – 2015. – №2. – С. 24-28.
58. Одабаи-Фард, В.В. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии / Одабаи-Фард В.В., Пономаренко М.Р. // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2017. – №11. – С. 59-66.
59. Усанова, А.В. Особенности исследования деформаций поверхности при подземной разработке Соколовского железорудного месторождения на основе архивных радарных снимков / Усанова А.В. // Маркшайдерия и недропользование. – 2018. – №3. – С. 29-45.
60. Кайранбаева, А.Б. Георадарное профилирование гидротехнических сооружений на примере Шардаринского гидрокомплекса / Кайранбаева А.Б., Бибосинов А.Ж. // Маркшайдерия и недропользование. – 2019. – №2. – С. 19-21.
61. Чернов, А.В. Повышение эффективности мониторинга земной поверхности на территории Анненского месторождения с использованием космической радарной интерферометрии (КРИ) / Чернов А.В., Исабаев К.Ж., Кидирбаев Б.И., Какимжанов Е.Х. // Маркшайдерия и недропользование. – 2019. – №2. – С. 49-50.
62. Петров, П.П. Об опыте внедрения метода радиолокационной интерферометрии в проекты геодинамических полигонов / Петров П.П. // Маркшайдерский вестник. – 2014. – №2. – С. 44-46.
63. Кантемиров, Ю.И. Опыт использования технологии радарной интерферометрии в контроле смещений земной поверхности в условиях наличия водной среды и соровых участков / Кантемиров Ю.И., Камза А.Т., Бермуханова А.М., Тогайбеков А.Ж., Сапарбекова М.А., Никифоров С.Э. // Маркшайдерский вестник. – 2014. – №5. – С. 52-55.
64. Кантемиров, Ю.И. Некоторые аспекты применения технологии космической радарной интерферометрии в вопросах прогнозирования опасных ситуаций и определения опасных зон при ведении работ, связанных

пользованием недрами / Кантемиров Ю.И. // Маркшейдерский вестник. – 2014. – №6. – С. 49-53.

65. Мозер, Д.В. Результаты космического мониторинга подработанных территорий города Караганды по данным со спутника Envisat / Мозер Д.В., Гей Н.И., Нагибин А.А. // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №3. – С. 49-53.

66. Мусихин, В.В. Мониторинг деформационных процессов нефтепроводов методом радарной интерферометрической съемки / Мусихин В.В., Кашников Ю.А., Лысков И.А., Габур В.М. // Маркшейдерский вестник. – 2015. – №4. – С. 32-37.

67. Коли, Н. Мониторинг в реальном времени устойчивости бортов карьера с помощью усовершенствованной радиолокационной технологии / Коли Н., Райх У. // Маркшейдерский вестник. – 2016. – №2. – С. 31-35.

68. Васильев, Ю.В. Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне / Васильев Ю.В., Филатов А.В. // Маркшейдерский вестник. – 2016. – №3. – С. 38-45.

69. Филатов, А.В. Оценка горизонтальных смещений бортов карьера "Железный" Ковдорского ГОКа с использованием данных спутниковой радиолокационной съемки / Филатов А.В., Калашник А.И., Максимов Д.А. // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №1. – С. 36-41.

70. Акматов, Д.Ж. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности/ Акматов Д.Ж, Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. // Горная промышленность. – 2020. – №1. – С. 144-147

71. Мозер, Д.В. Инновационные наземные сканирующие системы в маркшейдерском деле / Мозер Д.В., Толеубекова Ж.З., Сатбергенова А.К. // Маркшейдерский вестник. – 2013. – №3. – С. 27-29.

72. Клебанов, А.Ф. Современная система контроля устойчивости бортов карьеров на основе использования радаров MSR/ Клебанов А.Ф., Макеев М.А., Монахов Н.В. // Горная промышленность. – 2015. – №1 (119). – С. 75

73. Розанов, И.Ю. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника "Железный" (АО "Ковдорский гок") / Розанов И.Ю., Завьялов А.А. // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2018. – №7. – С. 40-46.

74. Розанов, И. Ю. Исследование кинематических параметров обрушений массивов прочных скальных пород (на примере Ковдорского месторождения апатитовых и магнетитовых руд) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.8.6 / Розанов Иван Юрьевич. – Апатиты, 2023. – 23 с.
75. Левкин, Ю.М. Применение современных приборов при обеспечении маркшейдерского мониторинга предприятия многоцелевого использования / Левкин Ю.М. // Горный информационно аналитический бюллетень. – 2017. – №5. – С. 306-309.
76. Курков, М.В. Применение технологий Геоскан для маркшейдерских работ / Курков М.В., Семенов А.Е., Котов А.А. // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №3. – С. 42-48.
77. Кретов, С. И. Организация комплексного мониторинга устойчивости внешних отвалов, сложенных породами с низкой несущей способностью, на слабом основании в условия ПАО "Михайловский ГОК" / С. И. Кретов, Р. И. Исмагилов, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. – 2019. – № 3(145). – С. 15-19.
78. Исмагилов, Р. И. Внедрение беспилотных летательных аппаратов для оперативного решения научно-производственных задач в условиях Михайловского ГОКа им. А.В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев [и др.] // Горная промышленность. – 2020. – № 3. – С. 26-30.
79. Гальперин, А.М. Развитие технических средств и способов гидро-геомеханического мониторинга отвальных сооружений / Гальперин А.М., Пуневский С.А., Бородина Ю.В., Буй Куок Зунг // Маркшейдерия и недропользование. – 2015. – №3. – С. 22-30.
80. Кутепов, Ю.И. Технические средства и методика гидро-геомеханического мониторинга при формировании отвальных насыпей и намыве гидроотвала / Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Практика С.В., Мильман Г.Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – №1. – С. 48 – 54.
81. Кутепов, Ю.И. Оценка влияния гидро-геомеханических процессов в техногенных массивах высоких отвалов на геоэкологические условия территорий их размещения / Кутепов Ю.И., Мухина А.С. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – №1-2 (103). – С. 56-59.
82. Гальперин, А.М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / Гальперин А. М., Кутепов Ю. И., Кириченко Ю. В. [и др.]. –

Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Горная книга", 2012. – 336 с.

83. Гальперин, А. М. Гидрогеомеханические аспекты освоения техногенных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, В. В. Мосейкин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № S1. – С. 18-31.

84. Гальперин, А. М. Прогноз и мониторинг состояния отвальных сооружений горных предприятий / А. М. Гальперин, В. В. Мосейкин, Ю. И. Кутепов, В. В. Деревянкин // Сергеевские чтения. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Том Выпуск 19. – Москва: РУДН, 2017. – С. 150-155.

85. Гальперин, А. М. Совершенствование мониторинга техногенных массивов горных предприятий с применением дистанционных методов / А. М. Гальперин, С. А. Пуневский, В. В. Ческидов, А. М. Петряков // Сергеевские чтения. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, ИГЭ РАН. Том Выпуск 16. – Москва: РУДН, 2014. – С. 533-538.

86. Ческидов, В. В. Моделирование уровня техногенного водоносного горизонта в отвалах угольных разрезов / В. В. Ческидов, А. В. Липина, М. А. Красноцветов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № S5. – С. 3-19.

87. Гальперин, А.М. Гидрогеомеханический мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях / Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Круподеров В.С., Киянец А.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – №1. – С. 44-58.

88. Гальперин, А. М. Совершенствование системы удаленного гидрогеомеханического мониторинга откосных сооружений ОАО "Стойленский ГОК" / А. М. Гальперин, В. В. Ческидов, Е. А. Пантюхина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №S11. – С. 342-350.

89. Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследований : учебное пособие для геолог. специальностей вузов / В. К. Хмелевской, Ю. И. Горбачев, А. В. Калинин, М. Г. Попов, Н. И. Селиверстов, В. А. Шевнин ; [под ред. д. г.-м. н. Н. И. Селиверстова]. – Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004. – 232 с

90. Ескин, А.Ю. Изучение оползневых процессов на острове Ольхон с помощью комплекса геофизических методов / Ескин А.Ю., Джурик В.И., Себренников С.П., Брыжак Е.В. // Маркшайдерский вестник. – 2020. – №3. – С. 45-49.
91. Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. Л.: ВНИМИ, 1987.
92. Mesarovic M.D. Theory of hierarchical, multilevel, systems. / M. D. Mesarovic, D. Macko, Y. Takahara – New York and London : Academic press, – 1970. ё
93. Бахаева, С. П. Мониторинг природно-технических систем "отвал - основание" / С. П. Бахаева, Е. В. Ананенко // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 6(134). – С. 67-80.
94. Руководство по безопасности "Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03 ноября 2022 г. №387. – Серия 27. Выпуск 18. – Москва : ЗАО НТЦ ПБ, , 2023. – 60 с.
95. Демин, А.М. Устойчивость открытых горных выработок и отвалов – Москва: Недра, 1973.
96. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ : учебник для вузов / А.М. Гальперин. – М.: изд-во Московского государственного горного университета, 2003. – 473 с.
97. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко – Москва : Недра, 1965. – 380 с.
98. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л: ВНИМИ, 1972. – 165 с.
99. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – Недра, 1987, 221 с.
100. Разрушение. Том 2. Математические основы теории разрушения. – Мир, 1975, 764 с.
101. Носков, В. А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ / В.А. Носков, Б. П. Бадтиев, А.А. Павлович // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С. 51-55.

102. Шабаров, А. Н. Понятие геомеханического риска при ведении открытых горных работ / А.Н. Шабаров, В.А. Носков, А.А. Павлович, А.А. Черепов // Горный журнал. – 2022. – № 9. – С. 22-28.
103. Федосов, А. В. Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска / А. В. Федосов, Г.Р. Маннанова, Ю.А. Шипилова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2016. – № 3. – С. 322-336.
104. Australian Geomechanics Society (2000) Landslide risk management concepts and guidelines. AGS Sub-Committee on Landslide Risk Management, Sydney, Australia, March.
105. Hadjigeorgiou, J. Understanding, managing and communicating geo-mechanical mining risk // Proceedings of International Conference of mining geo-mechanical risk. ACG, 2019. Perth, Australia.– P. 3-20.
106. Tapia A. Risk Evaluation of Slope Failure at the Chuquicamata Mine', in Y Potvin / A. Tapia, LF. Contreras, M. Jefferies (ed.) // Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering , Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 477-495.
107. Гуща, Д.И. Качественная оценка геомеханических рисков по результатам долгосрочного мониторинга и 3d модели месторождения, построенной с применением мультикоптера / Д.И. Гуща, Е.В. Коврижных, Н.В. Еретнов и др. // Московский экономический журнал. – 2022. – №2. – С. 30-41.
108. Pine, R.J. and Roberds, W.J. (2005) A risk-based approach for the design of rock slopes subject to multiple failure modes – illustrated by a case study in Hong Kong. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42 (2005), Elsevier Ltd., pp. 261 – 275.
109. Маций, С. И. Оценка оползневого риска транспортных сооружений: монография / С.И. Маций, Е.В. Безуглова, Д.В. Плещаков. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 120 с.
110. Прокина, Д. Н. Применение информационных систем для оценки риска опасных производственных объектов / Д.Н. Прокина, А.В. Федосов, В.Б. Штур. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 73-79.

111. Лушников, В. Н. Надежность прогнозирования геотехнических рисков при ведении открытых горных работ / В.Н. Лушников, Д.А. Селиванов, В.П. Бережной // Горный журнал – 2023. – №1. – С. 4-13.
112. Read J. Open pit slope design. / J. Read, P. Stacey // Csiro publishing. – 2009. – p. 496.
113. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, М. Р. Пономаренко, Ю. Ю. Кутепов // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 69-74.
114. ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений: межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2020 г. №409-ст : взамен ГОСТ 24846–2012 / разработан НИИОСП им. Н.М. Герсеванова – АО "НИЦ "Строительство". – Москва : Стандартинформ, 2020. – 11 с.
115. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при разработке угольных месторождений открытым способом" : утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 ноября 2020 г. №436 : ввод в действие с 01.01.2021. – Серия 05. Выпуск 55. – 3-е изд., испр. – Москва : ЗАО НТЦ ПБ, 2023. – 140 с.
116. Справочник маркшейдера: в 3-х ч. Ч. I. – М: Издательство "Горное дело" ООО "Киммерийский центр", 2015. – 440 с. (Библиотека горного инженера. Т.7 Охрана недр. Кн. 1).
117. Методическое руководство по геодезическому (маркшейдерскому) контролю при мониторинге безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий / КузГТУ; Новационная фирма "Кузбасс-НИИОГР". – Кемерово, 2014. – 46 с.
118. Гордеев, В.В. О точности определения горизонтальных смещений при геотехническом мониторинге // Маркшейдерский вестник. – 20221. – №1(146). – С. 13-19.
119. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений : свод правил : утвержден и введен в действие Приказом министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр : дата введения 2017-06-17 / подготовлен Департаментом градо-

строительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. – Екатеринбург : УралЮрИздат, 2020. - 178 с.

120. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2021 г. N 1104-ст: введен впервые :дата введения 2022-01-01 / разработан ЗАО "НИЦ КД". – Москва : "РСТ", 2021. – 35 с.

121. Thomas, H. Slope stability prism monitoring: a guide for practising mine surveyors.– Johannesburg, 2011. – p. 123.

122. Голубко, Б.П. Оценка и контроль устойчивости отвала в выработанном пространстве карьера / Голубко Б. П., Шевелев А. А., Малышкин А. А. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2007. – № 8. – С. 32-35.

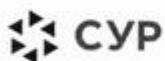
123. Малаханов, В. В. Классификация состояний и критерии эксплуатационной надежности гидroteхнических сооружений / Малаханов В. В. // Гидroteхническое строительство. – 2000. – № 11. – С. 8-14.

124. Жабко, А. В. Расчет критериев безопасности и критических значений контролируемых показателей при мониторинге безопасности намывных гидroteхнических сооружений / А. В. Жабко, Н. М. Жабко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11-2. – С. 25-38.

125. Бахаева, С. П. Обоснование критериев прогноза устойчивости природно-технических систем "отвал-основание" / С. П. Бахаева, Е. В. Ананенко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2025. – № 12-2. – С. 5-20.

Приложение А

Акты внедрения результатов исследования



ООО «СУР»
694910, Россия, Сахалинская
область, Углегорский район, пгт
Шахтерск, ул. Ленина, д. 16А

+7 (42432) 339-95
sur@eastmining.ru
www.eastmining.ru



УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «СУР»
К.К. Чашников
2024 г.

Акт внедрения
результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Ананенко Елены Владимировны

Настоящим Актом подтверждается, что с 2022 года ежегодно научно-исследовательской лабораторией «Устойчивость бортов карьеров» Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева на основании договоров на выполнение научно-исследовательских работ ведется научное сопровождение по геомеханической оценке и мониторингу горных работ ООО «Солнцевский угольный разрез» (ООО «СУР»), включающее геомеханическую оценку устойчивости фактического и планируемого положения горных выработок и отвалов, научное сопровождение результатов инструментальных (маркшейдерских и гидрогеологических) наблюдений и авторский надзор в части обеспечения устойчивости десяти отвалов ООО «СУР», которые формируются в сложных горно-геологических условиях, обусловленных резко расчлененным горным рельефом, высокой обводненностью и сейсмичностью района 9 баллов.

Ответственным исполнителем этой работы является Е.В. Ананенко. Под ее руководством и непосредственном участии ежегодно выполняется геомеханическая оценка фактического и проектного положения горных

Общество с ограниченной ответственностью «Солнцевский угольный разрез»

ИНН/КПП: 7706277053/650801001
ОГРН: 1027706006195



ООО «СУР»
694910, Россия, Сахалинская
область, Углегорский район, пгт
Шахтерск, ул. Ленина, д. 16А

+7 (42432) 339-95
sur@eastmining.ru
www.eastmining.ru

выработок и отвалов. На основании оценки фактического положения и анализа риска развития деформаций установлены зоны высокого риска нарушения устойчивости. Разработан проект геомеханического мониторинга бортов и отвалов, где для каждого отвала в зонах с высоким геомеханическим риском приведены: конструкция наблюдательной станции, методика геомеханического мониторинга и интерпретации результатов инструментальных наблюдений, критерии безопасности для оценки степени риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвалов.

Старшим научным сотрудником Е.В. Ананенко проводился анализ результатов инструментальных наблюдений, выполняемых службой геотехнического и гидротехнического мониторинга ООО «СУР», и для зон высокого риска разрабатывались мероприятия по предотвращению деформаций отвалов.

Результаты геомеханического мониторинга отвалов вскрышных пород показали эффективность управления устойчивостью этих сооружений за счет своевременного обнаружения начала деформационных процессов и разработки необходимых мероприятий по предотвращению опасных последствий.

Проведенные исследования с применением научных разработок Е.В. Ананенко позволили организовать безопасную эксплуатацию отвалов ООО «СУР» в сложных горно-геологических условиях при минимальных временных и материальных затратах.

Технический директор ООО «СУР»

А.А. Коса

Начальник управления геотехнического
и гидротехнического мониторинга ООО «СУР»

Б.Ю. Савченко

Общество с ограниченной ответственностью «Солнцевский угольный разрез»

ИНН/КПП: 7706277053/650801001
ОГРН: 1027706006195



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО "Олкон"

Н.Е. Селезнев

« _____ »

2025 г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ананенко Елены Владимировны

Комиссия в составе:

Председатель: генеральный директор АО "Олкон" Селезнев Н.Е.

Члены комиссии: главный инженер АО "Олкон" Русанов Р.В.

главный маркшейдер АО "Олкон" Дроздов А.А.

настоящим Актом подтверждает факт внедрения методики геомеханического мониторинга бортов и отвалов на карьерах месторождений АО "Олкон, разработанной в диссертационной работе Ананенко Елены Владимировны.

На основании договоров на выполнение научно-исследовательских работ лабораторией «Устойчивость бортов карьеров» Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в течении 2023-2025 гг. для месторождений АО "Олкон" выполнялся комплекс работ: **Геомеханические и гидрогеологические исследования для оценки устойчивости уступов и бортов карьеров и откосов отвалов**, который включал 10 этапов.

При выполнении этапа 8 – Разработка программы геомеханического мониторинга и мероприятий по недопущению аварийных ситуаций по объектам: Оленегорское, Комсомольское, Печегубское, Кировогорское, им. 15 лет Октября, Северная залежь (Куркенпахк), Восточный и Центральный участки Южно-Кахозерского месторождения реализованы результаты исследований, представленные в диссертационной работе Е.В. Ананенко.

Для каждого предприятия была разработана индивидуальная Программа геомеханического мониторинга, которая включала: конструкцию наблюдательных станций, методику наблюдений методами спутниковой геодезии, лазерного

сканирования и наземного георадара; интерпретацию результатов наблюдений, качественные и количественные критерии оценки напряжённо-деформируемого состояния бортов и отвалов.

Применение маркшейдерской службой предприятия научных разработок Е.В. Ананенко позволило оптимизировать полевые и камеральные работы при ведении геомеханического мониторинга, при этом обеспечена безопасная эксплуатация бортов и отвалов на карьерах месторождений АО "Олкон".

Главный инженер АО «Олкон»



P.V. Рusanов

Главный маркшейдер АО «Олкон»



A.A. Дроздов

Приложение Б

Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ №202566023

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025665023

Deformation control

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (RU)**

Авторы: **Ананенко Елена Владимировна (RU), Сиводедова Марина Викторовна (RU), Черепанов Павел Вадимович (RU)**

Заявка № **2025662703**

Дата поступления **21 мая 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 июня 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



Документ подписан в электронной форме
Сертификат цифровой подписи №00016401000000000000000000000000
Подпись: Зубов Юрий Сергеевич
Действует до 29.10.2026

Приложение В

Титульный лист "Методических рекомендаций по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего образования
 «Кузбасский государственный технический университет
 имени Т. Ф. Горбачева»

Согласовано:

Технический директор
 АО «УК «Кузбассразрезуголь»



А. А. Фадеев

«___» _____ 2025 г.

Утверждено:

Проректор по научной работе
 и международному сотрудничеству
 КузГТУ, к.т.н.



К. С. Костиков

«___» _____ 2025 г.

Согласовано:

Технический директор
 АО «СУЭК-Кузбасс», к.т.н.



А. М. Черданцев

«___» _____ 2025 г.

**МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО
 ПО ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ
 ОТВАЛОВ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД**

Кемерово 2025