

На правах рукописи



АНАНЕНКО ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

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

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева"

Научный руководитель:

Бахаева Светлана Петровна

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры маркшейдерского дела и геологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева"

Официальные оппоненты:

Жабко Андрей Викторович

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой маркшейдерского дела
ФГБОУ ВО "Уральский государственный горный университет", г. Екатеринбург

Кутепов Юрий Юрьевич

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамической безопасности научного центра геомеханики и проблем горного производства ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II", г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", г. Москва

Защита состоится «28» апреля 2026 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.321.02 на базе ФГБОУ ВО "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел.: +7(3842)39-63-68 e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2026/ana/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан " _____ " 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М.А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Вопросам геомеханического обеспечения открытой добычи полезных ископаемых в части управления устойчивостью отвалов посвящены труды многих ученых: Астафьева Е. Ю., Бабелло В. А., Бахасовой С. П., Галустьяна Э. Л., Гальперина А. М., Дашко Р. Э., Жабко А. В., Кутепова Ю. И., Мочалова А. М., Пустовойтовой 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 ведет 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 счет предотвращения 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" ("ЕТА") 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 более

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 аэрогазодинамика 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 хозяйственных 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ состояния вопроса геомеханического обоснования устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном основании.

Дефицит площадей под отвальные сооружения на большинстве горнодобывающих предприятий восполняется увеличением высоты существующих отвалов либо расположением их на наклонном слоистом основании, неблагоприятном с точки зрения устойчивости. В этой связи участились случаи оползней отвальных массивов.

Большой вклад в вопросы исследования устойчивости отвалов вскрышных пород внесли ученые ВНИМИ: Афанасьев Б. Г., Бряков С. П., Галустьян 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 этого коллектива являются "Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах" (1998 г). Научно-методические разработки "Правил..." положены в основу федеральных норм и правил (ФНиП) в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов" (2020 г.), утвержденных Ростехнадзором в качестве нормативного документа.

Вопросами геомеханического обоснования устойчивости отвалов и мониторинга техногенных сооружений занимались известные ученые: Гальперин А. М., Жабко А. В., Крячко О. Ю., Несмеянов Б. В., Хашин В. Н., Юнаков Ю. Л. Продолжение этих исследований нашло отражение в работах Кутепова Ю. Ю., Павловича А. А., Попова С. В., и др.

Анализ научно-исследовательских работ, материалов расследования причин оползней отвалов, расположенных на наклонном основании, результаты геомеханического мониторинга, проводимого автором настоящей диссертации более десяти лет на горнодобывающих предприятиях, 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.

Проведенными ранее исследованиями доказано, что отвалы находятся под влиянием нагрузок и воздействий, которые, в свою очередь, при различном их сочетании могут привести к изменению напряженно-деформированного состояния и спровоцировать деформацию сооружения. Однако, степень влияния активных сдвигающих нагрузок и воздействий от горнотранспортного оборудования

большой грузоподъемности, в пределах которых допустимы отклонения фактических параметров ПТС "отвал–основание" от проектных, не установлена.

Избежать деформаций откосов отвалов позволяет управление их устойчивостью за счет мер реагирования, установленных по результатам геомеханического мониторинга. Действующий в настоящий момент основной нормативный документ в области промышленной безопасности – ФНиП "Правила обеспечения устойчивости..." (2020 г.) и "Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов" (2022 г.) регламентируют требования только к точности и периодичности геомеханического мониторинга отвалов. Появление высокопроизводительного оборудования, новых программных продуктов и приборов, а также отсутствие в нормативных и методических документах информации о механизмах деформирования отвальных массивов и требований к критериальным показателям прогноза устойчивости отвалов вскрышных пород на наклонном основании по результатам мониторинга ставят перед необходимостью обновления существующей методической базы по геомеханическому мониторингу отвалов.

В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

Во второй главе разработана типизация природно-технических систем "отвал–основание", основанная на условиях их формирования, влияющих на устойчивость отвалов. Методом анализа риска установлены потенциальные сценарии деформаций и их вероятности, выделены механизмы и схемы деформирования различных ПТС "отвал–основание".

Для геомеханического обеспечения формирования отвалов на наклонном основании и решения задачи по прогнозу их устойчивости в период эксплуатации необходимо структурировать систему геомеханического мониторинга. Наиболее целесообразным подходом для этого является использование концепции многослойной и многоэшелонной иерархической структуры, включающей следующие УРОВНИ:

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

2. Обоснование механизма и схемы деформирования определенного типа ПТС "отвал–основание" от сочетания природных и техногенных условий ее формирования.

3. Проектирование конструкции наблюдательной станции (расположение профильных линий, опорных и рабочих реперов) в соответствии с механизмом и схемой деформирования ПТС "отвал–основание".

4. Утверждение критериев прогноза устойчивости ПТС "отвал–основание" – предельных значений количественных и качественных показателей состояния сооружения, соответствующих допустимому уровню риска нарушения устойчивости.

5. Разработка методики геомеханического обеспечения эксплуатируемых отвалов, включающей метод наблюдений, периодичность, точность, средства измерений (контрольно-измерительную аппаратуру) и интерпретацию результатов.

6. Сопоставление результатов наблюдений с критериальными показателями,

определяющими уровень риска развития деформации и нарушения устойчивости.

Типизация ПТС "отвал–основание" (1 УРОВЕНЬ) по условиям формирования, влияющим на ее устойчивость, анализ всех возможных вариантов сочетания типа отвала и его основания и оценка условий, при которых существует высокий риск развития деформаций откосного сооружения, реализованы методом системного анализа. Главная идея метода заключается в расчленении сложной проблемы на подпроблемы, этапы до определенного уровня с использованием признаков типизации.

Приняв за нулевой уровень главную цель – управление устойчивостью ПТС "отвал–основание", декомпозировали 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).

В свою очередь для каждого вида отвальной массы выделили четыре группы по типу пород основания, сопротивление сдвигу которых способствует удержанию гравитационных сил либо увеличению тангенциальных сил, приводящих к смещению отвальной массы: **A** – прочное; **B** – слабое основание и **B** – слабый контакт (слой, мощностью более 2 м и не более 2 м соответственно, представленный глинисто-суглинистыми породами, сопротивление сдвигу которых ниже, чем у отвальной массы); **Г** – земная поверхность, подработанная подземными горными работами.

Под влиянием внешних нагрузок и воздействий сопротивление сдвигу пород основания в процессе эксплуатации сооружения уменьшается. В этом случае при достижении условия $\varphi' \leq \beta$ априори без разработки противодеформационных мероприятий устойчивость отвала не будет обеспечена. Вследствие этого при типизации ПТС "отвал–основание" выделены два условия: сопротивление сдвигу пород основания φ' больше (1) либо меньше (2) угла его наклона β .

В свою очередь характеристики пород основания отвалов подвержены воздействию группы факторов, оказывающих как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивость ПТС "отвал–основание", это морфология естественного (**c** – склон или **л** – лог) и техногенного (мульда сдвижения при подработке поверхности подземными горными работами, когда откос отвала направлен от (3) или к (4) вектору максимального оседания η_{\max} мульды сдвижения) рельефа земной поверхности.

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

Логический анализ иерархической схемы позволил перейти к вероятным схемам деформирования ПТС "отвал–основание", позволяющим установить сценарии развития деформаций и их вероятности. В качестве метода анализа риска, который позволил установить алгоритм последующих событий, исходящих из основного события (превышение качественных показателей уровня опасности 0), использовали метод "Анализ дерева событий" (Event Tree Analysis – "ЕТА"), где частоту каждого сценария развития деформации ПТС "отвал–основание" рассчитывали путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события.

Таблица 1

Механизм и схемы деформирования ПТС "отвал-основание"

Схема 1	Схема 2
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	II.A.1, II.B.1, III.A.1, III.B.1
Просадка в результате уплотнения, $F < 0,7$	Вращательный сдвиг, $F = 0,7$
Схема 3	Схема 4
III.A.2, III.B.2, I.G.4, III.G.4	II.A.2, II.B.2, II.G.4
Просадка со сдвигом вдоль контакта, $F = 0,7$	Вращательно-плоский сдвиг, $F > 0,7$
Схема 5	Схема 6
I.B.1, II.B.1, III.B.1	I.B.2, II.B.2, III.B.2
Вращение с выпором, $F > 0,7$	Вращательно-плоский сдвиг с выпором, $F > 0,7$
<p>a – ширина призмы возможного обрушения; S – зона сдвижения; H – высота отвала; b – ширина вала выпирания; h – глубина погружения в слабый слой</p>	

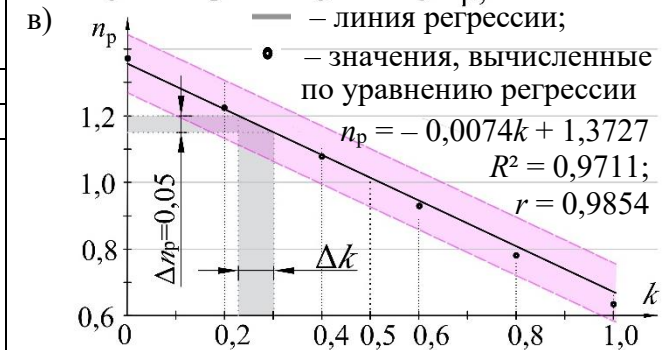
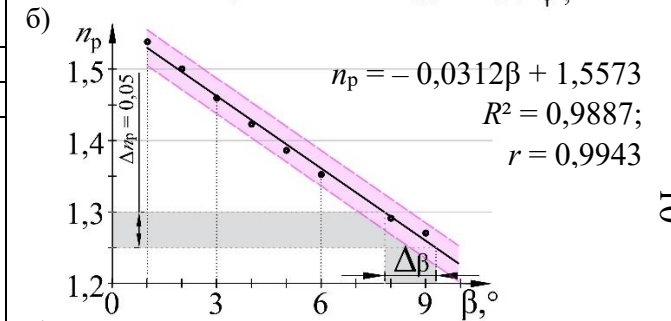
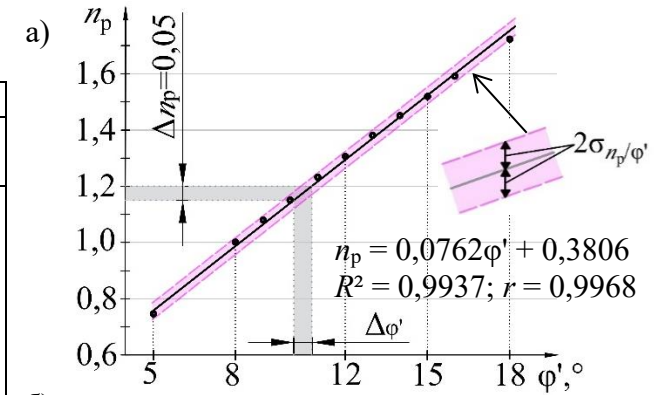


Рисунок 1 – Зависимость расчетного коэффициента устойчивости n_p от приращения аргументов: а) φ' ; б) β ; в) k

Интеграцией иерархической схемы типизации ПТС "отвал–основание" и результатов анализа риска "Анализ дерева событий" установили, что в зависимости от природных и техногенных условий формирования отвалов развитие деформации может произойти по одной из шести схем (таблица 1).

Анализ причин оползней отвалов вскрышных пород позволил определить, что механизм смещения отвальной массы на 70 % определяется 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. Вследствие водонасыщения пород основания происходит снижение сопротивлению сдвигу по подошве отвала ($F > 0,7$), и в зависимости от типа пород основания, их мощности и угла наклона основания возможно деформирование откосов отвала по схемам вращательно плоский сдвиг ($\beta \leq 5^\circ$), вращение с выпором ($\beta \leq 5^\circ$) или вращательно-плоский сдвиг с выпором ($\beta > 5^\circ$).

Натурными экспериментальными исследованиями, проводимыми автором в 2015–2025 гг. на различных отвалах, установлено, что наиболее активное смещение отвальной массы (с максимальными величинами в плане) происходит в пониженных участках рельефа (талъвегах логов) – стадия управляемых деформаций. Затем происходит смещение отвала со склонов в сторону талъвега лога – стадия неуправляемых деформаций, когда происходит нарушение устойчивости откосов отвалов. Сдвиговые деформации ПТС "отвал–основание" вдоль контакта происходят при превышении критического значения показателя F ($F > 0,7$). По мере увеличения F начинается процесс вращательного смещения с выпором, при $F = 1,0$ происходит нарушение устойчивости отвала.

В третьей главе изложены результаты исследований влияния параметров отвала и основания, физико-механических свойств отвальной массы, сопротивления сдвигу пород основания, внешних воздействий (сейсмических, гидростатических и гидродинамических) и нагрузок (гравитационных, тангенциальных) на устойчивость ПТС "отвал–основание".

Природно-техническая система "отвал–основание" подвержена пространственно-временному изменению объемного напряженного состояния. Под воздействием различных неблагоприятных факторов система может перейти в предельное состояние и в этом случае происходит деформация ПТС "отвал–основание", поэтому актуальна задача изучения влияния нагрузок и воздействий на устойчивость сооружения.

Для исследования влияния нагрузок и воздействий на устойчивость ПТС "отвал–основание" принят метод векторного сложения сил, позволяющий учитывать контакт отвала с основанием, по которому сопротивление сдвигу значительно меньше, чем по другим направлениям.

Суммарное воздействие активных сдвигающих и препятствующих им внутренних реактивных сил сопротивления, определяющих устойчивость ПТС "отвал–

основание", оценивается критерием устойчивости – расчетным коэффициентом устойчивости n_p и выражается функцией вида

$$n_p = F(C, \varphi, \gamma, C', \varphi', H, \alpha, \beta, P^{об}, k, Q). \quad (1)$$

Выразим результативный показатель n_p через измеренные значения аргументов и их приращения: 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; $P^{об}$ и $\Delta_{P^{об}}$ – удельная нагрузка от оборудования; k и Δ_k – гидростатическое давление – представляет собой суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления и выражается коэффициентом обводнения; Q и Δ_Q – сейсмические нагрузки.

В результате преобразований выражения (1), установлено, что приращение результативного показателя (допустимое отклонение расчетного коэффициента устойчивости от нормативного значения) обуславливается приращениями аргументов:

$$\Delta_{n_p} = F(\Delta_C + \Delta_\varphi + \Delta_\gamma + \Delta_{C'} + \Delta_{\varphi'} + \Delta_H + \Delta_\alpha + \Delta_\beta + \Delta_{P^{об}} + \Delta_k + \Delta_Q). \quad (2)$$

В качестве приращения функции n_p принято допустимое отклонение от нормативного значения коэффициента запаса устойчивости $\Delta_{n_p} = 0,05$, рекомендованное ВНИМИ.

Исследования влияния аргументов на стабильность функции n_p проведены на графической модели ПТС "отвал–основание", построенной по экспериментальным данным 20 внешних отвалов со среднестатистическими характеристиками: $H = 120$ м, $\alpha = 14^\circ$, $\beta = 7,5^\circ$, $C = 22$ кПа, $\varphi = 28^\circ$, $\gamma = 18,9$ кН, $C' = 15$ кПа, $\varphi' = 12^\circ$ (индекс по схеме типизации отвалов – П.В.1.л), на которых произошли деформации сдвига по контакту отвала с основанием.

Методический подход к проведению исследований влияния аргументов на устойчивость ПТС "отвал–основание" заключался в пошаговом выполнении следующих операций:

- создание графической модели со среднестатистическими характеристиками отвалов экспериментальной выборки;

- расчет коэффициента устойчивости ПТС "отвал–основание" методом векторного сложения сил путем последовательного изменения аргументов функции (1) в интервале от максимального до минимального значений с заданным шагом интервала h .

- определение уравнения регрессии коэффициента устойчивости n_p от аргументов: C , φ , γ , C' , φ' , H , α , β , $P^{об}$, k , Q , приведенных в формуле (1), и приращений аргументов во всем диапазоне факторных показателей, при которых приращение функции достигнет предельного значения.

В результате анализа, проведенного на графической модели ПТС "отвал–основание", получены значения приращений аргументов для каждой группы измеряемых показателей, при которых приращение функции Δ_{n_p} не превысит 0,05.

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

Расчетный коэффициент устойчивости ПТС "отвал–основание" n_p линейно связан с наиболее значимыми аргументами (угол внутреннего трения и наклон основания, угол откоса отвала, коэффициент обводнения отвального массива). Уравнения связи коэффициента устойчивости от приращения угла внутреннего трения, наклона основания и коэффициента обводнения, коэффициенты детерминации (R^2) и корреляции (r) приведены на рисунке 1.

Среднеквадратические отклонения $\sigma_{n_p/\varphi'}$, $\sigma_{n_p/k}$ и $\sigma_{n_p/\beta}$ коэффициента устойчивости n_p , полученного по экспериментальным данным, от вычисленного по уравнению регрессии n_p^B составили 0,014, 0,043 и 0,012 соответственно, погрешности коэффициентов корреляции – $m_{r/\varphi} = 0,0019$, $m_{r/D} = 0,0046$, $m_{r/\beta} = 0,0038$.

Достоверность связи оценивалась отношением коэффициента корреляции к его погрешности r / m_r . Полученные значения превышают 2,58, следовательно, с вероятностью 99 % уравнение регрессии отображает зависимость между расчетным коэффициентом устойчивости и исследуемыми аргументами.

Расчеты распределения значений критерия Кулона-Мора методом конечных элементов подтверждают полученные закономерности образования зон предельного состояния, где формируется поверхность скольжения в отвале. В рассматриваемом случае наблюдается развитие поверхности скольжения вдоль границы отвала с основанием (рисунок 2).

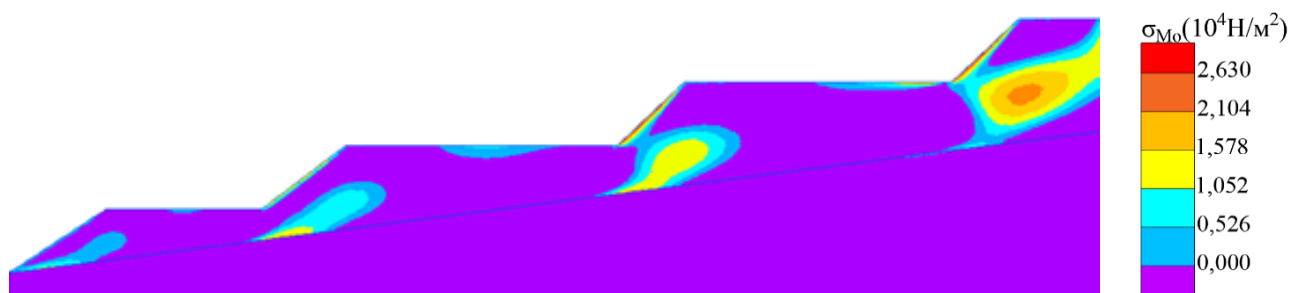


Рисунок 2 – Распределение значений критерия Кулона – Мора на модели ПТС "отвал–основание"

Риск развития деформаций и вероятность нарушения устойчивости от исследуемых аргументов функции n_p оценивали по формуле

$$P = BO \cdot TP, \quad (3)$$

где BO – вероятность обрушения, устанавливалась в автоматизированном режиме с использованием программного комплекса Slide2; TP – тяжесть последствий,

оценивалась на качественном уровне по матрице рисков "частота – тяжесть последствий".

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 (изменения аргументов функции (1)). Максимальный уровень риска развития деформаций прогнозируется как "высокий" – E4 при высокой степени вероятности возникновения сценариев: увеличение наклона и уменьшение угла внутреннего трения пород основания; подъем уровня воды в основании / теле отвала.

В четвертой главе обоснованы критерии оценки уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании. Обоснование критериев базируется на экспериментальных результатах геомеханического мониторинга ПТС "отвал–основание", проводимого автором на ряде объектов.

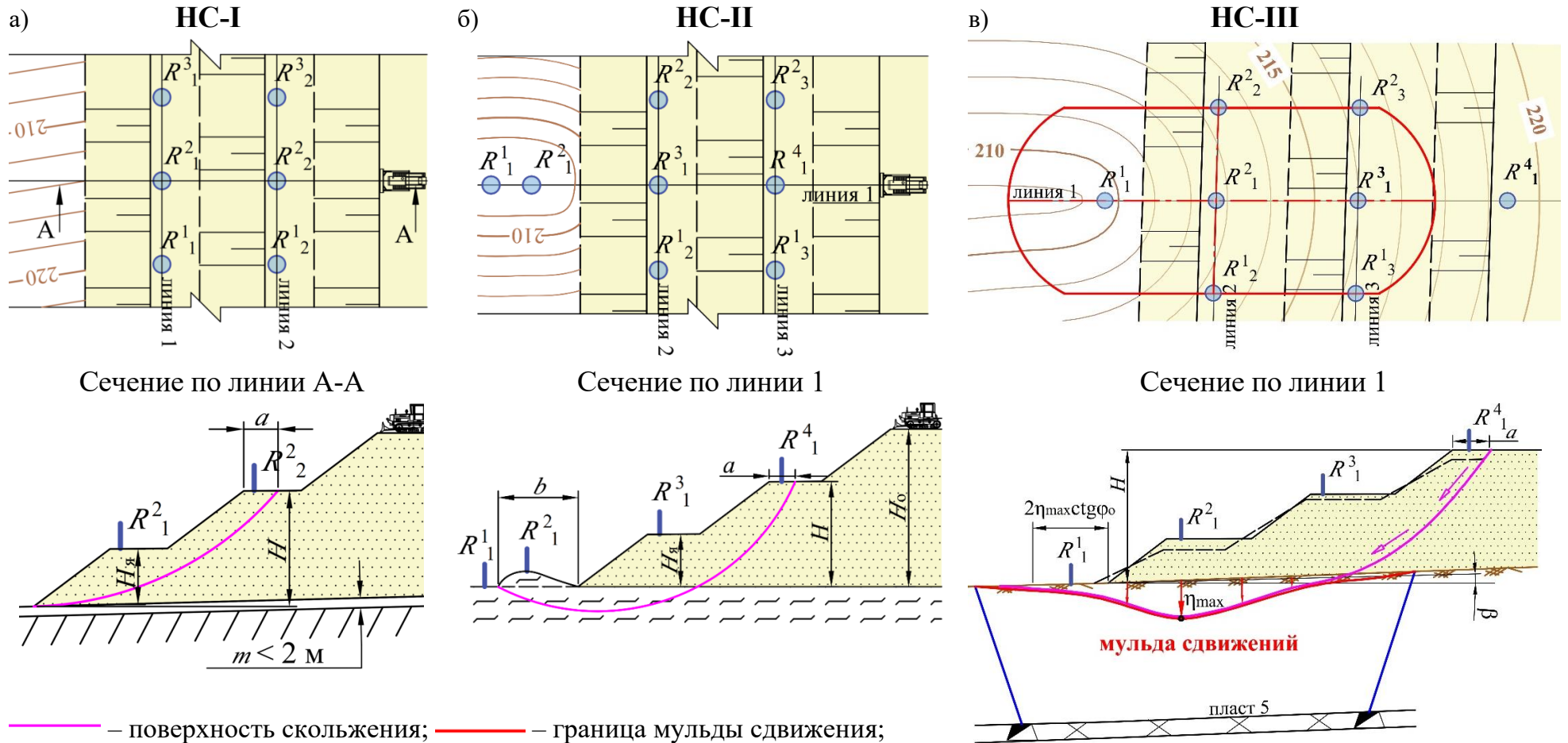
Существующие методы контроля (инженерно-геологический, гидрогеологический, геофизические) геомеханического состояния массива горных пород позволяют установить характеристики массива, влияющие на его состояние, и учесть их при оценке устойчивости ПТС "отвал–основание", при этом только метод маркшейдерско-геодезического контроля дает возможность определять скорость смещения отвального массива.

Главными задачами геомеханического мониторинга ПТС "отвал–основание" являются:

- создание конструкции наблюдательной станции с учетом типа ПТС "отвал–основание", механизма и схем деформирования пород отвала по контакту с основанием, позволяющим обнаружить деформации на начальных этапах их проявления;
- обоснование критериев уровня геомеханического риска развития деформаций для прогноза устойчивости отвалов на наклонном основании;
- сопоставление результатов натуральных наблюдений с критериальными значениями и оценка на этой основе уровня геомеханического риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала;
- разработка мер реагирования в случае превышения критериальных значений.

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

На основании выполненных исследований разработаны три вида конструкций наблюдательных станций (рисунок 3) для проведения инструментальных наблюдений в зависимости от механизма и схем деформирования ПТС "отвал–основание". Обозначены условия, при которых достаточно выполнять только визуальный контроль.



— — поверхность скольжения; — — граница мульды сдвижения;
← — направление оседания дневной поверхности; - - - — главные сечения мульды сдвижений;
↖ — вектор смещения отвальной массы; ϕ_0 — граничный угол сдвижения в наносах;
● 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)

Рисунок 3 – Конструкция наблюдательных станций согласно схеме деформирования: а) НС-I; б) НС-II; в) НС-III

Обычно деформации ПТС "отвал–основание" по схемам 1 (просадка в результате уплотнения) и 2 (вращательный сдвиг) не создают серьезных негативных последствий для окружающей среды. Происходит закономерный процесс уплотнения и выполаживания откосов. Поэтому при этих схемах деформирования достаточно вести визуальный контроль или съемку беспилотной авиационной системой (БАС) поверхности приоткосной части отвала до момента обнаружения визуальных признаков деформаций, в случае их появления выполнять инструментальный контроль.

Конструкция наблюдательной станции **НС-I** рекомендуется для инструментальных наблюдений за отвалами всех типов пород (**I, II, III¹**), расположенных на прочном (**A**) основании или со слабым контактом (**B**), при наклоне основания согласно с откосом, когда сопротивление сдвигу по подошве отвала φ' в результате водонасыщения пород становится меньше угла его наклона β (**2**) – это схемы деформирования 3 (просадка со сдвигом вдоль контакта) и 4 (вращательно-плоский сдвиг).

Конструкция наблюдательной станции **НС-II** рекомендуется при формировании отвалов всех типов пород, расположенных на слабом основании (**B**) и при наличии в основании логов. В этом случае происходит вращение или вращательно-плоский сдвиг призмы обрушения с выпором по схемам деформирования 5 и 6.

Конструкция наблюдательной станции **НС-III** рекомендуется при формировании отвалов всех типов пород, расположенных на подработанной территории (**Г**) при совпадении откоса отвала с направлением вектора максимального оседания мульды сдвижения (**4**). В случае подработки изначально происходит просадка отвальных пород в границах мульды сдвижения (схема 1), затем смещение отвала к центру мульды сдвижения (схемы деформирования 3 или 4).

При выборе контрольно-измерительной аппаратуры для проведения наблюдений необходимо руководствоваться среднеквадратической погрешностью (СКП) определения положения репера, которая зависит от точности прибора и удаленности рабочего репера относительно опорного (согласно требованиям нормативных документов не должна превышать в плане и по высоте ± 30 мм). СКП смещения репера для двух серий наблюдений в этом случае составит $m_{\Delta} = 30\sqrt{2} = 42$ мм.

Выбор метода наблюдений зависит от схемы деформирования ПТС "отвал–основание", скорости развития деформаций, возможности доступа к рабочим реперам наблюдательной станции, рельефа местности. Основные методы мониторинга за деформациями, формулы и номограммы для определения СКП положения реперов различными средствами измерения обоснованы в диссертации и приведены в Методическом руководстве по геомеханическому мониторингу отвалов вскрышных пород, разработанном автором.

Обработка результатов геомеханического мониторинга маркшейдерско-геодезическими методами и спутникового определения координат выполняется в программе "*Deformation control*". Прогноз устойчивости ПТС "отвал–основание" обеспечивается сопоставлением результатов геомеханического мониторинга

¹ Жирным шрифтом указаны шифры объектов согласно типизации ПТС "отвал–основание"

с качественными и количественными диагностическими характеристиками – критериями уровня геомеханического риска.

Руководствуясь требованиями нормативных документов, научными разработками, аналитическими расчетами, а также экспериментальными данными многолетних наблюдений на различных отвалах, где происходили оползни, автором установлены качественные и количественные критерии оценки уровня геомеханического риска и состояния отвалов, расположенных на наклонном основании.

В зависимости от возможного уровня опасности автором предложено выделять три вида состояния ПТС "отвал–основание" (таблица 2). Первый – при работоспособном состоянии, когда величина полного вектора смещения не превышает погрешности инструментальных измерений. Второй – при частично неработоспособном, когда в зависимости от скорости смещения отвальной массы состояние массива изменяется от предельно-допустимого до предаварийного. Третий – при неработоспособном (аварийном) состоянии, для которого характерен очень высокий уровень геомеханического риска, поэтому необходимо запретить ведение горных работ.

Экспериментальными данными установлена нелинейная зависимость коэффициента обводнения отвала со скоростью полного вектора смещения отвальной массы:

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

- при коэффициенте обводнения $k = 0,5$ скорость полного вектора смещения превысила 92 мм/сут, произошел 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.

Итоговая оценка уровня опасности и геомеханического риска нарушения устойчивости ПТС "отвал–основание" по результатам геомеханического мониторинга заключается в сопоставлении фактических показателей с качественными и количественными критериями, установлении периодичности наблюдений и мер реагирования в соответствии с уровнем геомеханического риска.

Таблица 2

Показатели оценки устойчивости отвалов на наклонном основании по результатам геомеханического мониторинга

Состояние	Работоспособное		Частично неработоспособное		Неработоспособное
	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	Перейти на дистанционный контроль в режиме реального времени
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 требуются		Разработать противоползневые мероприятия по снижению уровня риска до низкого	Приостановить работы на участке	Запретить ведение горных работ

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 ($\Delta\varphi' = 0,5^\circ$) 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 учетом 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.

**Основное содержание диссертации опубликовано в изданиях,
рекомендованных ВАК России**

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

2. **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.

3. **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.

4. **Ананенко, 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.

5. Бахаева, С. П. Мониторинг природно-технических систем "отвал–основание" / С. П. Бахаева, **Е. В. Ананенко** // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 6(134). – С. 67–80.

6. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

Публикации по пп. 1, 3, 4, 6, а также 7–9.

7. **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).

8. 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).

9. 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).

Свидетельства на объект интеллектуальной собственности

10. Свидетельство № 2025665023 о государственной регистрации программы для ЭВМ "Deformation control" / **Е. В. Ананенко**, М. В. Сиводедова, П. В. Черепанов // заявка от 21.05.2025; № 2025662703; зарегистр. 09.06.2025.

Прочие публикации

11. **Ананенко, Е. В.** Конструкция наблюдательной станции на основе анализа риска развития деформаций природно-технической системы "отвал–

основание" / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Сборник научных трудов III Международного форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков "Проблемы горного дела". Донецк. – 2023. – С. 165–170.

12. **Ананенко, Е. В.** Анализ причин деформаций отвалов вскрышных пород / Е. В. Ананенко, С. П. Бахаева // Сборник научных трудов II Международного форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ "Проблемы горного дела". –Донецк. – 2021. – С. 328–332.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 5, 6, 8, 9] – обработка результатов, описание и визуализация материала, анализ экспериментальных данных;

[2–7, 11–12] – моделирование и экспериментальные исследования, обобщение результатов, написание основного объема статьи;

[3, 5, 6, 11] – инструментальные наблюдения на отвалах вскрышных пород, обработка и анализ экспериментальных данных;

[10] – разработка алгоритма программы, идея визуализации графиков и векторных данных.

Ссылка на бланк согласия на обработку персональных данных лица, предоставляющего отзыв на автореферат диссертации:

<https://cloud.mail.ru/public/SLr8/JCLJikxyW>

Подписано в печать 24.02.2026. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе

Усл. Печ. л 1,5. Тираж 100 экз. Заказ №__

Кузбасский государственный технический университет

имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Издательский центр Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачёва, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а