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

На правах рукописи

Караблин Михаил Михайлович

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Специальность: 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор С. М. Простов

содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМА МОНИТОРИНГА СТРОЕНИЯ, СОСТОЯНИЯ И	
ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ	
ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ	10
1.1 Нарушение устойчивости откосных сооружений на угольных разре-	
зах Кузбасса и других регионов	10
1.2 Методы прогноза устойчивости откосных сооружений	20
1.3 Методы контроля физического состояния массива горных пород	33
1.3.1 Прямые методы контроля	35
1.3.2 Косвенные методы контроля	39
1.4 Выводы, цель и задачи исследований	45
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ БАЗ	
ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ, РАЗРАБОТКА	
АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА ОСНОВЕ	
ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	48
2.1 Метод обработки результатов кругового сейсмического зондирова-	
ния	48
2.2 Метод обработки результатов электропрофилирования	52
2.3 Методы и локальные алгоритмы реализации элементов объемных	
геолого-геофизических моделей откосных сооружений	56
2.4 Общий алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на	
основе объемных геолого-геофизических моделей	66
Выводы	68
ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ	
СООРУЖЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО СЛОЖЕНИЯ	70
3.1 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах техногенно-	
го водонасыщения	70
3.2 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах естествен-	
ного водонасыщения	75
3.3 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах влияния	
подземных горных работ	90
Выводы	94
ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ	97

СООРУЖЕНИЙ ТЕХНОГЕННОГО СЛОЖЕНИЯ

4.1 Прогноз устойчивости откосов деформированного техногенного					
массива, прилегающего к гидроотвалу					
4.2 Прогноз устойчивости откосов техногенных массивов при отработ-					
ке намывных пород	102				
4.3 Оценка повышения точности прогноза устойчивости откосных со-					
оружений	107				
Выводы	112				
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ					
ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ НА ОСНОВЕ					
ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ	115				
5.1 Методика прогноза устойчивости откосных сооружений угольных					
разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей	115				
5.2 Внедрение разработок при ведении горных работ на угольных раз-					
резах	115				
Выводы	119				
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120				
Список литературы	123				
Приложения					
А Фрагмент программы расчета коэффициента анизотропии акустиче-					
ских свойств пород прибортового массива	131				
Б Фрагмент программы расчета мощности рыхлых четвертичных от-					
ложений по результатам электрических зондирований	135				
В Фрагмент программы «Устойчивый борт»	138				
Г Титульный лист «Методических указаний по созданию объемных					
геолого-геофизических моделей бортов угольных разрезов и прогнозу					
их устойчивости»	142				
Д Акт внедрения результатов исследования	143				

введение

Актуальность темы. Разработка угольных месторождений открытым способом неразрывно связана с формированием откосных сооружений – бортов горных выработок и отвалов. В процессе их формирования происходит изменение параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород, увеличивается риск возникновения геомеханических процессов в виде осыпей, обрушений, оползней, оплывин и просадок.

Анализ причин нарушения устойчивости бортов разрезов и откосов отвалов показывает, что развитие геомеханических процессов в большинстве случаев приурочено к зонам массивов, имеющим аномальные характеристики по плотности, влажности и прочности. Геомеханическое обоснование параметров откосных сооружений выполняют на основе баз данных, включающих сведения о пространственно-геометрических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях залегания структурных элементов геологической среды путем интерполяции скважинных данных в межскважинном пространстве, полученных прямыми методами изысканий – построением скважинных сетей, что исключает возможность своевременного выявления аномальных зон. В результате факторы, влияющие на возникновение геомеханических процессов, могут быть не выявлены или выявлены частично за счет недостаточной детализации.

В настоящее время широкое распространение получили геофизические методы, основанные на взаимосвязи параметров состояния и свойств горных пород с параметрами разного рода физических полей, обеспечивающие необходимую детализацию.

Наибольшее распространение нашли методы сейсмического и электромагнитного зондирования с земной поверхности. Классические методики электрических зондирований и профилирований используются для контроля пространственно-временных изменений свойств прибортового массива, диагностирования формирования локальных аномальных зон, прогнозирования свойств глинистых пород в этих зонах. Весьма перспективно развитие электротомографии (многоэлектродного зондирования), обеспечивающего построение двумерных геоэлектрических разрезов. Методы сейсмомониторинга с использованием различных схем измерений, методик и программных комплексов для интерпретации их результатов применяются для оценки деформаций прибортовых массивов, определения физико-механических свойств пород, степени разрушения породных массивов.

Накоплен значительный опыт в проведении исследований прямыми и геофизическими методами на угольных разрезах, наработаны информативные базы данных, функционируют системы непрерывного геомониторинга, разработаны программные комплексы для автоматизированного прогноза процессов оползнеобразования откосов. Вместе с тем, точность прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов остается недостаточной по следующим причинам: не разработаны методы количественной интерпретации результатов геофизичезондирований, обеспечивающие построение объемных ских геологогеофизических моделей (ОГГМ) бортов разрезов; не обоснованы принципы автоматизированного выбора наиболее опасного сечения в объемной постановке; не изучены особенности применения ОГГМ для прогноза устойчивости откосных сооружений естественного сложения и техногенных.

Таким образом, актуальным является развитие методов прогноза процессов оползнеобразования откосных сооружений в объемной постановке.

Работа является развитием и научно-практическим продолжением проекта № П234 «Диагностирование физического состояния при укреплении неустойчивых зон грунтовых оснований горнотехнических сооружений для снижения риска техногенных аварий», выполненного при поддержке ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России», а также НИР № 110-2015, №100-2016, №104-2017, выполненных по заказам АО «УК «Кузбассразрезуголь» и НФ «КУЗБАСС-НИИОГР».

Цель работы – обоснование и разработка методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе ОГГМ, обеспечивающей повышение точности оценки вероятности оползнеобразования, для безопасного ведения горных работ и снижения затрат на предотвращение технологических аварий.

Основная идея работы заключается в объединении в объемной цифровой модели баз данных маркшейдерско-геодезических измерений, инженерногеологических изысканий, гидрогеологического мониторинга и геофизических зондирований, разработке на этой основе алгоритмов построения расчетных сечений и автоматизированного поиска наиболее оползнеопасных участков откосного сооружения. Таким образом, под ОГГМ понимают базу цифровых данных, объединяющую результаты комплекса указанных выше изысканий, необходимую и достаточную для автоматизированного прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов. **Объект исследований** – прибортовые массивы горных выработок и отвалов угольных разрезов, сложенные природными песчано-глинистыми, дисперсными мягкими связными и техногенно перемещенными дисперсными рыхлыми породами.

Предмет исследования – процессы оползнеобразования в откосных сооружениях (бортах) угольных разрезов, взаимосвязанные с неоднородностью физических свойств слагающих их горных пород.

Основные задачи исследований:

- совершенствование методов обработки баз данных геофизических зондирований, разработка алгоритмов прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей;

- исследование особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений естественного сложения;

- исследование особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений техногенного сложения;

 разработка и реализация методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей.

Методы исследований: ретроспективный анализ методов исследований состояния и свойств прибортовых массивов и прогноза их устойчивости; метод статистических испытаний («Монте-Карло») при обработке данных геофизических зондирований; методы формирования триангуляционной модели прибортового массива, построения вероятной поверхности скольжения, расчета устойчивости откосного сооружения векторным сложением сил; обратные геомеханические расчеты при прогнозе свойств деформированных массивов; методы разработки циклических алгоритмов обработки баз данных, геомеханических расчетов и их реализации в программных продуктах.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

- повышение детализации расположения границ оползнеопасных разуплотненных зон прибортового массива обеспечивается по критическим значениям коэффициента сейсмической анизотропии $K_a > 1,6$, а изменений мощности рыхлого влагонасыщенного слоя четвертичных отложений – по аномалиям эффективного удельного электросопротивления $\rho_k > 0,2$ от среднего обеспечивается решением обратных задач геофизического зондирования методом адаптивного случайного поиска; - алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей, включающий построение триангуляции прибортового массива, поверхностей ослабленных разуплотненных и влагонасыщенных зон, автоматизированное построение вероятных поверхностей скольжения и расчет коэффициента запаса устойчивости, циклический поиск оползнеопасного участка и направления развития оползня путем перебора множества расчетных сечений через задаваемые величины линейного и углового шагов, обеспечивает повышение точности прогноза на 21,9-25,6%;

 - локальные зоны сдвижения, связанные с подработкой, а также зоны влагонасыщения, вызванные сезонными водопритоками и влиянием гидротехнических сооружений в бортах разрезов естественного сложения диагностируются только методами геофизического зондирования, отражаются с достаточной детальностью на объемных моделях и снижают коэффициент запаса устойчивости более чем в 2 раза;

- повышение вероятности оползнеобразования откосных сооружений техногенного происхождения связано с эксплуатацией гидроотвалов при деформировании участков бортов с формированием слоя оползших намывных пород, имеющего сложную форму, а при возведении ограждающих сооружений на намывном основании зависит от уровня избыточного порового давления в диапазоне 0,05-1,0 МПа, что требует кроме геофизического прогноза изменения механических свойств намывного массива вследствие водоотдачи и консолидации обязательного гидромеханического мониторинга.

Научная новизна работы заключается:

- в разработке алгоритмов оценки расположения границ оползнеопасных разуплотненных и влагонасыщенных зон при сейсмо- и электрозондировании на основе адаптивного случайного поиска;

 в обосновании и экспериментальной реализации методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных цифровых геолого-геофизических моделей, включающего автоматизированный поиск наиболее опасного участка и направления развития оползня, обеспечивающего принципиальное повышение точности прогноза;

- в выявлении особенностей формирования объемных геологогеофизических моделей прибортовых массивов естественного сложения с учетом влияния процессов подработки, локального техногенного и природного влагонасыщения; - в установлении основных факторов, снижающих устойчивость техногенных прибортовых массивов, сформированных при деформировании гидроотвалов и при разработке намывных горных пород.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- корректным применением методов обработки данных геофизического зондирования, достаточными критериями тесноты связи и надежности оценки в полученных корреляционных зависимостях;

- надежностью использованных натурных экспериментальных данных, полученных аттестованными организациями АО «ВНИМИ», НФ «КУЗБАСС-НИИОГР», геолого-геофизической экспедицией АО «Уголь» Республики Узбекистан, КузГТУ;

- положительными результатами внедрения разработанных рекомендаций на угольных разрезах Сибирского региона и Республики Узбекистан.

Личный вклад автора заключается:

- в теоретическом обосновании, разработке алгоритмов, программ для ЭВМ обработки данных геофизических зондирований, методик формирования триангуляционных моделей, построения вероятных поверхностей скольжения и расчета устойчивости откосных сооружений;

- в систематизации, анализе и обработке баз данных инженерногеологических, маркшейдерско-геодезических изысканий, гидромеханического мониторинга, геофизических зондирований, включая установление корреляционных зависимостей, прямые и обратные геомеханические расчеты.

Научное значение работы состоит в обосновании, разработке и практической реализации объемного подхода к решению проблемы прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе геолого-геофизических моделей, снижающего влияние человеческого фактора и тем самым принципиально повышающего точность прогноза.

Отличие от ранее выполненных работ заключается:

- в применении метода адаптивного случайного поиска при обработке данных (инверсии) сейсмических и электрофизических зондирований;

- в разработке комплекса алгоритмов, реализующих формирование баз данных инженерно-геологического, маркшейдерско-геодезического, гидромеханического и геофизического мониторинга;

- в обосновании, практической реализации и экспериментальном доказательстве эффективности применения объемных геолого-геофизических моделей для прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов.

Практическая ценность работы состоит:

- в разработке методик и программ для ЭВМ, обеспечивающих построение объемных геолого-геофизических моделей и прогноз на их основе устойчивости откосных сооружений (бортов) угольных разрезов естественного и техногенного сложения;

- в обосновании рекомендаций по безопасному ведению горных работ на угольных разрезах Сибирского региона и Республики Узбекистан.

Реализация работы. Основные положения, отражающие практическую реализацию работы изложены в отраслевом методическом документе:

Методические указания по созданию объемных геолого-геофизических моделей бортов угольных разрезов и прогнозу их устойчивости / КузГТУ, ОАО «Кузбассгипрошахт». – Кемерово, 2021. – 31 с.

Методический документ согласован с Сибирским филиалом АО «ВНИМИ» и принят к использованию ОАО «Кузбассгипрошахт» при проектировании горных работ и СФ АО «ВНИМИ» при выполнении экспертных заключений.

Полученные научно-практические результаты используются в учебном процессе КузГТУ при чтении курса «Физико-технический контроль и мониторинг процессов горного производства».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы рассмотрены на: всероссийской конференции-конкурсе студентов выпускного курса (Санкт-Петербург, 2014); международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2014); XV международной научнопрактической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014» (Кемерово, 2014); IV международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2019); XII всероссийской, научно-практической конфер еренции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (Кемерово, 2020); международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в т.ч. 8 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 22 таблицы, список литературных источников из 109 наименований, 5 приложений.

ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМА МОНИТОРИНГА СТРОЕНИЯ, СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

1.1 Нарушение устойчивости откосных сооружений на угольных разрезах Кузбасса и других регионов

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом связана с риском развития геомеханических процессов, наиболее опасными из которых являются оползни бортов горных выработок и отвалов [1].

Согласно указаниям ВНИМИ на устойчивость бортов разрезов неблагоприятно влияет четыре группы факторов: инженерно-геологические; гидрогеологические; физико-географические; горно-технические (рис. 1.1) [2].



разрезов

В дополнении к перечисленным группам факторов на устойчивость отвалов влияние оказывают: процентное соотношение во вскрыше отдельных литологиче-

ских разностей; сопротивление сдвигу отвальных пород; прочностные свойства пород основания отвалов; технология отвалообразования [2].

В большинстве случаев объектом локализация деформаций в геологическом разрезе являются песчаные и глинистые горные породы. Песчано-глинистые породы на угольных месторождениях представлены как покровными образованиями четвертичного возраста Q_{3-4} мощностью до 50 м и более [3-5], так и залегающими на глубинах до 300 м (глины и пески палеогенового P_2^{3-1} , мелового K_2 , юрского J_1 . 3, триасового T возрастов) [6, 7]. Согласно источнику [8] показатели сопротивления сдвигу (угол внутреннего трения φ и сцепление C) песчаных и глинистых пород изменяются в пределах, представленных в таблицах 1.1 и 1.2 соответственно.

Таблица 1.1

Показатели сопротивления сдвигу песчаных пород					
D	Обозначение	Значения при коэффициенте пористости е			
вид песчаных пород		0,45	0,55	0,65	0,75
Гравелистые и крупные	<i>С</i> , МПа	0,002	0,001	-	-
	ф, град	43	40	38	-
Средней крупности	<i>С</i> , МПа	0,003	0,002	0,001	-
	ф, град	40	38	35	-
Пылеватые	<i>С</i> , МПа	0,008	0,006	0,004	0,002
	ф, град	36	34	30	26

Таблица 1.2

показатели сопротивления сдвигу глинистых пород						
Состояние пород	Глины		Суглинки		Супеси	
(консистенция)	ф, град	<i>С</i> , МПа	ф, град	<i>С</i> , МПа	ф, град	<i>С</i> , МПа
Твердая	22	0,100	25	0,060	28	0,020
Полутвердая	20	0,060	23	0,040	26	0,015
Тугопластичная	18	0,040	21	0,025	24	0,010
Мягкопластичная	14	0,020	17	0,015	20	0,005
Текучепластичная	8	0,010	13	0,010	18	0,002
Текучая	6	0,005	10	0,005	14	0,000

П

В последнее время на угольных разрезах Кузбасса и других регионов зафиксирован ряд оползневых явлений, которые нанесли не только экономический и экологический ущерб предприятиям и природной среде, но и являлись причиной смертельных травм [9].

В 2001 г. на участке №4 Латышевского поля ОАО «Разрез Кедровский», расположенном в Кедрово-Крохалевском каменнугольном месторождении, произошел оползень внешнего отвала [3]. Высота внешнего отвала достигала 80 м, результирующий угол – 26-29°. Основание отвала представлено слоем слабого обводненного суглинка. Зона влияния оползня составила 650 м, объем – 700 тыс. м³, мощность – 20 м. Повреждены ЛЭП, выведены из строя экскаваторы ЭКГ – 4 и ЭКГ – 8и, законсервированы вскрытые запасы угли объемом 110 тыс. т. Причинами произошедшего оползня являются: обводненность складируемых вскрышных пород и пород основания, интенсивная отсыпка на небольшой площади, ошибки при проектировании вследствие недостаточной детализации геологического строения основания отвала.

В этом же году на восточном борту участка «Основное поле» в районе профилей 287-307 произошел оползень объемом 500 тыс. м³. Длина оползневого участка составила 200 м, высота до деформирования – 89 м, угол наклона – 31-32°. Причина деформирования – подрезка естественных поверхностей ослабления в почве пласта «Кемеровский».

В 2002 г. на северо-западном борту ООО «Разрез Губернский», расположенном в Соколовском каменноугольном месторождении, произошел оползень борта, сформированного в четвертичных суглинках [3]. Мощность отложений составила 10 м, подстилающего слоя сизых илов – 2-3 м. На расстоянии 15 м от верхней бровки борта расположен отвал высотой 5 м. Размеры оползня в плане составили 110×50 м, объем – 55 тыс. м³. В результате оползня законсервированы вскрытые запасы угля объемом 210 тыс. м³. Причины произошедшего оползня – подрезка естественных поверхностей ослабления и водонасыщение отвальных пород.

С января по апрель 2003 г. происходил многоцикличный оползень юговосточного борта ЗАО «Разрез Майский», расположенного в Соколовском каменноугольном месторождении [3]. Мощность четвертичных отложений изменялась от 39 до 63 м, угол падения слоистости в выработанное пространство – от 8 до 10°. Зона влияния оползня составила 100 м, глубина – 50 м, объем – 250 тыс. м³. В результате формирования оползня объем вскрышных работ увеличился в 2 раза. Причины оползня – инфильтрация атмосферных осадков, подрезка естественных поверхностей ослабления.

В октябре 2003 г. произошел оползень северо-западного гидровскрышного борта участка № 3 ОАО «Разрез Сартаки», расположенном в Бачатском каменноугольном месторождении [3]. Борт сложен четвертичными суглинками. На расстоянии 10 м от верхней бровки борта расположен внешний отвал. Ширина оползня составила 120 м, мощность – 47 м, зона влияния – 100 м, объем – 85 тыс. м³. Оползнем разрушено полотно технологической автодороги и насыпь железнодорожного тупика. Причина оползня – изменение физико-механических свойств пород массива вследствие водонасыщения.

С февраля 2004 г. по сентябрь 2005 г. на разрезе «Караканский-Южный» филиала ООО «КеНоТЭК», расположенном в Караканском каменноугольном месторождении, происходило многоцикличное развитие оползня рабочего борта, сформированного в четвертичных отложениях [3]. Высота борта составляла 35 м. Массив сложен в верхней части суглинками, в основании – плотными и вязкими глинами. Падение естественных поверхностей ослабления в сторону выработанного пространства под углом 8°. Ширина призмы обрушения 30 м, зона влияния – 20 м, объем – 85 тыс. м³. В результате оползня на участке остановлены добычные работы на 7 месяцев. Причины оползня – подрезка естественных поверхностей ослабления, водонасыщение атмосферными осадками.

В 2005 г. произошел оползень внешнего отвала филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» [3]. Высота отвала до оползня составляла 106 м, результирующий угол откоса – 20-27°. Основание нарушено выемкой глубиной до 10 м, угол наклона основания составлял 11°. Зона влияния оползня составила 80 м, объем – около 450 тыс. м³, результирующий угол уменьшился до 17-19°. В результате оползня повреждены несколько опор ЛЭП, пульпопровод гидроотвала «Бековский», полотна технологических автомобильной и железной дорог. Ущерб составил 7 млн. руб. Также при ведении горных работ в период с 1999 по 2015 гг. зафиксирован ряд как произошедших, так и формирующихся оползней бортов и уступов, сложенных рыхлыми четвертичными и коренными породами. Деформирование происходило без нанесения значительного ущерба предприятию. К причинам оползней и деформаций отнесены: снижение эффективных напряжений вследствие водонасыщения и избыточного порового давления; подрезка естественных поверхностей ослабления.

В ноябре 2005 г. на разрезе «Мугунский», расположенном в Мугунском буроугольном месторождении (Иркутская область) произошло 2 оползня внутреннего отвала. Ширина оползня составила 140 м, объем – 56 и 68 тыс. м³ соответственно. В мае и июне 2006 года произошло еще 2 оползня внутреннего отвала. Ширина оползня составила 90 и 140 м, объем – 50 и 70 тыс. м³ соответственно. Зона влияния оползня не превышает 15 м. Смещение отвала происходит по поверхности скольжения, выходящей на контакт в основании отвала на небольшом удалении (на расстоянии 10-15 м) от нижней бровки отвала. В 2010-2011 гг. оползневые явления повторились. Объем оползней в 2010 году составил 400 тыс. м³, в 2011 – 250 тыс. м³. Причины оползня: несоблюдение условий селективной отсыпки отвальных пород; несоответствие предельных параметров отвала физико-механическим свойствам пород отвального массива и основания; снижение эффективных напряжений по контакту «отвал-основание» в результате водонасыщения.

В 2006 г. при формировании отвала сухой вскрыши на гидроотвале «Бахтыхтинский» Новосергеевского поля «Краснобродского угольного разреза» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» произошел оползень со ступенчатым опусканием верхней площадки откоса и выдавливанием верхней части намывного массива гидроотвала. Намывные породы были перемещены за пределы гидроотвала в горные выработки, а их место заняли сползшие отвальные массы. Ширина оползня составила 250 м, объем оползневых масс – 500 тыс. м³. В результате оползня законсервированы запасы угля. Причина оползня – снижение эффективных напряжений в следствие возникновения избыточного порового давления [10].

С 2007 г. на разрезе «Ургунский» АО «Сибирский Антрацит», расположенном в Горловском каменноугольном месторождении, зафиксировано 10 опасных зон по геомеханическим процессам. На участке развита гидрографическая сеть в виде временных, постоянных и подрусловых водотоков на глубинах до 30 м. Восемь опасных зон представлены циклично развивающимися покровными оползнями бортов в четвертичных отложениях мощностью до 50 м, две - деформированными откосами внешнего отвала. Общий объем оползневых масс – 1925 тыс. м³. Выполненными электрическими зондированиями методом ВЭЗ-ВП выделены два типа аномалий УЭС, расположенных в прибортовой зоне, ширина которой достигает 200 м. Первый тип представляет собой выдержанный по площади слой небольшой мощности, связанный с грунтовыми водами четвертичных отложений. Второй тип имеет более сложную структуру, он представлен линзовидными аномальными областями, вытянутыми в направлении выработанного пространства и приуроченными к верхней части выветрелых коренных пород. Приповерхностные аномалии залегают на глубинах от 0 до 12 м, глубинные – от 10 до 30 м. Наиболее вероятной причиной произошедших деформаций является снижение прочностных свойств структурно ослабленных пород в призме упора вследствие водонасыщения и влияния процессов физического выветривания. На формирование оползней неблагоприятное влияние оказывают в большей мере инженерно-геологические и гидрогеологические факторы. К инженерно-геологическим факторам отнесена значительная мощность четвертичных отложений, имеющих высокую склонность к изменению физико-механических свойств во времени (набухание, выветривание, разуплотнение). Влияние гидрогеологических факторов обусловлено развитием гидрографической сети месторождения, представленной временными, подрусловыми и постоянными (руч. Ургунчик), водотоками в результате чего происходит формирование водонасыщенных зон, залегающих на глубинах до 30 м от земной поверхности. Общая протяженность зон деформаций по простиранию равна 2270 м, что составляет 45% от общего периметра горной выработки (на северном борту – 250 м; на западном и восточном бортах – 560 м; на южном борту – 900 м). Основной причиной геомеханических процессов является снижение прочностных свойств пород четвертичных отложений вследствие водонасыщения.

На внешнем отвале разреза «Бородинский имени М. И. Щадова», расположенном в Канско-Ачинском каменноугольном бассейне, в 2010 г., произошел оползень западного откоса. Размеры оползня в плане составили: протяженность вдоль откоса отвала – 150 м, ширина призмы обрушения – до 130 м, объем – 27 тыс. м³. Основной причиной формирования призмы обрушения стало снижение сопротивления сдвигу глинистых пород отвального массива за счет насыщения техногенных и естественных грунтов водой сезонного водоема, расположенного на поверхности отвала. В результате схода оползня возникла угроза разрушения железнодорожного пути, примыкающего к транссибирской магистрали [11].

В 2009 г. при отсыпке второго яруса разделительной перемычки гидроотвала №3 филиала «Кедровский угольный разрез» ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» произощла дефорация в виде подподошвенного оползня протяженность 250 м по фронту 60 м. Мощность вала выпирания составила 13 м, объем оползневых масс – 300 тыс. м³.

В 2012 г. на разрезе «Горловский» АО «Сибирский Антрацит», расположенном в Горловском каменноугольном месторождении, происходило цикличное формирование оползня на северо-восточном борту, создавшего угрозу дальнейшей безопасной работы на данном участке. Высота деформированной части борта составила 190-200 м, результирующий угол до смещения призмы обрушения – 35°, после – 22°. По литологическому составу прибортовой массив представлен переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов и углистых аргиллитов. Залегание пород нарушено дизъюнктивной и пликативной тектоникой. Размер структурных блоков не превышает 0,4 м. Падение слоистости ориентировано как в выработанное пространство, так и в массив. Положение призмы упора совпадает с осью Восточной антиклинали.

На дневной поверхности вблизи верхней бровки борта расположен заболоченный участок. На высоте 10 м от нижней бровки борта зафиксировано высачивание подземных вод на откос. Поверхность прибортового массива до оползня была нарушена промоинами, образовавшимися вследствие отсутствия регулирования стока поверхностных вод. Объем оползневых масс составил 840 тыс. м³. Причины оползня: снижение прочностных свойств структурно ослабленных пород в призме упора вследствие водонасыщения; влияние процессов физического выветривания.

В апреле 2015 г. на разрезе «Заречный» ОАО «СУЭК-КУЗБАСС», расположенного в северной части Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса, произошло деформирование откоса внешнего отвала №1. На момент деформирования высота отвала достигала 140 м, обводнение техногенным водоносным горизонтом – 40-60 процентов [12]. Значения результирующих углов откосов изменялось в пределах от 10 до 16°. Отвальная смесь представлена скальными и глинистыми породами неоген-четвертичного возраста в соотношении 60 на 40 процентов. Основание отвала в оползневой части представлено тальвегом лога с углами наклона в среднем 4-8°, сложено суглинками мягкопластичной и твердой консистенции, а также выветрелым аргиллитом. Площадь распространения оползня достигла 94 га, объем оползневых масс – 27,5 млн. м³, размеры в плане – 1,5×0,8 км. В результате схода оползня были разрушены технологическая автодорога, железнодорожный путь, ЛЭП, перекрыто русло р. Кыргай. Общий ущерб оценен в 8 млрд. рублей. Причины оползня – снижение эффективных напряжений в результате водонасыщения глинистых пород основания и отвала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания.

Причиной гибели трех человек стал оползень, произошедший в декабре 2015 г. на разрезе «Черниговский», расположенном северо-восточной части Кедровско-Крохалевского каменноугольного месторождения. Обрушение произошло между профильными линиями 230-270 (гор. +180 ÷ -20 м). Размер призмы обрушения в плане составил 440×380 м, объем оползневых масс – 500 тыс. м³. Причина оползня – подрезка естественных поверхностей ослабления борта, нагруженного вскрышными породами.

Приостановкой процесса отвалообразования и нанесением экологического ущерба природной среде в октябре 2017 г. завершился оползень откоса внешнего

отвала №1 участка «Березовский-Восточный» ЗАО «Стройсервис», расположенного северной части Бунгуро-Чумышского геолого-экономического района Кузбасса. Высота отвала в момент деформирования достигала 127 м, мощность отвального массива – 100 м при значении результирующего угла – 19°. Основание отвала представлено двумя частично заболоченными логами с углами наклона 5° (локально 11°) и сложено под почвенно-растительным слоем делювиальными суглинками, а с глубины 6,6-7,5 м – аллювиальными серыми суглинками туго- и мягкопластичной консистенции. К тальвегам логов приурочено русло р. Матюшинская. Площадь распространения оползня составила 25,5 га, ширина – 250 м, зона влияния – 1160 м, мощность – до 34 м, объем – 24,6 млн. м³. Смещение оползневых масс продолжалось до столкновения с дамбой р. Матюшинская, в результате чего был поврежден ее низовой откос и уничтожен пруд. Причины оползня – снижение эффективных напряжений в результате водонасыщения глинистых пород основания и отвала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания.

Вероятно, одним из оползнеопасных угольных разрезов в мире считается «Ангренский», расположенный на территории Уртачирчикского района Ташкентской области Республики Узбекистан в долине р. Ахангаран между Чаткальским и Кураминским хребтами (Ангренское каолино-буроугольное месторождение). С 1954 года по настоящее время на разрезе зафиксирован ряд оползней, крупнейшими из которых являются Центральный и Северный [13-17].

Более детально развитие оползневых процессов на разрезе «Ангренский» рассмотрено в главе 3.

В июне 2019 г. в результате оползня на внешнем отвале разреза «Кийзасский» повреждены девять опор линий электропередач и перекрыто русло р. Большой Кийзас протяженностью 800 м. Длина тела оползня составила 700 м, средняя мощность – 5 м, объем – 2,8 млн. м³. Основными причинами оползня являются: снижение эффективных напряжений в результате водонасыщения глинистых пород основания и отвала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания

В декабре 2020 г. на угольном разрезе «Виноградовский» филиала ПАО «Кузбасская Топливная Компания», расположенном в Караканском угольном месторождении, произошло обрушение северо-западного борта в четвертичных отложениях на участке открытых горных работ №1. В результате обрушения погиб машинист гидравлического экскаватора. Объем оползня составил 60 тыс. м³. Ос-

18

новными причинами оползня являются: несоответствие физико-механических свойств горных пород параметрам борта, несоответствие фактических параметров борта проектным. Выборочные данные по произошедшим оползням представлена в таблице 1.3. На рис. 1.2 представлен график объемов оползневых масс Q на разрезах Кузбасса и других регионов.

Таблица 1.3

Объект (дата)	<i>Q</i> , млн. м ³	Причина оползня	Последствия оползня
1	2	3	4
 Внешний отвал участка №4 Латы- шевского поля ОАО «Разрез Кедровский» (10-17.08.2001) 	0,700	Обводненность складируемых вскрышных пород и пород осно- вания, интенсивная отсыпка на небольшой площади, ошибки при проектировании вследствие недо- статочной детализации геологиче- ского строения основания отвала	Повреждены ЛЭП, вы- ведены из строя экскава- торы ЭКГ – 4 и ЭКГ – 8и, законсервированы вскрытые запасы угля объемом 110 тыс. т.
 Рабочий борт разреза «Караканский- Южный» филиала ООО «КеНоТЭК» (02.2004-09.2005) 	0,085	Подрезка естественных поверхно- стей ослабления, водонасыщение атмосферными осадками	Остановлены добычные работы на 7 месяцев
 Внешний отвал филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» (14.06.2005) 	0,450	Снижение эффективных напряже- ний вследствие водонасыщения и избыточного порового давления; подрезка естественных поверхно- стей ослабления	Повреждены несколько опор ЛЭП, пульпопро- вод гидроотвала «Беков- ский», полотна техноло- гических автомобильной и железной дорог. Ущерб составил 7 млн. руб.
 4. Внешний отвал № 1 разреза «Заречный» (01.04.2015) 	27,500	Снижение эффективных напряже- ний в результате водонасыщения глинистых пород основания и от- вала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания	Разрушены технологи- ческая автодорога, же- лезнодорожный путь, ЛЭП, перекрыто русло р. Кыргай. Общий ущерб – в 8 млрд. рублей
5. Борт в районе про- фильных линий 230- 270 разреза «Черни- говский» (09.12.2015)	0,500	Подрезка естественных поверхно- стей ослабления борта, нагружен- ного вскрышными породами	Погибло 3 человека
 Внешний отвал №1 участка «Березов- ский-Восточный» (31.10.2017) 	24,600	Снижение эффективных напряже- ний в результате водонасыщения глинистых пород основания и от- вала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания	Разрушен низовой откос дамбы на р. Матюшин- ская, уничтожен пруд

Характеристика оползней бортов горных выработок и отвалов на горных предприятиях

1	2	3	4
7. Северо-западный борт разреза «Ан- гренский» - Оползень «Центральный» (апрель 1985 – 2018)	120,000	Инфильтрация поверхностных и подрусловых вод через разрывные нарушения, за счет чего образует- ся естественная поверхность ослабления на «подрезанном» участке за счет механической суффозии песков и снижения по- казателей сопротивления сдвигу увлажненных глин сузакского яруса палеогена	Разрушение автодороги федерального значения А-373 «Ташкент – Ко- канд», увеличен объем вскрышных работ
8. Внешний отвал разреза «Кийзасский» (июнь 2019)	2,800	Снижение эффективных напряже- ний в результате водонасыщения глинистых пород основания и от- вала. несоответствие параметров отвала несущей способности его основания	Повреждены девять опор линий электропе- редач и перекрыто русло р. Большой Кийзас про- тяженностью 800 м
 9. Северный борт разреза «Ангрен- ский» - оползень «Северный» (май 1999 – 08.07.2019) 	25,000	Инфильтрация поверхностных и подрусловых вод через разрывные нарушения, за счет чего образует- ся естественная поверхность ослабления на «подрезанном» участке за счет механической суффозии песков и снижения по- казателей сопротивления сдвигу увлажненных глин сузакского яруса палеогена	Разрушен карьер по до- быче каолина, увеличен объем вскрышных работ
10. Северо-западный борт разреза «Вино- градовский» (22.12.2020)	0,060	Несоответствие физико- механических свойств горных по- род параметрам борта, несоответ- ствие фактических параметров борта проектным	Погиб 1 человек

В таблице принято сокращение: *Q* – объем оползневых масс.



Рис. 1.2 – Динамика формирования оползневых процессов по годам

Формирование оползней в плане было приурочено к зонам, имеющим аномальные характеристики влажности. В бортах горных выработок при естественной влажности глинистые породы способны сохранять устойчивость в течение длительных временных промежутков, однако при увлажнении проявляют набухаемость и пластичность [18]. Песчаные породы подвержены на поверхности откосов воздушной и водной эрозии, а при вскрытии на глубине – механической суффозии. При формировании отвалов эти породы в водонасыщенном состоянии снижают несущую способность: глинистые – за счет избыточного порового давления при консолидации; песчаные приобретают плывунные свойства.

Представленные примеры свидетельствуют о значительном ущербе, обусловленном нарушением устойчивости откосных сооружений: гибель людей, ущерб природной среде, экономические затраты [19]. Данный факт говорит о нерешенности в полной мере задачи обеспечения устойчивости как бортов горных выработок, так и откосов отвалов. В этой связи представляется актуальным совершенствование методов детализации свойств и состояния естественных и техногенных горных пород, а также учета их изменчивости при прогнозе устойчивости.

1.2 Методы прогноза устойчивости откосных сооружений

Согласно действующему нормативному документу – федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» при ведении открытых горных работ для прогноза устойчивости откосных сооружений основными являются детерминированные методы (предельного равновесия; численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива) и вероятностные [20].

Основоположником теории предельного равновесия является французский ученый Ш.О. Кулон [21]. В настоящее время существует большое количество методов предельного равновесия. В работах [22-24] они разделены на четыре класса:

Класс А (основной метод В.В. Соколовского, расчетные способы и схемы И.С. Мухина и А.И. Срагович, А.М. Сенкова, Ю.А. Соболевского, И.Д. Молюкова, Г.Л. Фисенко, В.Т. Сапожникова, В.И. Пушкарева, Ю.Н. Малюшицкого, С.С. Голушкевича, А.И. Говядинова – С.В. Фальковича, номограммы Н.К. Звонарева) – методы, предусматривающие построение контура откоса, являющегося внешней границей зоны, во всех точках которой удовлетворяется условие предельного равновесия [25-28].

Класс А разделен на две группы методов: в первой используется численное, а во второй – графическое интегрирование дифференциальных уравнений предельного напряженного состояния.

Этим методом рассчитывают предельно напряженные состояния откосов: вогнутого профиля и нагруженных уступов (обобщенная задача У. Ренкина); выпуклого профиля (решение В.Т. Сапожникова), включающие поверхности ослабления в массиве.

Несмотря на достоинства методов данного класса в виде строгого математического обоснования решения, он также имеет следующие недостатки [23-25]:

 невозможность применения в случаях произвольной формы откоса и эпюры внешней нагрузки;

 сложность или невозможность применения в случаях наличия в массиве поверхностей ослабления (контактов слоев, трещин и т. д.);

 трудоемкость и непригодность при адаптации к сложным горногеологическим условиям (сейсмичность, обводненность, объемная задача и т. д.), а также занижение углов откосов.

Класс Б – методы Н.Н. Маслова, М.Н. Троицкой. Предусматривают построение контура откоса, вдоль которого удовлетворяется равенство угла наклона касательной углу сопротивления сдвигу. Методы характеризуются разбивкой откоса на горизонтальные слои и определением устойчивого угла наклона каждого слоя с учетом массы вышележащих пород.

Класс В – методы, предусматривающие построение в массиве откоса поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия. В данном классе выделено пять групп методов: в первой расчет производят на основе плоской поверхности скольжения (Г. Франсе, О. Винклера, Л.Н. Бернадского, П.Н. Цымбаревича, О.Т. Токмурзина); во второй – по круглоцилиндрической при условии равновесия всего откоса (способы В. Феллениуса, Д. Тейлора, М.М. Соколовского, А.И. Иванова, О. Фрелиха, А. Како, И.В. Федорова, М.Н. Гольдштейна – *t*-фактор, графоаналитический и аналитический методы М. Н. Гольдштейна) и отдельных вертикальных блоков (способы С. Хюльтина, Г. Крея – К. Терцаги, Р.Р. Чугаева, О.В. Вяземского, А. Бишопа, А.Л. Можевитинова, Г.М. Шахунянца – многоугольник сил); в третьей группе – по поверхности скольжения в виде логарифмической спирали (способы Л. Рендулика, Н.П. Пузыревского – П.И. Кожевникова, Ю.С. Козлова – В.А. Будкова); в четвертой – по сложной криволинейной формы (способы Г.Л. Фисенко, С.Н. Никитина, Л.В. Савкова, вариационные способы И. Копачи, Ю.И. Соловьева, А.Г. Дорфмана); в пятой – по ломаной (А.П. Ясюнас – прислоненного откоса, Н.Н. Маслова – горизонтальных сил, Р.Р. Чугаева – наклонных сил).

Класс Г – методы, предусматривающие построение поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия (методы ВНИМИ – Г.Л. Фисенко, Н.Н. Куваева, Э.Л. Галустьяна, ГИГЧС – М.Е. Певзнера, Э.Г. Газиева, В.И. Речицкого, Э.А. Фрейберга – Гидропроекта, Л.В. Савкова – ВНИИЦветмета, П.Н. Панюкова – МГИ, И.И. Попова и Р.П. Окатова – КарПИ). В методах данного класса определение сдвигающих и удерживающих сил производится с учетом прочностных характеристик, действующих по поверхностям ослабления массива.

Для различных поверхностей скольжения к перечисленным необходимо добавить способы: Янбу, Моргенштерна-Прайса, Спенсера [24].

В отечественной практике наиболее распространенными являются методы: алгебраического сложения моментов и векторного сложения (многоугольника) сил [2, 3, 20, 22-25, 28-32].

Метод алгебраического сложения моментов сил имеет допущение о том, что призма обрушения представляет собой жесткий клин, при этом поверхность скольжения имеет вогнутую круглоцилиндрическую форму. Коэффициент запаса устойчивости *n* вычисляют согласно расчетной схеме (рис. 1.3) по формуле

$$n = \frac{\sum M_{y\pi}}{\sum M_{c\pi}} = \frac{R t g \phi_i \sum_{i=1}^k N_i + R \sum_{i=1}^k c_i l_i}{R \sum_{i=1}^k T_i} = \frac{t g \phi_i \sum_{i=1}^k N_i + \sum_{i=1}^k c_i l_i}{\sum_{i=1}^k T_i},$$
(1.1)

где N_i , T_i – нормальная и касательная составляющая веса расчетного блока, кН; φ – угол внутреннего трения горных пород, град; c – сцепление горных пород, кН/м²; R – радиус поверхности скольжения, м; где i – номер расчетного блока; k – количество расчетных блоков.



Рис. 1.3 – Схема к расчету устойчивости откосного сооружения методом алгебраического сложения моментов сил: α_{отк} – результирующий угол откоса; α_i – угол наклона поверхности скольжения в середине блока; y_i – средняя ордината, отсчитываемая от горизонтальной плоскости *A*-*A*; *H_i* – статический уровень подземных вод; b_i – ширина расчетного блока; D_i – проекция вектора силы гидростатического давления; l_i – длина поверхности скольжения в пределах расчетного блока; P_i – вес расчетного блока; H₉₀ – глубина трещины отрыва

При наличии обводнения и подтопления откоса силу гидростатического давления *D_i* и коэффициент запаса устойчивости *n* определяют по формулам:

$$D_i = \frac{\gamma_{\rm B}(H_i - y_i)b_i}{\cos\alpha_i}; \qquad (1.4)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{k} \left\{ \left[(P_i \cos \alpha_i + P_i^{\mathsf{B}} \frac{\cos(\alpha_{\mathsf{otk}} - \alpha_i)}{\cos \alpha_{\mathsf{otk}}} - D_i) \right] tg\phi_i + c_i l_i \right\}}{\sum_{i=1}^{k} [P_i \sin \alpha_i + P_i^{\mathsf{B}} \frac{\sin(\alpha_{\mathsf{otk}} - \alpha_i)}{\cos \alpha_{\mathsf{otk}}})},$$
(1.5)

где $\gamma_{\rm B}$ – объемный вес воды, к H/m^3 ; $P_i^{\rm B}$ – вес «свободной» (находящейся выше линии откоса) воды в пределах блока, кH.

Метод векторного сложения (многоугольника) сил является наиболее универсальным. В этом методе используются сосредоточенные силы, действующие по площадкам, разграничивающим смежные блоки призмы возможного обрушения (рис. 1.4).

В расчет принимают следующие силы: P_i – вес расчетного блока, кH; cl – силы сцепления, направленные параллельно соответствующим границам блоков, кH; R_i – реакции со стороны основания блока; E_i – силы реакции между смежными блоками, кH.



Рис. 1.4 – Схема к расчету устойчивости откосного сооружения методом векторного сложения (многоугольника) сил

Для откоса, находящегося в устойчивом состоянии с заданным коэффициентом запаса, многоугольник сил, построенный по наиболее напряженной поверхности скольжения для всей призмы возможного обрушения, должен замыкаться. Это означает, что его устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса, близким к введенному в прочностные характеристики пород.

В зарубежной практике одним из наиболее распространенных является метод общего предельного равновесия (Моргенштерна-Прайса) [33, 34]. Принципиальная расчетная схема представлена на рис. 1.5.

Коэффициенты запаса устойчивости исходя из условия равновесия сил n_F и моментов сил n_M вычисляют по формулам:

$$n_{F} = \frac{\sum_{i=1}^{k} [cl_{i} + (N_{i} - ul_{i})tg\phi]cos\alpha_{i}}{\sum_{i=1}^{k} N_{i}sin\alpha_{i} + \mu_{h}\sum_{i=1}^{k} P_{i} + \sum_{i=1}^{k} B_{i}sin\beta_{i}};$$
(1.6)

$$n_{M} = \frac{\sum_{i=1}^{k} [cl_{i} + (N_{i} - ul_{i})tg\phi]R_{i}}{\sum_{i=1}^{k} N_{i}f_{i} + \sum_{i=1}^{k} P_{i}x_{i} + \mu_{v}\sum_{i=1}^{k} P_{i}x_{i} + \mu_{h}\sum_{i=1}^{k} P_{i}e_{i} + \sum_{i=1}^{k} B_{i}b_{i}},$$
(1.7)

24

где *i* – номер расчетного блока; *n* – количество расчетных блоков; α_i – угол наклона поверхности скольжения в середине расчетного блока, град.; l_i – длина поверхности скольжения в основании блока, м; φ – угол внутреннего трения горных пород, град; *c* – сцепление горных пород, кН/м²; *P_i* – вес расчетного блока, кН; *N_i* – нормальная реакция в основании расчетного блока, кН; *E_i* – нормальная составляющая межблоковой силы, кН; *X_i* – касательная составляющая межблоковой силы, кН; В – результирующая сил внешней нагрузки, кН; *u* – величина порового давления, кПа; $\mu_{h(v)}$ – вертикальная и горизонтальная составляющая коэффициента сейсмичности; *f* – плечо силы нормальной реакции *N_i*, м; *R* – плечо силы сопротивления сдвигу *F_{yд}*, м; *x* –плечо вектора *P_i*, м; *e* – плечо горизонтальной составляющей сейсмической нагрузки, м; *b* – плечо результирующей внешней нагрузки *B*, м; *β* – угол наклона результирующей внешней нагрузки *B*, град; λ – коэффициент межблоковой функции (в долях); *f*(*x*) – функция межблоковых сил.



Рис. 1.5 – Принципиальная расчетная схема метода предельного равновесия при делении призмы возможного обрушения вертикальными блоками

Задачи являются статически неопределимыми. Для выполнения плоского равновесия расчетного блока можно составить максимум три уравнения статики, при этом неизвестными являются: межблоковая касательная сила X_i , высота h_i точки приложения нормальной межблоковой силы E_i и ее величина, нормальная реакция в основании расчетного блока N_i . Если ширина расчетного блока a_i стре-

мится к нулю, то справедливо предположение о приложении нормальной реакции *N_i* к точке в середине поверхности скольжения [24, 33].

Одним из недостатков является разнообразие методик, обусловленное различием принимаемых допущений относительно внутренних сил, положения и формы наиболее напряженной поверхности скольжения, расположения границ расчетных блоков (вертикальные или наклонные) [24]. В этой связи методы предельного равновесия относят к инженерным [23]. При этом они не перестают быть актуальными, о чем свидетельствует работа А. В. Жабко [35], в которой представлена теория и методики расчета устойчивости откосов и оснований, обоснованы положение и форма критических поверхностей скольжения, методики их построения.

Прогноз устойчивости откосных сооружений в объемной постановке задачи производят с помощью подбора направлений и величин полуосей *a*, *b*, *c* эллипсоида напряжений (рис. 1.6а) и вычисления внутренних и внешних сил, действующих на поверхности расчетных блоков (рис. 1.6б) на основе методов Бишопа, Янбу, Моргенштерна-Прайса (общего предельного равновесия) [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42].



Рис. 1.6 – Схема построения поверхности скольжения (а) и деления на расчетные блоки (б) в объемной постановке задачи

Применение такого подхода для прогноза устойчивости в реальных горногеологических условиях затруднительно и объясняется следующим [36, 42]: для перехода к статически определимой задаче требуется принимать больше допущений о распределении межблоковых сил, а также форме и положении поверхности скольжения;

 выполнение условия равновесия сил и моментов в поперечном сечении призмы возможного обрушения труднодостижимо;

 разработанные методы пригодны для симметричных призм обрушения относительно главного сечения;

 направления смещения всех расчетных блоков должны совпадать с общим направлением смещения призмы обрушения.

Численные методы прогноза устойчивости получили возможность применения благодаря распространению ЭВМ. Среди них известны: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных интегральных уравнений, метод отдельных элементов и метод дискретных элементов [7, 42-52].

Наиболее распространенным является метод конечных элементов, позволяющий определить не только параметры напряженно-деформированного состояния, но и количественную характеристику устойчивости откосного сооружения – коэффициент снижения прочности *SRF* (метод снижения сдвиговой прочности) [45, 46].

$$SRF = \left(\frac{tg\phi}{tg\phi_{trial}}\right) = \left(\frac{C}{C_{trial}}\right),\tag{1.8}$$

где φ , φ_{trial} — исходное и критическое значения углов внутреннего трения горных пород, град; *C*, *C*_{trial} — исходное и критическое значения сцепления горных пород, МПа.

Расчетная область (прибортовой массив) разбивают на некоторое число областей области (конечные элементы) для того, чтобы рассматривать их внутреннюю среду как однородную и изотропную. Элементы могут быть одномерными, плоскими или пространственными фигурами, например, прямолинейные или криволинейные треугольники и четырехугольники (рис. 1.7).

Закон изменения функции между узлами, т. е. в пределах элементов, может быть задан в различном виде. Для этого непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом некоторой степени (функцией элемента), определяемым через значения этой величины в узлах элемента. Окончательной аппроксимацией непрерывной функции будет служить совокупность кусочно-гладких поверхностей (в данном случае плоских фигур), определенных на каждом элементе.



Рис. 1.7 – Виды плоских конечных элементов (а) и деление расчетной области на конечные элементы (б)

Наилучшее приближение к точному решению достигается минимизацией некоторого функционала, приводящей формулировку задачи к системе линейных алгебраических уравнений. Решение этой системы позволяет определить приближенные значения искомой функции в узлах. Точность решения может быть повышена сгущением сетки конечных элементов или использованием более сложных функций элементов. Количество уравнений в системе, достигающее в практических задачах сотен и тысяч, зависит от числа узлов.

Метод конечных элементов позволяет учитывать в расчетах не только механические характеристики – угол внутреннего трения φ и сцепление *C*, но и упругие константы – модуль упругости *E* и коэффициент Пуассона.

К недостаткам метода конечных элементов относятся [47]:

 зависимость получаемых результатов от степени дискретизации модели; зависимость результатов от формы (от уравнения формы элемента) и количества узлов выбранного конечного элемента;

 зависимость результатов расчета от пространственного расположения (собственные координаты) узлов единичного элемента относительно глобальной системы координат;

 зависимость результатов от пространственной постановки задачи; от геометрической сложности внутренних границ инженерно-геологической модели; относительно высокая погрешность результатов; зависимость величины коэффициента запаса устойчивости от степени дискретизации и формы конечных элементов;

 необходимость контроля результатов более простыми методами, прошедшими многолетнюю апробацию;

 больший объем лабораторных исследований по определению свойств горных пород относительно методов предельного равновесия.

Метод конечных разностей основан на том, что непрерывные распределения параметров, характеризующих процесс, представлены совокупностью дискретных значений в узлах. В результате производные в определяющих уравнениях и граничные условия приближенно заменяют (аппроксимируют) конечноразностными соотношениями, содержащими значения сеточной функции в нескольких узлах сетки; при этом краевую задачу для исходных дифференциальных уравнений заменяют системой алгебраических уравнений. Если заданная таким образом разностная задача разрешима и при безграничном измельчении сетки сходится к решению исходной задачи, то полученное на фиксированной сетке решение разностной задачи принимают за приближенное значение исходной. Близость решения к истинному зависит от шага сетки и порядка аппроксимации, используемой для решения разностной схемы [48].

В методе граничных интегральных уравнений прибортовой массив также разбивают на конечное число участков (рис.1.8) [7, 48].

При решении рассматриваемой задачи этот подход имеет определенные преимущества перед методом конечных элементов и конечных разностей, так как в качестве неизвестного вектора выбирают вектор фиктивных нагрузок. Если его значения известны, то поля напряжений и перемещений внутри тела определяют при помощи интегрирования распределения фиктивных нагрузок [7].

К достоинствам метода относят:

- уменьшение размерности задачи;

– в отличие от метода конечных элементов дискретизируют только границы области *S*.

Вклад в развитие математической теории метода граничных интегральных уравнений и практических методов их решения, широко применяемых в механике сплошной среды и в инженерном деле, внесли советские ученые: А.Я. Александров, С.М. Белоцерковский, Н.П. Векуа, М.Н. Гольдштейн, А.И. Каландия, С.Г. Михлин, Н.И. Мусхеллишвили, и другие. Из зарубежных ис-

следователей, работающих в этом направлении в последние годы необходимо отметить работы Бребии, П. Бенерджи, Р. Баттерфилда, Т. Круза, Ф. Риццо, С. Крауча, А. Старфилда, Т. Громадки II, Ч. Лея и др [49].



Рис. 1.8 – Расчетная схема к методу граничных интегральных уравнений: $n_1, n_2, \ldots n_j$ – нормали к границе области $\partial S; S_1, S_2, \ldots, S_i$ – длина отрезка границы $\partial S; P_{BH1}, P_{BH2}, \ldots P_{BHi}$ – внешние нагрузки от отвалов и оборудования, приложенные на длине L_t на расстоянии L_{ab} от верхней бровки уступа; $F_{y1}, F_{y2}, \ldots, F_{yi}$ – составляющие силы тяжести в *i*-й точке области S

В методах дискретных элементов прибортовой массив моделируют из отдельных дискретных частиц. Эти частицы могут иметь различные поверхности и свойства. Расчет начинают с помещения всех частиц в начальное положение и придания им начальной скорости. Затем рассчитываются силы, воздействующие на каждую частицу, исходя из начальных данных и соответствующих физических законов.

Все эти силы складывают, чтобы найти результирующую, воздействующую на каждую частицу. Метод интеграции используют, чтобы рассчитать изменение в положении и скорости каждой частицы в течение определенного временного шага из законов Ньютона. Новое положение используют для расчета сил в течение следующего шага. Этот цикл программы повторяются до тех пор, пока симуляция не закончится (рис. 1.9).

Число взаимодействий, и вместе с этим ресурсоемкость расчета, возрастает квадратично с увеличением количества частиц. Это может создавать проблемы при построении сложных моделей [49, 51].



Рис. 1.9 – Модели разрушения откоса

В методе отдельных элементов взаимодействие между частицами (структурными блоками) моделируют параметрами жесткости и прочности (связи) [42, 49]. Вид численной модели откоса из отдельных элементов представлена на рис. 1.10.



Рис. 1.10 – Модель откоса из отдельных элементов

Прочность на поверхности раздела между частицами (структурными) блоками может быть задана посредством трения или связей (рис. 1.11).

При этом рассматривают два вида связей:

– модель «контактной связи» охарактеризована константами нормальной и сдвиговой жесткости $K_{n,c}$, $K_{s,c}$ и предельными величинами нормальной F_n и сдвиговой F_s силы. В этой модели рассматривают сопротивление нормальному напряжению и чистому сдвигу. Когда силы связи превышают предельные значения, трение - единственная сила, существующая между элементами. В модели «контактной связи» не допускают столкновения между частицами (структурными блоками).

– модель с «параллельной связью» учитывает нормальную σ_n и сдвиговую т прочность по области вокруг частицы, подобно цементирующему веществу, а также константы жесткости $K_{n,p}$, $K_{s,p}$.

Основной задачей при моделировании методом отдельных элементов является определение параметров прочности(связи) на контактах элементов, так как именно от этого, в конечном счете, зависят механические свойства блоков горных пород.



Рис. 1.11 – Виды взаимодействия между частицами (структурными блоками)

Вероятностный подход отнесен к классу Д классификации, приведенной в работах [22, 23]. Данный подход применяют в качестве дополнительного к детерминированному для количественной оценки риска [53]. В связи с тем, что прочностные характеристики горных пород – угол внутреннего трения φ и сцепление *С* обладают изменчивостью в пределах диапазонов [φ_{min} ; φ_{max}] и [C_{min} ; C_{max}], результаты расчетов устойчивости бортов представляют массив значений [α_{min} ; α_{max}] с определенным законом распределения (рис. 1.12) [54]. Полученное распределение вероятности позволяет определить риск обрушения *F*(α) открытой горной выработки в зависимости от принятого значения результирующего угла α_i .



Рис. 1.12 – Кривая распределения значений расчетных углов откосов α

Выполненный обзор методов прогноза устойчивости откосных сооружений показывает разнообразие подходов к решению задачи как в плоской, так и в объемной постановке на основе математической схематизации. Методика прогноза устойчивости должна учитывать особенности строения откосных сооружений, связанные с наличие ослабленных зон (п.1.1), сложной геометрией поверхности скольжения и естественных поверхностей ослабления, изменчивостью физикомеханических свойств и т. д. Такие характеристики получают различными методами контроля физического состояния массивов горных пород.

1.3 Методы контроля физического состояния массива горных пород

В зависимости от применяемой физической основы методы контроля физического состояния массива горных пород разделяют на прямые и косвенные (геофизические) (рис. 1.13) [3, 55-66].



Рис. 1.13 – Методы контроля физического состояния массива

Прямые методы основаны на инженерных изысканиях, визуальных и инструментальных наблюдениях. В зависимости от применяемого оборудования их делят на следующие виды: инженерно-геологический; гидрогеологический; маркшейдерско-геодезический; тензометрический.

Инженерно-геологический метод основан на проведении разведочных выработок, отборе образцов (монолитов или кернов) горных пород и исследовании их в лабораторных и полевых условиях, определении структурно ослабленных зон, естественных поверхностей ослабления в массиве и их пространственной ориентировке.

Гидрогеологический мониторинг заключается в изучении режима природных и техногенных водоносных горизонтов посредством установки в горных выработках специальных измерительных устройств.

Маркшейдерско-геодезический метод основан на установлении сдвижения отдельных точек массива в плане и по высоте, размеров деформирующегося массива, положения и формы поверхности скольжения, стадии процесса сдвижения (начальная, активная, затухающая) [67, 68]. Наблюдения за смещением реперов производят с помощью маркшейдерско-геодезических приборов (нивелиров, теодолитов, мерных приборов и т.д.), фотограмметрических и спутниковой аппаратуры. По результатам инструментальных параметры процесса сдвижения (величины оседаний η , горизонтальных смещений ξ , полных векторов смещений *b* и их углов наклона δ , горизонтальных деформаций ε , сдвигов γ , скоростей смещения v_b и деформаций v_{ε}) и строят потенциальную поверхность скольжения (рис. 1.14).

Тензометрический метод предполагает установку специальных датчиков в исследуемых зонах и контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород.



Рис. 1.14 – Построение потенциальной поверхности скольжения в условно однородном откосе по векторам смещений: 1 – график сдвигов; *H* – высота борта; *A* – ширина зоны деформаций

Косвенные (геофизические) методы контроля основаны на связи структурных особенностей массива и свойств горных пород в аномальных зонах с параметрами физических полей естественной или искусственной природы. Косвенные (геофизические) методы контроля в зависимости от используемого физического поля делят на следующие виды: сейсмоакустический; термометрический; геомагнитный; геоэлектрический. Сейсмоакустический метод контроля предусматривает возбуждение в массиве упругих колебаний определенного диапазона: низкочастотного сейсмического, акустического или ультразвукового; фиксируя сигнал, прошедший через контролируемый участок массива, определяют изменение скорости распространения составляющих сигнала или его затухание, зависящих от плотности, пористости влажности горных пород.

Термометрический метод основан на измерении аномалий температуры массива или его теплофизических параметров (теплопроводности, теплоемкости), зависящих от состояния и свойств горных пород.

К геомагнитному контролю относят измерение аномалий геомагнитных полей.

Геоэлектрический контроль базируется на мониторинге пространственновременных изменений комплекса электромагнитных параметров среды.

Группу геоэлектрических методов разделяют на две подгруппы: электрофизический и электромагнитный. Электрофизический контроль реализуют при наличии электрического контакта с породным массивом. Он включает методы регистрации тока, зондирование (подземное и вертикальное с земной поверхности), профилирование межскважинное просвечивание, скважинный каротаж на постоянном, переменном токе и диэлектрический, методы вызванной поляризации, а также комплекс методов регистрации параметров естественных электрических полей (электрохимических, стационарных, фильтрационных нестационарных). Электромагнитный контроль основан на измерении параметров электромагнитных полей, распределение которых зависит от электрических и магнитных свойств горных пород. В зависимости от частоты электромагнитного поля различают методы постоянного тока, низкочастотные, высокочастотные и радиоволновые.

1.3.1 Прямые методы контроля

В работе [69] предложена автоматизированная система мониторинга безопасности отвалов, основанная на использовании маркшейдерских инструментальных наблюдений совместно с оригинальной тензометрической аппаратурой: датчиками гидростатического давления и скважинного накопителя информации САП-1М. В скважинах наблюдательных профилей на различных глубинах закладывают датчики гидростатического давления. Установленные датчики подключают к накопителю информации САП-1М, который через модем сотовой связи с заданной периодичностью считывает и передает информацию на компьютер горного диспетчера (рис. 1.15).

Для каждого датчика обоснованы критерии безопасности трех уровней, которые хранят в аналитической системе. При достижении установленных значений критериев система немедленно об этом оповещает горного диспетчера.



Рис. 1.15 – Конструкция наблюдательного профиля

На карьере рудника «Железный» внедрена система мониторинга бортов, включающая наблюдения за смещением реперов с применением спутниковых навигационных систем, дополненная радаром «Ibis FM» [70, 71]. Основной принцип использования спутниковых навигационных систем заключается в определении местоположения путем измерения моментов времени приема синхронизированного сигнала от навигационных спутников антенной приемника. Принцип работы радара основан на измерении времени прохождения радиоволны от источника до объекта мониторинга. Дальность действия радара может достигать 5000 м. Радар позволяет выполнять непрерывный круглосуточный мониторинг за смещением точек поверхности открытых горных выработок с заданной периодичностью съемки в пределах разрешающей способности. Программное обеспечение радара способно за короткий временной промежуток проанализировать большой объем измеряемых данных и при достижении установленного критерия безопасности сделать оповещение о необходимости эвакуации персонала. Применение радара в условиях карьера позволило спрогнозировать два оползня объемом 500 и 100000 м³, а также установить критическое значение скорости смещения поверхности прибортового массива.

В работе [72] обоснована перспектива применения космического радиолокационного зондирования в качестве дополнительного к классическим методам
маркшейдерских инструментальных наблюдений за деформациями бортов открытых горных выработок и отвалов. Радиолокационная съемка является активным методом зондирования: радарная антенна генерирует радиоизлучение, затем с помощью регистрирующей аппаратуры принимает отраженный от поверхности сигнал. Космическое радиолокационное (РЛ) зондирование производят в *L*-, *C*- и *X*диапазонах. Радиолокационную съемку осуществляют с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Радиолокаторы с синтезированной апертурой различают по используемому диапазону радиоволн, пространственному разрешению, широте полосы обзора, периодичности съемки, набору режимов съемки.

Радарная интерферометрия использует эффект интерференции электромагнитных волн для проведения измерений. Для этого осуществляется несколько когерентных измерений определенного участка земной поверхности с изменением положения радара в пространстве. Интерферометрическая обработка включает совмещение 2-х разновременных РСА-изображений и построение интерферограммы, позволяющей измерить разность фаз двух снимков, на основе которой в дальнейшем выполняется расчет высотных отметок и смещений. В качестве входных данных выступают интерферометрические пары радарных снимков. В обработке участвует фазовая составляющая, амплитуда радарных снимков находит использование при крупномасштабном картографировании. Интерферометрическая обработка радарных снимков выполняется в специализированном программном обеспечении. Радарные снимки могут служить основой для определения локальных зон, в которых необходимо проведение высокоточных инструментальных наблюдений.

На карьерах Казахстана и Киргизии для определения механических свойств горных пород – углов внутреннего трения ф и сцеплений С применены сдвиги породных призм в натурных условиях [73]. Процесс нарезки призм осуществляется с помощью штыковых лопат, долотьев, перфораторов, буровых станков, а сдвиг подготовленной породной призмы – оттарированным гидродомкратом. Линейные и угловые параметры призмы измеряют рулеткой и горным компасом. Испытания подразумевают возможность выполнения как плоского среза, так и косого (рис. 1.16).



Рис. 1.16 – Схема призмы в плане (а) и в плоскости сечения А-А при плоском (б) и косом (в) срезах: Q_{max} – максимальное сдвигающее усилие; P – вес призмы обрушения; β – угол между вертикальной поверхностью призмы и плоскостью среза; δ – угол наклона поверхности среза.

При обработке результатов испытаний вычисляют следующие параметры: площадь поверхности среза S; максимальное и минимальное сдвигающие усилия Q_{max} и Q_{min} через коэффициент тарировки гидродомкрата; вес срезанной породной призмы P. При плоском срезе величины нормальных σ_n и касательных τ напряжений, коэффициента внутреннего трения $tg\phi$ и сцепления C находят по формулам 1.9-1.12.

$$\sigma_n = \frac{P}{S}; \tag{1.9}$$

$$\tau = \frac{Q_{max}}{S}; \tag{1.10}$$

$$tg\phi = \frac{Q_{min}}{P}; \qquad (1.11)$$

$$C = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{S}.$$
 (1.12)

При косом срезе закономерности для нахождения данных величин (за исключением сцепления *C*) изменены и имеют следующий вид:

$$\sigma_n = \frac{Q_{max} \cos\beta + P \cos\delta}{S}; \qquad (1.13)$$

$$\tau = \frac{Q_{max}\sin\beta - P\sin\delta}{S}; \qquad (1.14)$$

$$tg\varphi = \frac{Q_{max}(\sin\beta - 1) - P\sin\delta - Q_{min}}{Q_{max}\cos\beta + P\cos\delta}.$$
(1.15)

Для повышения точности прогноза положения наиболее напряженной поверхности скольжения предложен способ, включающий бурение скважин, установку в них датчиков и определение максимальных значений механических напряжений [74]. С рабочей площадки уступа бурят скважины с интервалом 0,3-0,5 м, глубиной, равной высоте уступа. Затем в каждую скважину посещают датчики, которые по ее глубине с интервалом 0,2-0,5 м перемещают до предельной глубины и одновременно ведут замеры. Изучение массива начинают со скважин вблизи бровки уступа. Получив данные для расчета, строят график зависимости глубины замера h от величины механических напряжений τ (рис. 1.17а). После обработки скважинных данных строят наиболее напряженную поверхность скольжения (рис. 1.17б).



Рис.1.17 – Схема построения графика (а) и наиболее напряженной поверхности скольжения: 1 – скважина; 2 – поверхность скольжения

1.3.2 Косвенные методы контроля

В работе [75] методом георадиолокации установлено положение структурного нарушения на основании разработанного алгоритма автоматической обработки. Исследования выполнены в условиях Республики Саха (Якутия) георадаром ОКО-2М с антенным блоком АБДЛ Тритон (центральная частота $f_{\rm q} = 50$ МГц). Геологический разрез (рис. 1.18) имеет строение в виде горизонтальнослоистой толщи.

Представленный разрез имеет структурные нарушения, обозначенные цифрами 1—4 и нарушенности локального характера (цифры 1 и 3), расположенные в рыхлых отложениях, являющиеся волновыми картинами слоисто-линзовидного типа. Вторая нарушенность пересекает всю толщу горных пород, доступную для исследования методом георадиолокации. До глубины 12 м она проявляется в виде косослоисто-линзовидного типа волновых картин, в интервале глубин 12—21 м, прослеживается по потере корреляции осей синфазности. Слабая выраженность нарушенности на фоне горизонтально-слоистых сигналов и ее кажущееся «сужение» объясняется увеличением в 4—5 раз первой зоны Френеля, что приводит к пропорциональному снижению доли электромагнитной энергии, распространяющейся в нарушенных горных породах.



Рис. 1.18 – Фрагмент георадиолокационного разреза

Область, отмеченная цифрой 4, малозаметна и выделяется по бугристому типу осей синфазности по всей глубине радарограммы. На рис. 1.19 представлен результат обработки георадиолокационных данных по предлагаемому алгоритму.



Рис.1.19 – Результаты обработки георадиолокационных данных

Черным цветом отмечены места резкого изменения значений амплитуд, в местах их скопления, особенно если они имеют линейную и протяженную форму или замкнутую линзовидную, вероятно наличие смещение осей синфазности сигналов, характерных для трещин горных пород. На этой основе серым цветом обозначены локальные деформированные геологические структуры. В левом нижнем углу наблюдается область, представленная бесформенным скоплением черных точек и являющаяся следствием помех на обрабатываемом георадиолокационном разрезе.

В работе [76] предложен способ оценки влажности горных пород *W* выполнена на основе исследования относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны N_{ν} . Для этого необходимо на основании результатов изучения влажности в лабораторных условиях применить эмпирическую зависимость, учитывающую данные относительно изменения времени задержки сигналов N_t от опорной границы в талых породах по сравнению с мерзлыми (рис. 1.20).



Рис. 1.20 – Зависимость относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны N_{ν} от влажности горных пород W

Оценка фактического состояния грунтового массива в работе [77] для аварийного участка тоннелей Петербургского метрополитена (рис. 1.21а) выполнено межскважинное сейсмоакустическое просвечивание (МСП) по веерной схеме (рис. 1.21б) с целью определения границ разуплотненных зон.



Рис. 1.21 – Схема расположения скважин МСП и лучей просвечивания (а) по веерной схеме (б)

Суть метода МСП заключается в возбуждении излучающим зондом упругой волны в одной скважине и регистрации приемной линией в другой, состоящей из нескольких гидрофонов. По результатам анализа кинематических и динамических характеристик упругой волны переходят к оценке упруго-деформационных и прочностных свойств горных пород.

Контроль геомеханического состояния прибортового массива рудного карьера выполнен методом сейсмотомографии с использованием [78] с использованием 24-канальной инженерной сейсмостанции «Smart Seis». Измерения выполнены на стационарном полигоне, который состоит из профилей возбуждения и приема упругих колебаний.

По результатам выполненных измерений построены скоростные модели исследуемого участка, позволившие установить границы зон трещиноватости и водонасыщения, которые были учтены при последующем прогнозе устойчивости борта карьера.

В работе [79] выполнен поиск неглубоких водоносных горизонтов в межскважинном пространстве с использованием электротомографических исследований. Электротомография является модификацией метода сопротивлений.

Методы сопротивлений основаны на пропускании в земле с помощью пары металлических электродов (заземлений A и B) известного постоянного (квазипеременного) тока и измерении электрического поля, вызванного этим током, с помощью другой пары электродов. (M и K). Область исследования располагается под центром установки и простирается от поверхности до глубин, примерно равных половине длины установки AB/2. Электрическое поле, наблюдаемое на поверхности земли, зависит от распределения удельного электрического сопротивления в некоторой области разреза вблизи установки. По измеренным разности потенциала (ΔU , мВ) и силе тока, создаваемого в земле (I, мА), подсчитывается кажущееся сопротивление (ρ_k) пород, слагающих геологический разрез (рис. 1.22).



Рис. 1.22 – Схема установки для исследований методом сопротивлений: 1 – измерительный прибор

Особенностью электротомографии является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдений положения электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенной плотности измерений. Результатом выполненных работ являются геоэлектрические разрезы (рис. 1.23) и модели (рис. 1.24).



Рис. 1.23 – Геоэлектрический разрез с перспективной зоной водонасыщения



Рис. 1.24 – Геоэлектрическая модель

В работе [80] для локализации в теле полигона твердых отходов горнодобывающих предприятий выполнены геофизические исследования методом электрои сейсмотомографии. С помощью корреляционных зависимостей на основании сейсмотомографических исследований выполнено районирование техногенного массива по изменчивости физико-механических свойств (рис. 1.25).

Результатами электротомографических исследований по электрической контрастности установлены границы потенциальных зон накопления фильтрата и пустоты (рис. 1.26).

При прогнозе устойчивости прибегают к математической схематизации рассматриваемых явлений и свойств горных пород. В результате создают расчетную (геомеханическую) модель прибортового массива, приближенно отражающую природу вероятных процессов. В методической основе, предложенной П.С. Шпаковым, плоская геомеханическая модель включает в себя структурную модель массива, гипотезу о возможном характере смещения или деформирования и физико-механические свойства прибортового массива [28].



Рис. 1.25 – Графики изменчивости значений: а – скорости распространения продольных волн; б – плотности ρ; в – углов внутреннего трения φ; г – сцепления *C*



Рис. 1.26 – Геоэлектрический разрез

Структурная модель содержит геометрическое описание естественных поверхностей ослабления (контактов слоев пород, слабых слоев и разрывных нарушений), депрессионных кривых, положения горных и отвальных работ, земной поверхности.

Гипотезу о деформировании или механическую (деформационную) модель составляют данные о формах поверхностей скольжения: круглоцилиндрическая, плавная криволинейная, плоская, ломаная, комбинированная.

Физико-механические свойства геомеханической модели представлены базой данных, полученных по результатам лабораторных и полевых испытаний пород, методами обратных расчетов и аналогий.

Учитывая, что прибортовой массив в пространстве является сложной дискретной и неоднородной средой, имеющей аномальные по плотности, влажности и прочности зоны (ослабленные зоны) [81], а также обладает изменчивостью геометрических параметров поверхности горных выработок и естественных поверхностей ослабления вдоль простирания, положение и направление оползнеопасного сечения будет определено максимально неблагоприятным сочетанием данных факторов. Для решения данной проблемы необходим пространственный подход к прогнозу устойчивости откосных сооружений на основе объемных геологогеофизических моделей.

Объемные геолого-геофизические модели содержат математическое описание функций изменчивости физических свойств горных пород и структурных особенностей строения прибортового массива, получаемых при помощи геофизических методов исследований, в частности, методами электрофизических и сейсмических зондирований.

1.4 Выводы, цель и задачи исследований

Анализ состояния решения проблемы мониторинга строения, состояния и оценки устойчивости откосных сооружений при открытой геотехнологии позволил сделать следующие выводы.

1. Согласно указаниям ВНИМИ вероятность нарушения устойчивости бортов разрезов определяется неблагоприятным сочетанием инженерногеологических, гидрогеологических, физико-географических и горно-технических факторов. Практика ведения горных работ показывает, что деформации бортов локализуются в массивах песчано-глинистых пород, представленных покровными образованиями четвертичного возраста мощностью до 50 м, отложениями глин и песков, залегающих на глубинах до 300 м. Прочностные свойства песчаных пород значительно снижаются при увеличении пористости, а глинистых пород – с увеличением влагонасыщения, определяющего их консистенцию.

В последнее время на разрезах Кузбасса и других угольных регионов зафиксирован ряд оползневых явлений, которые нанесли не только экономический и экологический ущерб, но и явились причинами гибели людей. Одной из основных причин произошедших оползней явилось изменение физико-механических свойств горных пород вследствие их разуплотнения и водонасыщения. Заметна тенденция увеличения суммарного объема оползней, достигающего 50-110 млн. м³ в год.

2. Методы прогноза устойчивости откосных сооружений разделяют на детерминированные, включающие построение контура откоса или поверхности скольжения с использованием условий предельного равновесия (сопротивления сдвигу) и численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива, а также вероятностные, заключающиеся в оценке риска обрушения. В

отечественной практике наибольшее распространение получили методы алгебраического сложения моментов сил и векторного сложения (многоугольника) сил.

3. Прогноз устойчивости откосных сооружений не может быть реализован без информации о состоянии и физико-механических свойствах слагающих их горных пород. Методы физико-технического контроля разделяют на прямые и косвенные. Прямые методы, основанные на изысканиях, визуальных и инструментальных наблюдениях, включают инженерно-геологический, гидрогеологический, маркшейдерско-геодезический, тензометрический контроль. Базы данных, полученные прямыми методами, являются необходимой априорной информацией для расчетных методов, однако эти методы весьма трудоемки, поскольку связаны с бурением скважин, отбором и испытаниями проб пород, они не обеспечивают достаточно детальной оценки пространственно-временных изменений состояния и свойств пород под воздействием указанных выше факторов. Косвенные (геофизические) методы являются важным дополнением прямых методов, обеспечивапринципиальное повышение точности геомеханического прогноза. ющим Наибольшее распространение в практике открытой геотехнологии получил электрофизический метод с использованием классических и многоэлектродных установок, основанный на контроле аномалий удельного электросопротивления, и сейсмоакустический, позволяющий по томограммам скоростей распространения упругих волн определять плотность и прочностные характеристики пород массива.

4. Накоплен значительный опыт в проведении исследований прямыми и геофизическими методами на угольных разрезах, наработаны информативные базы данных, функционируют системы непрерывного геомониторинга, разработаны программные комплексы для автоматизированного прогноза процессов оползнеобразования откосов. Вместе с тем, точность прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов остается недостаточной по следующим причинам: не разработаны методы количественной интерпретации результатов геофизических зондирований, обеспечивающие построение объемных геологогеофизических моделей бортов разрезов; не обоснованы принципы автоматизированного выбора наиболее опасного сечения в объемной постановке; не изучены особенности применения объемных геолого-геофизических моделей для прогноза устойчивости откосных сооружений естественного сложения и техногенных.

Таким образом, актуальным является развитие методов прогноза процессов оползнеобразования откосных сооружений в объемной постановке.

46

Цель работы – обоснование и разработка методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геологогеофизических моделей, обеспечивающей повышение точности оценки вероятности оползнеобразования для безопасного ведения горных работ и снижения затрат на предотвращение технологических аварий.

Работа является развитием и научно-практическим продолжением проекта № П234 «Диагностирование физического состояния при укреплении неустойчивых зон грунтовых оснований горнотехнических сооружений для снижения риска техногенных аварий», выполненного при поддержке ФЦП «Научные и научнопедагогические кадры инновационной России», в рамках выполнения НИР № 110-2015, №100-2016, №104-2017 по заказам АО «УК «Кузбассразрезуголь» и НФ «КУЗБАСС-НИИОГР».

Основные задачи исследований:

 совершенствование методов обработки баз данных геофизических зондирований, разработка алгоритмов прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей;

 исследование особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений естественного сложения;

 исследование особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений техногенного сложения;

 разработка и реализация методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ БАЗ ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ, РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

2.1 Метод обработки результатов кругового сейсмического зондирования

Основным результатом обработки данных сейсмического зондирования является коэффициент сейсмической анизотропии \vec{K}_a , величину которого определяют из соотношения

$$K_{a} = \frac{V_{p_{II}}}{V_{p_{I}}},$$
(2.1)

где $V_{p_{\Pi}}$, $V_{p_{\perp}}$ – скорости распространения продольной волны в направлениях, соответственно, параллельном плоскости разуплотнения массива, и перпендикулярном к ней, м/с.

Величина K_a комплексно характеризует потенциальную опасность оползнеобразования на исследуемом участке, степень которой определяется снижением прочностных, деформационных свойств массива и развитием деформаций. Величину и направление вектора \vec{K}_a можно определить по круговым диаграммам интервалов времени прихода продольной волны t_i от угловой координаты, характерный вид которых представлен на рис. 2.1.



Рис. 2.1 – Характерные круговые диаграммы $t_i(\varphi)$ времени прихода продольной волны: $K_a = V_{pmax}/V_{pmin} = 1737/1706 = 1,01$ (а); $K_a = 2449/1540 = 1,58$ (б); $K_a = 2729/927 = 2,94$ (в)

Для повышения точности определения параметров вектора \vec{K}_a разработана методика аппроксимирования массива экспериментальных данных уравнением

эллипса. Один из эффективных методов обработки геофизических данных рассмотрен ниже.

Предположим, что существуют пары значений V_k и φ_k , где φ – полярный угол, а V – скорость упругой волны (полярный радиус). График ломаной $V_k = V(\varphi_k)$ в полярной системе координат может быть аппроксимирован повернутым относительно стандартной системы координат на некоторый угол γ эллипсом с полуосями *a*, *b*. Необходимо определить величины этих полуосей *a*, *b* и угол γ . Для этого использован метод наименьших квадратов, который сведен к поиску минимума функции трех переменных *a*, *b*, γ следующего вида

$$F = \sum_{k} \left[V_k - V(a, b, \gamma, \varphi_k) \right]^2, \qquad (2.2)$$

где $V(a, b, \gamma, \phi)$ – теоретическое уравнение эллипса в полярной системе координат $OV\phi$; $V_k - k$ -е экспериментальное значение V.

Относительно повернутой системы координат каноническое уравнение эллипса с центром в начале координат имеет вид

$$\frac{V_x^2}{a^2} + \frac{V_y^2}{b^2} = 1.$$
 (2.3)

Взаимосвязь между исходной и повернутой на угол у системами координат задается матричным выражением поворота

$$\begin{pmatrix} V_{X} \\ V_{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{x} \\ V_{y} \end{pmatrix}.$$
 (2.4)

Координаты V_x, V_y в полярной системе координат определяются выражениями:

$$V_{x} = V \cos \varphi, \qquad (2.5)$$

$$V_{\rm v} = V \sin \varphi \,. \tag{2.6}$$

Подставляя (6) и (5) в (4), а затем в (3), получим выражение относительно скорости $V=V(\phi)$ следующего вида

$$V = \frac{ab}{\left[A^2a^2 + B^2b^2\right]^{1/2}},$$
 (2.7)

где $A = \cos\varphi \cos\gamma + \sin\varphi \sin\gamma$, $B = \sin\varphi \cos\gamma - \cos\varphi \sin\gamma$.

Так как из-за использования функций sinү и соsү в (2.7) полученная функция (2.2) является мультимодальной, то использование каких-либо градиентных оптимизационных алгоритмов для поиска минимума функции (2.2) является неэффективным. Возможным выходом в данной ситуации является использование оптимизационных методов случайного поиска, которые позволяют обнаружить не только локальные минимумы, но и глобальные. Одним из простых и в тоже время эффективных методов является метод адаптивного случайного поиска, который является вариантом классического метода статистических испытаний («Монте-Карло»). Блок-схема расчета приведена на рис. 2.2.



Рис. 2.2 – Блок-схема алгоритма расчета параметров эллипса сейсмической анизотропии методом адаптивного случайного поиска

Алгоритм включает в себя следующие шаги:

1. Задание стартовых начальных значений переменных $a_0 = 1; b_0 = 1; \gamma_0 = 0; T_0 = 5$ (T_0 – параметр поиска, подбираемая экспериментально для данного типа минимизируемой функции); вычисление значений функции (2.2) в этой точке $F_{start} = F(a_0, b_0, \gamma_0);$ задание стартового значение параметра поиска $T_0 = 5$ и его нижний предел $T_{min} = 0,001$. Шаги 2 – 4 повторяют до тех пор, пока выполняется условие $T_0 > T_{min}$.

2. Задание новых значений $a_{new}; b_{new}; \gamma_{new};$ вычисление значения функции (2.2) в этой точке $F_{new} = F(a_{new}; b_{new}; \gamma_{new});$ вычисление разности $\Delta = F_{new} - F_0$.

3. Если условие $\Delta < 0$ выполнено, то обновляют стартовые значения, уменьшают параметр T_0 и переходят к шагу 2; если условие не выполнено, то переходят к шагу 4.

4. Генерирование случайного числа $p \in [0;1]$, вычисление вероятности обновления стартового значения по формуле

$$P = \exp(-\Delta / T_0) \tag{2.8}$$

Если условие P > p выполнено, то обновляют стартовое значение, уменьшают параметр T_0 и переходят к шагу 2; если условие не выполнено, то переходят к шагу 2 без уменьшения параметра T_0 .

Применение этого алгоритма рассмотрим на следующем тестовом примере.

Предположим, что параметры эллипса принимают значения a = 5. b = 2, $\gamma = 45^{\circ}$. Сформируем равномерную сетку по полярной координате $\varphi_k \in [0; 2\pi]$ с шагом $h_{\varphi} = \pi/18$. Для предотвращения совпадения положения с теоретическим, каждый узел этой сетки сдвинем на случайную величину в пределах полушага так, чтобы она была неравномерной.

В каждом узле этой новой сетки вычислим величину полярного радиуса по формуле (2.7). Каждое значение полярного радиуса изменяем на случайную величину по следующей формуле

$$V^{R} = V \cdot \left[1 + \frac{rand}{2}\right], \tag{2.9}$$

где rand – случайное число, равномерно распределенное на отрезке [-1; 1].

Зададим стартовые значения параметров a = 1, b = 1, $\gamma = 0^{\circ}$ – то есть параметры единичной окружности. Используя формулу (2.1) и указанный выше метод адаптивного случайного поиска, подберем параметры эллипса. При изменениях параметров a, b, γ необходимо учитывать положительность полуосей a, b, а также интервал изменения угла $\gamma \in [0^{\circ}; 90^{\circ}]$. В результате получаем следующие значения: a = 4,813, b = 2,087, $\gamma = 45^{\circ}$, при этом величина F из формулы (2.2) уменьшилась со значения 170 при стартовых значениях параметров до 24 при найденных оптимальных. Экспериментальные и теоретические данные отображены на рис. 2.3. Если заранее известен угол наклона эллипса, то скорость поиска оптимального решения возрастает. Величины найденных полуосей в этом случае будут равны a = 4,901, b = 2,035, а величина F = 40,823.



Рис. 2.3 – Результаты обработки: 1 - экспериментальные данные; 2 – теоретическая зависимость

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [82]. Алгоритм, представленный на рис. 2.2, реализован в программе [83].

2.2 Метод обработки результатов электропрофилирования

Рассмотрим электрическое поле, измеренное с помощью симметричной четырехэлектродной установки Шлюмберже, для которой выполняется соотношение $r_{MN} \leq r_{AB} / 3$ между питающими *AB* и измерительными электродами *MN* и разности потенциалов Δu между электродами *MN* измерены в однородном изотропном полупространстве (рис. 2.4) [84, 85]



Рис. 2.4 – Расчетная схема: *AMNB* – измерительная установка; *x*, *z* – координаты; ρ₀, ρ₁, ρ₂ – удельное электросопротивление слоев геологической среды

$$\Delta u = \frac{I\rho_k(r,z)}{2\pi}k_y, \qquad (2.10)$$

где $k_y = r_{MN} / (r_{AM} \cdot r_{AN}) + r_{MN} / (r_{BM} \cdot r_{BN})$ – коэффициент установки, $\rho_k(r, z)$ – эффективное удельное электросопротивление (УЭС), Ом·м; *I* – ток источника, A; *r* – горизонтальное расстояние от источника тока до точки измерения потенциала, м; *z* – вертикальная координата точки измерения потенциала, м.

Так как установка симметричная, то $r_{AM} = r_{BN}$ и $r_{AN} = r_{BM}$, а значит ее коэффициент равен $k_y = 2r_{MN} / (r_{AM} \cdot r_{AN}) \approx 2r_{MN} / r^2$, где r – расстояние от источника тока до середины отрезка *MN*. Деля обе части равенства (2.10) на $r_{MN} \ll 1$, получим выражение

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{I\rho_k(r,z)}{\pi r^2}.$$
(2.11)

Таким образом, эффективное УЭС может быть выражено через производную от потенциала электрического поля по формуле

$$\rho_k(r,z) = \frac{\pi r^2}{I} \frac{\partial u}{\partial r}.$$
(2.12)

Рассмотрим модельную задачу (2.12), в которой дана трехслойная однородная изотропная в пределах каждого слоя среда с плоскопараллельными границами и удельными электросопротивлениями (УЭС) ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 , причем УЭС верхнего слоя (воздуха) $\rho_0 \rightarrow \infty$. На границе верхнего и промежуточного слоев (поверхность земли) располагается точечный источник тока (два близкорасположенных заземленных электрода). Пространственное распределение потенциала u = u(r, z)стационарного электрического тока такого источника удовлетворяет уравнению Лапласа в цилиндрической системе координат вида

$$\frac{\partial^2 u(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u(r,z)}{\partial z^2} = 0, \qquad (2.13)$$

при следующих граничных условиях

$$u_1\Big|_{R\to 0} \to \frac{I\rho_1}{2\pi R}; u_1\Big|_{z=h} = u_2\Big|_{z=h}; \frac{\partial u_1}{\partial z}\Big|_{z=h} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial u_2}{\partial z}\Big|_{z=h}; u_2\Big|_{R\to\infty} \to 0; \frac{\partial u_1}{\partial z}\Big|_{z=0} = 0, \quad (2.14)$$

где R – расстояние от источника тока до точки измерения потенциала в трехмерном пространстве, м; ρ_1 , ρ_2 – УЭС слоев, Ом·м; h – мощность рыхлого водонасыщенного слоя, м.

На поверхности земли при z = 0 потенциал поля может быть вычислен по формуле [86]

$$u(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2\int_0^\infty \frac{J_0(mr)Ke^{-2mh}}{1 - Ke^{-2mh}} dm \right],$$
(2.15)

где $K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ – коэффициент «отражения» тока на нижней границе слоев; $J_0(mr)$ – функция Бесселя нулевого порядка.

Раскладывая дробь $Ke^{-2mh}(1-Ke^{-2mh})$ в ряд Тейлора по степеням e^{-2mh} и применяя формулу Вебера, получим формулу

$$u(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(r^2 + (2nh)^2)}} \right].$$
 (2.16)

Вычисляя производную $\frac{\partial u}{\partial r}$, получим выражение

$$\frac{\partial u(r)}{\partial r} = \frac{I\rho_1}{2\pi r^2} \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n r^3}{(r^2 + (2nh)^2)^{1.5}} \right].$$
(2.17)

Тогда теоретическое значение эффективного УЭС из (2.12) будет определяться по формуле

$$\rho_k(r) = \rho_1 \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n r^3}{(r^2 + (2nh)^2)^{1.5}} \right].$$
(2.18)

Используемый в (2.18) степенной ряд сходится на всем интервале $-1 \le K \le 1$. . Однако, из-за физического смысла коэффициента *К* граничные значения $K = \pm 1$ недостижимы. Чем ближе значение *К* к границам интервала сходимости, тем скорость сходимости ряда меньше: при K = 1 более 100, а при K = -1 - 50 слагаемых.

В качестве альтернативы разложению в ряд предложено аппроксимировать выражение $Ke^{-2mh} / (1 - Ke^{-2mh})$ полиномом, степень которого определяется подбором [87]. После проделанной процедуры аппроксимации и применения формулы Вебера, получим формально практически такое же выражение, что и (2.16), а вычисляя производную, найдем выражение аналогичное (2.18) для теоретического значения эффективного УЭС

$$\rho_k(r) = \rho_1 \left[1 + \sum_{n=1}^N \frac{p(n)r^3}{(r^2 + (2nh)^2)^{1.5}} \right],$$
(2.19)

где *p*(*n*) – коэффициенты полинома-аппроксиманта, полученные с помощью метода наименьших квадратов.

Выражение (2.19) можно рассматривать как уравнение относительно одного или двух неизвестных: мощности водонасыщенного слоя h и коэффициента отражения K. Решение составленных уравнений во всех случаях возможно с использованием метода наименьших квадратов.

Рассмотрим пример, связанный с использованием выражения (2.19). Предположим, что после измерения мощности водонасыщенного слоя производится процедура электропрофилирования (ЭП), в процессе которой установка *AMNB* с фиксированным разносом AB = 30 м перемещается вдоль профиля и в каждой новой точке профиля вычисляется ρ_k . Требуется определить закономерность изменения мощности водонасыщенного слоя h(x), где x – координата точки измерения ρ_k .

В качестве исходных данных будем использовать значения: $r = 0, 5 \cdot AB = 15$ м; $\rho_1 = 1$ Ом·м; h = 5 м; как и выше экспериментальное значение ρ_k заменяется скорректированным $\rho_k^{\Pi}(r) = \rho_k(r) \cdot \Delta$.

Для решения этой задачи сформируем целевую функцию, как квадрат разности отклонений теоретических $\rho_k^{\rm T}(r)$, вычисленных по формуле (2.19), и экспериментальных $\rho_k^{\rm II}(r)$:

$$\Phi(h) = \left[\rho_k^{\mathrm{T}}(h_j) - \rho_k^{\vartheta}(h_j)\right]^2$$
(2.20)

Построив график функции $\Phi_h = \Phi(h)$, где $h \in [0...10]$, м, можно заметить, что целевая функция также является унимодальной (рис. 2.5).



Так как правая граница истинного интервала изменения глубины неизвестна, то можно использовать метод золотого сечения постепенно увеличивая правую границу интервала поиска (рис. 2.6).

Минимальное значение целевой функции равно $\Phi_{min} = 0,00$ и достигается оно при $h_{min} = 5,2$ м.

Для определения всех значений функции мощности h = h(x) необходимо найти минимум функции (2.15) для каждой точки измерения ρ_k .

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [88]. Ал-горитм, представленный на рис. 2.6, реализован в программе [89].



Рис. 2.6 – Блок-схема алгоритма определения мощности слоя водонасыщенного грунта *h* по измерениям электрического поля на поверхности земли

2.3 Методы и локальные алгоритмы реализации элементов объемных геолого-геофизических моделей откосных сооружений

Построение объемной геолого-геофизической модели и ее использование для прогноза устойчивости откосных сооружений требуют разработки следующих методов и комплекса локальных алгоритмов:

- формирование триангуляционной модели прибортового массива;

 поиска наиболее напряженной поверхности скольжения и расчета коэффициента запаса устойчивости.

Основой объемной геолого-геофизической модели является формирование триангуляционной модели прибортового массива [90]. Триангуляцией называется планарный граф, все внутренние области которого являются треугольниками (рис. 2.7) [90].



Рис. 2.7 – Пример триангуляционной модели земной поверхности

Поверхность борта, рельеф естественной поверхности ослабления и границы аномальных зон представляют в виде сетей множеств A, B, C треугольников, вершины которых имеют координаты x, y, z.

Существуют следующие алгоритмы построения триангуляционных поверхностей, различающиеся целями, достигаемыми при разбиении области на треугольники [90, 91]:

 оптимальная (минимально взвешенная) триангуляция, основанная на том, что согласно оптимальному алгоритму сумма длин всех ребер треугольников минимальна среди всех возможных триангуляций, построенных на тех же исходных точках;

 локально-оптимальная триангуляция, заключающаяся в последовательном построении ребер треугольников по возрастанию их длин, в результате получают нерегулярное построение, в котором возможно нахождение остроугольных многоугольников;

– триангуляция Б. Н. Делоне, являющаяся графом, двойственным диаграмме Вороного, представленным сетью максимально правильных треугольников, наиболее близких к равноугольным; впервые задача построения данной триангуляции была поставлена в работе советского математика Б. Н. Делоне [92].

В процессе построения триангуляционная поверхность может содержать ограничения – структурные ребра (неперестраиваемые, фиксированные ребра треугольников). К структурным ребрам относят фигуры – полилинии и регионы, состоящие из ненулевого числа ломаных и многоугольников соответственно [90]. С их помощью может быть задано, например, положение бровок откосов горнотехнических сооружений.

Выбор алгоритма построения триангуляционной поверхности обусловлен трудоемкостью его компьютерной реализации и особенностями измерения координат точек поверхности. Построение оптимальной триангуляции для большинства реальных задач неприемлемо ввиду трудоемкости его реализации, поэтому на практике применяют приближенные алгоритмы триангуляции: Б. Н. Делоне и локально-оптимальный [90].

Триангуляционная поверхность является триангуляцией Делоне только в том случае, если она является выпуклой (рис. 2.8а, б) и удовлетворяет условию Делоне, согласно которому в описанную окружность любого треугольника не попадает ни одна точка исходного множества (рис. 2.8в).



Рис. 2.8 – Примеры триангуляционных поверхностей: выпуклой (а); невыпуклой (б); пример выполнения условия Делоне для отдельного треугольника (в)

Для триангуляции Делоне характерны следующие свойства:

– для набора точек *n* из которых *m* – внутренние, количество треугольников триангуляции *i* = *n*+*m*-2, а количество ребер триангуляции *j* ≤ 3*n*-6;

– триангуляция Делоне обладает максимальной суммой минимальных углов β_i всех треугольников среди всех возможных триангуляций (рис.2.9а);

– триангуляция Делоне обладает минимальной суммой радиусов *R_i* окружностей, описанных около треугольников среди всех возможных триангуляций (рис. 2.96).



Рис. 2.9 – Основные свойства триангуляции Делоне

Построение триангуляции Делоне выполняют, когда существует возможность определить координаты множества точек треугольников с геометрией, позволяющей выполнить перечисленные выше условия, например, для поверхности откосов горнотехнических сооружений. Алгоритм локально-оптимальной триангуляции используют для компьютерной геометризации поверхностей, координаты точек которых получают на основании прямых и косвенных методов изысканий (геологических и геофизических).

Существует несколько классов алгоритмов построения триангуляции Делоне: итеративные, алгоритмы слияния, двухпроходные [90]. Одним из наименее

трудоемких в компьютерной реализации является простой итеративный алгоритм (рис.2.10).



Рис. 2.10 – Блок-схема простого итеративного алгоритма построения триангуляции Б. Н. Делоне с ограничениями

Алгоритм имеет следующую последовательность:

Шаг 1. Для построения триангуляции из файла (текстовый, электронная таблица) считывают множества (массивы) точек

$$A = \sum_{i=1}^{n} \{ P_i(x, y, z), ..., P_n(x, y, z) \};$$
(2.21)

$$M_{j} = \sum_{j=1}^{k} \{P_{j}(x, y, z), ..., P_{k}(x, y, z)\},$$
(2.22)

где *i*, n – порядковый номер и количество триангуляционных поверхностей соответственно; *j*, k – порядковый номер и количество структурных ребер; P(x, y, z) –

точка в пространстве с декартовыми координатами: абсцисса *x*, ордината *y*, аппликата *z*.

Шаг 2. На первых трех точках, не лежащих на одной прямой, строят треугольник.

Шаг 3. Добавляют новую $P_{i(j)}$ точку в триангуляцию.

Шаг 4. Проверяют условие попадания точки P_i в существующий треугольник (триангуляцию). Если точка $P_{i(j)}$ попадает в существующую триангуляцию (треугольник), то переходят к шагу 5. Если точка P_i не попадает в существующую триангуляцию (треугольник), то строят новые смежные треугольники в количестве от 1 до n-1 и переходят к шагу 6.

Шаг 5. Если точка $P_{i(j)}$ попадает на ребро треугольника, то 2 смежных треугольника делят на 4. Если точка P_i попала в существующий треугольник, то его делят на 3 новых.

Шаг 6. Проверяют условие Делоне для существующих треугольников. Если оно не выполнено, то производят изменение только перестраиваемых ребер до его выполнения.

Шаг 7. Если количество вставленных точек в триангуляцию не превышает их общее число *n*, то переходят к шагу 3.

Шаг 8. Если заданы структурные ребра, последовательно вставляют в триангуляцию точки P_i (выполняют шаги 3-6) k раз.

Построение триангуляции с помощью локально-оптимального алгоритма (рис. 2.11) выполняют в следующей последовательности.

Шаг 1. Во множество исходных точек

$$A = \sum_{i=1}^{n} [P_i(x, y, z), ..., P_n(x, y, z)]$$

помещают все вершины заданных полилиний и регионов, а также генерируют список всех возможных отрезков, соединяющих пары исходных точек.

Шаг 2. Сортируют отрезки по возрастанию длин.

Шаг 3. Выполняют построение структурных ребер.

Шаг 4. Выполняют вставку отрезков в триангуляцию от более коротких до длинных. Выбирают отрезок l_i . Если отрезок пересекает ранее вставленные ребра (отрезки), то его исключают из массива, если нет – вставляют в триангуляцию. Данный шаг повторяют до тех пор, пока все точки не будут соединены или все отрезки не будут вставлены.



Рис. 2.11 – Блок-схема локально-оптимального алгоритма построения триангуляции с ограничениями

Повышение точности прогноза устойчивости возможно за счет реализации двух функций поиска наиболее напряженной поверхности скольжения:

– поиск в плане, суть которого заключается в незначительном поступательном смещении и повороте на величины Δl и $\Delta \alpha$ расчетного сечения в пределах задаваемых диапазонов; что позволяет учесть изменчивость геометрии поверхности откоса и естественной поверхности ослабления в направлении простирания откоса, а поворот – более точно спрогнозировать направление смещения криволинейного в плане откоса (рис. 2.12).

– поиск в вертикальной плоскости посредством цикличных расчетов по множеству потенциальных поверхностей скольжения, отстраиваемых согласно заданному шагу Δa вдоль откоса.



Рис. 2.12 - Схема смещения расчетного сечения в плане

Построение расчетных сечений выполняют по каждой триангуляционной поверхности. На горизонтальной плоскости проекций находят все точки пересечения проекции расчетного сечения *P_i* с ребрами триангуляции (рис. 2.13) и строят вертикальный разрез – математическую модель профиля откосного сооружения.



Рис. 2.13 – Схема расположения точек пересечения проекции расчетного сечения с ребрами триангуляции

Математическую модель расчетного профиля борта получают путем описания его элементов (откос борта, берма, естественная поверхность ослабления, по-

верхность скольжения), полученных из триангуляционной модели, алгебраическими уравнениями. На рис. 2.14 представлена математическая модель простого случая – плоского откоса расчетного профиля откосного сооружения.



Рис. 2.14 – Математическая модель расчетного профиля откосного сооружения

Алгебраические уравнения элементов профиля борта, представлены в табл. 2.1.

Алгебраические уравнения, используемые при создании математической модели, ограничены вершинами: 1, 2 – нижняя и верхняя бровки; 3 – граница площадка (берма); 4 – естественная поверхность ослабления; 5, 6 – границы трещины отрыва; 6, 7, 8, 9 – точки, принадлежащие касательным к плавной криволинейной части поверхности скольжения.

Таблица 2.1

Элемент борта	Уравнение	Обозначения
Откос	$y_i = x_i t g \alpha_i$	А – угол наклона борта, град; Н – высота борта, м;
Берма	$y_i = H$	β – угол наклона естественной поверхности ослаб- ления, град; H_{90} – высота вертикальной трещины отрыва, м; b – ширина бермы, м; θ – угол излома поверхности скольжения на контакте с естествен- ной поверхностью ослабления, град; ω – угол наклона поверхности скольжения в верхней части, град; φ – угол внутреннего трения, град; O – центр окружности криволинейной части поверхности скольжения с радиусом R (м)
Естественная поверхность ослабления	$y_i = x_i t g \beta$	
Криволинейная часть поверхно- сти скольжения	$y_i = y_o - \sqrt{R^2 - (x_i - x_o)^2}$	

Алгебраические уравнения элементов профиля борта

Поверхности скольжения отстраивают из точки 5 вдоль всей ширины бермы b с заданной величиной шага поиска ширины призмы возможного обрушения a. С площадки (бермы) борта формируется вертикальная площадка отрыва величиной H_{90} .

В нижней части поверхность скольжения совпадает с естественной поверхностью ослабления (между точками 1 и 8), в верхней – круглоцилиндрическая (между точками 6 и 8), вписанная между касательными под углами ω и θ.

Границы расчетных блоков определяют поверхностями скольжения второго семейства: для первого блока – точки 10 и 11, для второго блока – точки 8 и 12. В месте выхода поверхности скольжения второго семейства на поверхность образуется вертикальная площадка отрыва (точки 2-10 и 13-12).

Определение векторов сил, действующих на призму возможного обрушения, а также построение многоугольника сил производится также в аналитическом виде.

При прогнозе устойчивости откосных сооружений методом многоугольника сил используют расчетные значения механических свойств массива и естественной поверхности ослабления – углы внутреннего трения φ , φ' и сцепления *C*, *C*, которые получают путем введения в средневзвешенные характеристики коэффициента запаса устойчивости *n*:

$$C_n = \frac{C_{\rm cp}}{n}; \tag{2.23}$$

$$tg\phi_n = \frac{tg\phi_{\rm cp}}{n} \tag{2.24}$$

Ниже рассмотрен алгоритм прогноза устойчивости откосного сооружения при пологом согласным с откосом залегании естественной поверхности ослабления методом предельного равновесия – векторного сложения сил (2.15).

Алгоритм включает следующие операции.

Шаг 1. Вычисляют расчетные значения механических свойств массива и естественных поверхностей ослабления ϕ , ϕ' , C, C'.

Шаг 2. Выполняют циклический расчет невязок многоугольника сил ΔF_i через заданный шаг поиска Δa наиболее напряженной поверхности скольжения в пределах бермы *b*.

Шаг 3. В массиве значений невязок $[F_1; F_n]$ находят наиболее напряженную поверхность скольжения с наименьшей величиной невязки ΔF_{min} .

Шаг 4. Вычисляют значение допустимой невязки многоугольника сил $\Delta F_{\rm d}$ по формуле

$$\Delta F = kgP, \tag{2.25}$$

где k – погрешность графоаналитического расчета, принимаемая в диапазоне 0,01-0,02; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – масса призмы возможного обрушения.



Рис. 2.15 – Алгоритм прогноза устойчивости откосного сооружения

Если полученное значение невязки многоугольника сил по наиболее напряженной поверхности скольжения ΔF_{min} не попадает в диапазон от 0 до ΔF_{d} , изменяют значение коэффициента запаса устойчивости *n* и повторяют процедуру до выполнения этого условия.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [93, 94]. Алгоритм, представленный на рис. 2.15, реализован в программах [95, 96].

2.4 Общий алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей

Для поиска положения оползнеопасных зон (сечений) предложен алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геологогеофизических моделей. Суть данного алгоритма заключается в математической схематизации неоднородности строения прибортового массива, основанной на комплексировании баз данных геологического изучения, гидрогеологического мониторинга, геофизических исследований и маркшейдерских съемок, с последующим количественным анализом по коэффициенту запаса устойчивости. Учитывая современную тенденцию использования средств автоматизации для повышения точности прогноза, алгоритм адаптирован для его последующей компьютерной реализации [97, 98]. Алгоритм имеет 4-х уровневую структуру (рис. 2.16).

На первом этапе формируется триангуляционная модель прибортового массива. Поверхность борта, рельеф естественной поверхности ослабления и границы аномальных зон представляют в виде сетей множеств A, B, C треугольников, вершины которых имеют координаты x, y, z.

На втором этапе формируют геомеханическую модель. Выполняют ввод физико-механических параметров φ , *C*, γ массива и естественной поверхности ослабления в аномальных зонах и за их пределами.

Третий этап включает в себя настройку расчетного модуля: ввод координат *P* точек первого расчетного сечения, величин линейного Δl и углового $\Delta \alpha$ шага смещения расчетных сечений, а также шага поиска Δa наиболее напряженной поверхности скольжения на отдельном расчетном сечении.

На четвертом этапе работают с базой данных геомеханической модели. В каждом расчетном сечении при помощи математической модели профиля откосного сооружения вычисляют сумму удерживающих и сдвигающих сил, и их соотношение – коэффициент запаса устойчивости.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [99, 100].





А, В, С, Е – множество точек P_i с координатами x, y, z; D – множество коэффициентов запаса устойчивости n; $\varphi_{B(e)}$, $C_{B(e)}$, $\gamma_{B(e)}$ – угол внутреннего трения, сцепление и объемный вес в зонах влагонасыщения (естественной влажности); $\varphi'_{B(e)}$, $C'_{B(e)}$ – угол внутреннего трения и сцепление по естественным поверхностям ослабления в зонах влагонасыщения (естественной влажности); Δl , $\Delta \alpha$, $\Delta \alpha_{max}$ – величины линейного, углового и максимального углового шагов поиска наиболее опасного сечения в плане; Δa – шаг поиска наиболее напряженной поверхности скольжения в расчетном сечении

Выводы

В результате разработки методов, алгоритмов построения объемных геолого-геофизических моделей откосных сооружений и прогноза их устойчивости получены следующие результаты:

1. Повышение точности определения коэффициента анизотропии, характеризующего степень развития деформационных процессов в прибортовом массиве и комплексно отражающего опасность оползнеобразования, обеспечивается методикой обработки результатов кругового сейсмического зондирования. При этом круговые диаграммы аппроксимируются эллипсом, параметры которого (полуоси и угол поворота большой оси) предложено определять с использованием метода наименьших квадратов и адаптивного случайного поиска, который является вариантом классического метода статистических испытаний («Монте-Карло»). Разработанные алгоритм и компьютерная программа включают генератор случайных чисел и циклический подбор параметров эллипса, соответствующих минимуму целевой функции.

2. Аналогичный метод обработки геофизических данных применен для определения мощности h влагонасыщенного слоя по результатам электропрофилирования. Рассмотрена задача для трехслойной среды из решения уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями получена функция потенциала u, а с использованием разложением в ряд Тейлора – функция эффективного удельного электросопротивления (УЭС) ρ_k . Предложено для установления функции h (инверсии зондирований) определять значения коэффициента отражения точек от нижней границы слоев по минимуму целевой функции (разности квадратов теоретических и экспериментальных значений эффективных УЭС в каждой точке профиля). При разработке алгоритма и компьютерной программы также использован метод адаптивного случайного поиска.

3. Для формирования триангуляционной модели поверхности прибортового массива существует ряд методов, включающих разбиение областей на треугольники, при этом для компьютерной реализации наиболее пригодны приближенные алгоритмы Б. Н. Делоне и локально-оптимальной триангуляции. Алгоритм Б. Н. Делоне применяют для выпуклых поверхностей, удовлетворяющих специальным требованиям, поэтому он имеет ограниченную область применения. Более универсальным является алгоритм локально-оптимальной триангуляции, включающий нерегулярные построения. Для автоматизации поиска наиболее напряженной поверхности скольжения целесообразно задавать поступательные смещение и поворот расчетного сечения в плане и в вертикальной плоскости с заданными шагами, что позволит учесть изменчивость поверхностей откоса и естественного ослабления, при этом математическую модель расчетного профиля откосного сооружения строят по точкам пересечения проекции сечения с ребрами триангуляции с использованием уравнений элементов профиля и правил построения вероятной поверхности скольжения. Для прогноза устойчивости откосного сооружения разработан алгоритм и комплекс компьютерных программ, реализующих метод векторного сложения сил.

4. Общий алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей включает следующие последовательно выполняемые этапы: построение триангуляционной модели проектной или фактической поверхностей прибортового массива, поверхностей естественного ослабления и влагонасыщенных зон по данным инженерно-геологических изысканий; построение геомеханической модели (ввод физико-механических свойств прибортового массива в естественном состоянии, поверхностей ослабленных разуплотненных и влагонасыщенных зон); настройка расчетного модуля (ввод начальных координат расчетного сечения, величин шагов линейного и углового его смещений, шага поиска наиболее напряженной поверхности скольжения); вычисление коэффициентов запаса устойчивости по каждому расчетному сечению.

Решение задачи разработки методов и алгоритмов построения объемных геолого-геофизических моделей откосных сооружений и прогноза их устойчивости позволило перейти к исследованию особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений естественного и техногенного сложения на угольных разрезах Кузбасса и Республики Узбекистан.

ГЛАВА 3 ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЕСТЕСТВЕННОГО СЛОЖЕНИЯ

Изменение устойчивости откосных сооружений естественного сложения изучалось при воздействии следующих факторов:

- техногенного водонасыщения;
- естественного водонасыщения;
- подработки подземными выработками.

3.1 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах техногенного водонасыщения

Влияние процессов техногенного водонасыщения на устойчивость бортов естественного сложения исследовано в условиях разреза «Бачатский». Исследуемый прибортовой массив Бачатского угольного разреза расположен на западном борту между выработанном пространством и отвалом сухой вскрыши, отсыпанном на намывные отложения гидроотвала «Сагарлыкский». Размеры опытного участка составили (рис. 3.1): длина (вдоль бровки борта) – 2000–2200 м, ширина – 300–500 м. Рельеф поверхности – равнинный, на интервале $x_1 = O_1O_2 = 0-500$ м имеются навалы вскрышных пород высотой до 6 м. По контуру отвала расположен водоотводной канал шириной 1,5–2 м и глубиной 1–2 м.



Рис. 3.1 – План опытного участка с расположением водонасыщенных зон: 1 – гидроотвал «Сагарлыкский»; 2 – борт разреза; *x*₁, *x*₂ – геофизические профили

В борту четвертичных отложений неоднократно происходили геомеханические процессы, сопровождаемые высачиванием воды на откос на глубине 13–17 м от земной поверхности. Обрушение уступов происходит с образованием трещины отрыва высотой до 3–6 м, в нижней части оползневые массы выполаживаются до 20–30°. Анализ планов горных работ показывает, что с течением времени интенсивность развития оползневых процессов увеличивается. Отдельные участки деформаций объединяются в единый фронт в течение более 10 лет. Для мониторинга гидрогеомеханического состояния прибортового массива выполнены электрофизические исследования: вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) – 5 поперечных профилей O_1y_1 , O_2y_2 , O_3y_3 , O_4y_4 , O_5y_5 с максимальным разносом AB =260 м (150 точек); электрические профилирования (ЭП) – 2 продольных профиля O_1x_1 , O'_1x_2 суммарной длинной 2400 м (120 точек).

При интерпретации электрофизических исследований на интервалах монотонного изменения эффективного удельного электросопротивления (УЭС) ρ_k были учтены следующие особенности строения изучаемого массива: поскольку глинистые породы имеют высокую пористость и влажность, геоэлектрический разрез на основной части профиля следует принять двухслойным при соотношении удельных электросопротивлений (УЭС) слоев $\rho_1 < \rho_2$; зоны водонасыщения имеют ограниченные размеры в плане и по глубине и должны рассматриваться как локальные аномальные зоны с соотношением УЭС $\rho_2 < \rho_1$.

Сопоставление разносов линий питающих электродов AB, соответствующих границам слоев, с данными геологических разрезов позволило установить глубину зондирования h = 0,15AB.

Аномальные зоны, соответствующие водоносным коллекторам, имеют мощность 3–6 м и расположены на глубинах в интервале от h = 10 м до h = 20 м, причем вероятно разделение коллектора на отдельные русла по глубине. Эти зоны были сформированы вследствие водонасыщения грунтового основания и инфильтрации воды из водоотводящего канала, протекающего по контуру Сагарлыкского гидроотвала.

Анализ графиков ρ_k (*AB*, *h*), представленных на рис. 3.2, показал следующее: практически все графики имеют вид, характерный для трехслойной среды типа *H* с относительно проводящим подповерхностным слоем ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$); гео-электрический разрез включает подповерхностный слой мощностью 2–5 м, эффективное УЭС которого в сильной мере зависит от водонасыщения атмосферной влагой; средний относительно проводящий слой рыхлых песчано-глинистых отложений, насыщаемых влагой образующихся фильтрационных коллекторов; нижний относительно малопроводящее полупространство из плотных твердых коренных пород.



Рис. 3.2 – График ВЭЗ №1 (КузГТУ): І – почвенный слой; ІІ – слой четвертичных отложений; ІІІ – коренные породы; ІV – фильтрационный коллектор; 1-3 – порядковый номер серии измерений

Поскольку расположение средней части водонасыщенной зоны на всех графиках соответствует интервалу AB = 100-140 м, база электропрофилирования (ЭП) была принята AB = 120 м.

Анализ графиков электропрофилирования $\rho_k(x_1)$ и $\rho_k(x_2)$, представленных на рис. 3.3, показал следующее: на интервалах $x_1 = 600-1200$ м и $x_2 = 600-1050$ м имеет монотонное увеличение величины ρ_k отражающее монотонное уменьшение мощности *h* слоя рыхлых четвертичных отложений; на интервалах $x_1 = 220-660$ м и $x_2 = 260-600$ м наблюдаются знакопеременные аномалии, интерпретируемые как зоны насыпных водонасыщенных грунтов, формирующие фильтрационный коллектор; на интервалах $x_1 > 1250$ м и $x_2 > 1180$ м отмечено понижение уровня ρ_k , которое интерпретируется как левая граница водонасыщенной зоны, формирующей второй фильтрационный коллектор.

Расчетные физико-механические характеристики пород четвертичных отложений и естественных поверхностей ослабления заданы на основании обобщения результатов специальных исследований и метода обратных расчетов (табл. 3.1). Прогноз устойчивости выполнен методом предельного равновесия. Объемная геолого-геофизическая модель, расчетные сечения и результаты прогноза устойчивости представлены на рис. 3.5 и в табл. 3.2 и соответственно.


Для построения объемной геологической модели массива по результатам электропрофилирования использована методика определения изменения мощности рыхлого слоя от координаты профиля h(x) (п.2.2). Расчетные графики изменения мощности рыхлых четвертичных отложений представлены на рис. 3.4. Построенная объемная геолого-геофизическая модель с границами водонасыщенного слоя использована для прогноза устойчивости фактического положения прибортового массива.





74

Рис. 3.5 – Объемная геолого-геофизическая модель прибортового массива (а) и геофизические профили O_1y_1 (б), O_2y_2 (в), O_4y_4 (г): 1 – поперечный геофизический профиль; 2 – точка ВЭЗ; 3 – продольный геофизический профиль; 4 – фильтрационный коллектор; 5 – кровля коренных пород; 6 – наиболее напряженная поверхность скольжения

Таблица 3.1

Физико-механические характеристики пород четвертичных отложений и показатели сопротивления сдвигу по контакту пород

Наименование	ф, град	С, кПа	ρ, кН/м³
Грунты четвертичных отложений при естественной	18	39.2	18.6
влажности	10	<i>c,</i> _	10,0
Грунты четвертичных отложений водонасыщенного слоя	6	24,5	19,4
Контакт "четвертичные отложения - коренные породы"	10	29,4	-
		Ĺ	v

В таблице приняты сокращения: ϕ – угол внутреннего трения; *С* – сцепление; ρ – объемный вес

Таблица	2	2
таолица	2	. 4

Профиль	<i>Z</i> . <i>6</i> , M	$Z_{\mathcal{H}}, M$	<i>h</i> , м	α, град	n
O_1y_1	284,3	259,9	24,4	20	1,06
$O_2 y_2$	293,1	269,1	24,0	13	1,38
O_3y_3	287,4	260	27,4	14	1,91
O_4y_4	307,9	274,6	33,3	11	1,54
$O_5 y_5$	302	273,5	28,5	12	1,97

Результаты прогноза устойчивости прибортового массива

В таблице приняты сокращения: z_{θ}/z_{h} – отметки верхней и нижней бровок призмы возможного обрушения; h – высота деформированного борта, м; α – результирующий угол; n – коэффициент запаса устойчивости.

По результатам прогноза устойчивости установлено следующее: на расчетных сечениях $O_3y_3 - O_5y_5$ после деформирования удерживающие силы значительно превышают сдвигающие (коэффициент запаса устойчивости), что обусловлено увеличением веса призмы упора за счет оползневых масс; потенциально оползнеопасный участок приурочен к расчетному сечению O_1y_1 , что объясняется плавным снижением коэффициента запаса устойчивости от 1,38 (сечение O_2y_2) к 1,06, являющимся близким к предельному.

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [88].

3.2 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах естественного водонасыщения

Влияние процессов естественного водонасыщения исследовано в условиях разреза «Ангренский» (Республика Узбекистан). Прибортовой массив оползня «Центральный» сложен породами мезо-кайнозойского покрова с преобладанием пород глинистого состава. Падение слоистости близкое к горизонтальному. Строение массива осложнено разрывными нарушениями, классифицируемыми как взбросо-надвиги с очень пологим сместителем в нижней части и крутым в верхней. Они придали оползневому участку «чешуйчатое» строение. Разрывные нарушения залегают согласно с откосом, разрывая толщу пород от четвертичных отложений до сузакского горизонта палеогена. Генезис такого строения прибортового массива может иметь древнеоползневую природу. Оползень «Центральный» расположен в северо-западной части разреза на участке слияния подрусловых потоков Баксук-сай и Саяк-сай (по местной терминологии «сай» - овраг с постоянным или временным водотоком, а также сам водоток). Охватывает четвертичные, мезозойские и кайнозойские отложения, нарушенные согласно залегающими с откосом дизъюнктивами типа «взбросо-надвиг» с углами падения от 0 до 40°. Схема оползня представлена на рис. 3.6.



Рис. 3.6 – Схема оползня «Центральный» (АО «Узбекуголь»): 1 – действующая автодорога А-373; 2 – разрушенный участок автодороги А-373; 3 – верхняя бровка борта; 4 – разрывное нарушение типа «взбросо-надвиг»

Первые трещины в прибортовой зоне зафиксированы в апреле 1985 года, а в мае 1987 года после увеличения результирующего угла наклона борта с 11 до 15° произошло оконтуривание призмы обрушения объемом 58 млн. м³. По результатам инструментальных и визуальных наблюдений поверхность скольжения приурочили к глинам и кварцевым пескам сузакского яруса палеогеновой системы кайнозойской эры. За период инструментальных наблюдений с 1986 по 2001 год скорости и направления смещения реперов менялись неоднократно как вкрест, так и по простиранию оползневого массива. Увеличение скоростей смещения совпадало с пиками выпадения осадков или с подвиганием экскаваторных забоев.

В мае 1993 г. на 111 км автодороги А-373 «Ташкент – Коканд» произошло формирование оползня «Старая подстанция» («Массив Коканд») в виде трещин на правом фланге оползня «Центральный». В 2002 г. эти трещины соединились с оползнем «Центральный». Объем оползня «Массив Коканд» составил 3,5 млн. м³, площадь проекции на план – 0,21 км², протяженность трещин отрыва – от 100 до 500 м.

В августе 2010 г. система трещин «Массива Коканд» продолжила развиваться и удлиняться в юго-восточном направлении. По трещинам зафиксированы локальные просадки шириной до 5,5 м и глубиной до 2 м. Величина общего оседания составила 15 м. По отдельным трещинам отмечена разгрузка подземных вод. В 2011 г. после длительного стояния борта без обновления произошла активизация деформационных процессов оползня «Центральный». Оседание оползневой массы составило 40 м. Образовался каньон со скоплением воды объемом 8,5 тыс. м³, «Массив Коканд» окончательно соединился с оползнем «Центральный».

В ноябре 2017 г. началась новая активизация оползня «Центральный», вызванная интенсивным ведением работ средней части оползня. В головной части оползня, в районе бывшей автодороги А-373 «Ташкент-Коканд», вдоль границы призмы обрушения появилась трещина длиной 530 м и шириной 0,6 м. Величина оседания составила 1,5 м. Произошло резкое изменение скоростей смещения: горизонтальных – от 45,9 до 509,7 мм/сут.; вертикальных – от 97,9 до 211,9 мм/сут

В 2018 г. образовался ряд трещин, была продолжена активная стадия смещения оползня. Скорости смещения достигли: в вертикальной плоскости – 79,7 мм/сут, в горизонтальной – 738,6 мм/сут. Направление смещения реперов – юговосточное. В головной части оползня появилась новая трещина длиной 70 м. Глубина трещины достигла 5 м, ширина – 2,3 м, оседание – 3 м. Произошло полное разрушение автодороги А-373.

Для оползня характерно цикличное развитие: в головной части на поверхность выходят вертикальные трещины отрыва, по которым происходит оседание и горизонтальное смещение отколовшихся блоков пород. Поверхность отколовшегося блока мало нарушена, что указывает на оползание пород по естественной поверхности ослабления в призме упора. В северо-восточной части призмы обрушения происходит скопление воды. Рабочие площадки уступов, расположенные ниже оползня, в весенний период обводнены. Сток воды – самопроизвольный по откосу. В нижней части на откосе борта видна поверхность скольжения – трещина, заполненная глиной и кварцевым песком. Высота оползня составляет 150 м, результирующий угол – 17°. Ширина призмы возможного обрушения достигает 260 м. Объем оползневых масс в 2018 г. составил 120 млн. м³.

Оползень «Северный» расположен в восточной части северного борта и приурочен к руслу сая «Туган-Баши». Развитие оползня происходит циклично. По данным геолого-маркшейдерской службы разреза «Ангренский» оконтуривание первой призмы обрушения произошло в мае 1999 г. Объем оконтуренного блока составил 1,3 млн. м³. В июне этого же года начался второй этап развития оползня, обусловленный увеличением размеров трещин. Объем оползневого блока составил 1,7 млн. м³, а к декабрю достиг 3 млн. м³. В июле 2019 г. произошла новая активизация геомеханических процессов в виде оконтуривания призмы обрушения объемом 25 млн. м³. Размер ширины призмы обрушения достиг 350 м, длина по

фронту – 800 м. Маркшейдерскими инструментальными наблюдениями установлено наличие двух основных поверхностей скольжения, приуроченным к контакту четвертичных и неогеновых пород с известняками палеогена, а также к кварцевым пескам и глинам сузакского яруса палеогена.

По мере развития горных работ в сложных инженерно-геологических условиях (высокая размокаемость, склонность к набуханию, низкие значения прочностных характеристик, физическое выветривание, наличие зон трещиноватости) и гидрогеологических условиях (выход подземных вод на поверхность откосов, наличие зон обводнения и водоупоров) произошло формирование четырех основных оползней на естественных склонах и бортах разреза: «Наугарзанский», «Атчинский», «Центральный», «Северный». Характеристика основных оползней по данным маркшейдерской службы разреза «Ангренский» представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3

	Характерис	тика основных о	лолзней (АО «Узбе	скуголь»)
Оползень	Наугарзанский	Атчинский	Центральный	Северный
Год формиро- вания	1954	1972	1985	1999
Объем на 2017-2018 гг., млн. м ³	15	800	120	1,3
Площадь на 2017-2018 гг., км ²	0,8	1,05	1,06	0,17
Расположение оползня	юго-восточная часть карьерного поля	южная часть карьерного поля	северная часть карьерного поля	северо-восточная часть карьерного поля
Направление смещения	северо-запад азимут - 301°	север азимут - 0°	юго-восток азимут - 149°	юго-запад азимут - 200°
Причины оползня	Увлажнение пород вблизи водоема	Подработка естественного склона станцией «Подземгаз»	Суффозионные процессы, сток подрусловых потоков боковых саев и полземных вол	Выклинивание подземных вод по контакту четвертичных галечников и песчано- глинистых пород

Для контроля оползневых процессов, разработки мероприятий по снижению их интенсивности и ликвидации негативных последствий на разрезе «Ангренский» ведутся постоянные маркшейдерские инструментальные и гидрогеологические наблюдения. На рис. 3.7 представлены графики максимальных горизонтальных $V_{\rm r}$ и вертикальных $V_{\rm B}$ скоростей смещения в 2017-2018 гг. по оползню «Центральный». Из приведенных данных по скоростям смещений видно, что оползне-

вые процессы значительно усилились в 2018 г. Менее интенсивно смещения происходят в период с мая по декабрь, более интенсивно – в январе – мае.



Рис. 3.7 – График максимальных горизонтальных V_г и вертикальных V_в скоростей смещения по оползню «Центральный» в 2017–2018 гг. (АО «Узбекуголь»)

Для изучения и оценки водопритоков по периметру разреза создана гидрорежимная сеть из наблюдательных скважин, по которым ежемесячно производят замеры уровней грунтовых вод. Из 13 водопонижающих скважин ведется откачка воды с последующим сбросом в водохранилища. Из 7 водопонижающих скважин, пробуренных в Южном борту, за 2017 г. откачано 178 715 м³ воды, за 2018 г. – 177 081 м³. Из 6 водопонижающих скважин, расположенных на Северном борту, объемы откачки составили: в 2017 г. – 305 742 м³, в 2018 г. – 316 107 м³. Анализ изменения расхода дренажных вод Q за 2017–2018 гг. (рис. 3.8) показывает, что наибольшее увеличение уровня грунтовых вод происходит в весенний период (март–май).



Рис. 3.8 – График изменения расхода *Q* дренажных вод в 2017 и 2018 гг. (АО «Узбекуголь»): *1* – профиль I; 2 – профиль II; 3 – профиль III

На разрезе «Ангренский» проведены комплексные геофизические исследования, целью которых являлось диагностирование неустойчивых разуплотненных и обводненных зон в прибортовых массивах для дальнейшего прогноза устойчивости бортов разреза.



(геологоразведочная экспедиция АО «Уголь», Республика Узбекистан)

Сейсмопункт включал точку возбуждения колебаний, расположенную в центре окружности радиусом 10 м и 12 сейсмоприемников, закрепленных в специально подготовленных пунктах по окружности с угловым шагом $\varphi = 30^{\circ}$. Возбуждение колебаний производилось 10-20 ударами по поверхности массива кувалдой (темпером) массой 20 кг, регистрация выполнялась в режиме накопления сейсмостанцией Лакколит 24-М с использованием сейсмоприемников 9С-20*dx*.

В качестве основного результата обработки сейсмического зондирования использовали величину и направление вектора коэффициента анизотропии \vec{K}_a , вычисление которого проводили по методике, изложенной в п.2.1.

Величина K_a комплексно характеризует потенциальную опасность оползнеобразования на исследуемом участке, степень которой определяется снижением прочностных и деформационных свойств массива и развитием деформаций.

Линию действия вектора \vec{K}_a определяли по круговым диаграммам интервалов времени прихода продольной волны t_i от угловой координаты ϕ . Сопоставле-

ние баз данных сейсмического зондирования с результатами визуальных и маркшейдерских наблюдений оползневых процессов позволило предварительно установить следующие характерные диапазоны величины *K_a*:

– при $K_a = 1 - 1,2$ анизотропия выражена слабо в пределах фоновых значений, участок не представляет опасности по вероятности оползня;

при K_a = 1,2 – 1,6 деформационные процессы находятся в начальной стадии, участок потенциально оползнеопасен;

при *K_a* > 1,6 участок представляет непосредственную опасность по вероятности развития оползня

при *K_a* > 3,0 участок представляет непосредственную опасность по вероятности развития оползня.

Схема опытного участка в районе формирующегося оползня на южном борту разреза представлена на рис. 3.9. Опытный участок включал 12 сейсмопунктов, расположенных на территории между верхней бровкой борта и р. Ахангаран. Общая протяженность геофизического профиля составила 1,0 км, расстояние между соседними сейсмопунктами составило 50-100 м.

Проведена обработка и анализ банка данных полевых измерений методом сейсмических зондирований, полученных исполнителем (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Стадия					Номер	а пункт	ов КСЗ				
наблюдения	135	134	133	132	131	130	129	128	127	126	125
Начало	1,29	1,38	1,89	1,76	2,00	1,94	1,63	1,44	1,22	1,37	1,53
2 мес		1,38	2,28	1,71	2,68	2,13	1,30	2,13	1,53	1,48	1,56
12 мес	1,73	1,00	2,25	1,71	2,80	2,13	1,45	1,66	1,55	1,48	1,66
15 мес	1,73	1,00	1,50	1,76	2,36	2,25	1,67	1,45	1,48	1,32	1,15
25 мес		1,39	2,26	1,71	2,53	2,13	1,48	1,95	1,35	1,32	1,35
33 мес	1,58		1,55	1,29	1,95	1,71	1,77	1,53	1,22	1,04	1,06
36 мес	1,38	1,26	1,05	1,29	1,60	1,27	1,47	1,53	1,15	1,04	1,06

Результаты определения коэффициента сейсмической анизотропии *K_a* (геологоразведочная экспедиция АО «Уголь», Республика Узбекистан)

На рис. 3.10 представлены графики изменения величины K_a по сейсмопунктам (СП), расположенным примерно параллельно бровке борта, на различных стадиях наблюдения и от времени на СП, расположенных вблизи борта (СП 131), в средней (СП 132) и тыловой (СП 134) частях потенциально оползнеопасной зоны.



Рис. 3.10 – График изменения величины K_a по номерам СП (а) и от времени наблюдения (б) (геологоразведочная экспедиция АО «Уголь», Республика Узбекистан): 1 – t = 0; 2 – t = 15 мес.; 3 – t = 25 мес.; 4 – t = 36 мес.; 5 – СП 134; 6 – СП 132; 7 – СП 131

Из приведенных результатов следует, что на границах геофизического профиля (СП 134 – СП 135 и СП 127 – СП 125) величина K_a находится в диапазоне K_a = 1,04 – 1,73, в то время как в центральной части профиля (СП 133 – СП 130) она достигает максимальных значений $K_a = 2,00 - 2,80$ на интервале t = 12 - 24 мес.

В дальнейшем (при t > 24 мес.) с образованием на земной поверхности борта трещин отрыва (см. рис. 3.9) происходит разгрузка массива, приведшая к снижению анизотропии механических, акустических свойств массива и соответствующему уменьшению уровня $K_a < 1,6$ (рис. 3.11).

Таким образом, экспериментально установлен критерий отнесения состояния участка массива к потенциально оползнеопасному по результатам кругового сейсмического зондирования: $K_a > 1,6$. С использованием этого критерия установлены границы в плане оползнеопасной зоны (см. рис.3.9).



83



Электрофизические исследования в прибортовом массиве, прилегающем к оползню «Центральный», были проведены геофизической группой государственной службы Республики Узбекистан по слежению за опасными геологическими процессами. Исследования выполнены методом зондирования по схеме симметричного электропрофилирования установкой *АМNB* при разносе питающей линии AB = 100 м и MN = 25 м. Измерения осуществлялись аппаратурой АНЧ-3.

Для построения геологических разрезов по профилям использовались данные испытаний отобранных проб грунтов, результаты гамма- и каротажа электросопротивлений по геологическим скважинам.

На рис. 3.12 представлен план опытного участка электрофизических исследований с нанесенными на него геофизическими профилями, графиками электропрофилирования – зависимостями эффективного удельного электросопротивления (УЭС) ρ_k от продольной координаты *x*, древними руслами саев (по местной терминологии «сай» – это овраг с постоянным или временным водотоком).

Проведены обработка и анализ результатов полевых геофизических исследований по 16 профилям с длиной профиля от 3 до 4 км. Среднее расстояние между точками зондирования составило 50 м. Для определения мощности влагонасыщенных рыхлых отложений *h* использовали методику, изложенную в п. 2.2.

Основные результаты обработки сводятся к следующему:

– статистическая зависимость мощности слоя рыхлых отложений *h* от величины эффективного УЭС в точке электрозондирования;

– расположение границ обводненных зон на плане участка.

При составлении графиков электропрофилирования $\rho_k(x)$ и геологических разрезов по соответствующим профилям установлены следующие закономерности (для иллюстрации на рис.3.13 приведены результаты по профилю ПРЗ): – на участках профилей, прилегающих к саям, наблюдаются локальные отрицательные аномалии ρ_k до 20 – 50 Ом·м (более 0,2 от средних значений), связанные с обводнением грунтов (рис. 3.14);

– между аномальными участками изменение ρ_k качественно совпадает с изменением мощности слоя *h* рыхлых отложений;



(геофизическая группа государственной службы Республики Узбекистан по слежению за опасными геологическими процессами)







Рис. 3.14 – Гистограмма распределения отрицательной аномалии $\Delta \rho_k$

Для получения количественных зависимостей между физическими величинами проведен корреляционный анализ данных для 42 сечений приведенного профиля вне зон обводнения грунтов.

В ходе корреляционного анализа составлены уравнения видов регрессии: линейной, степенной, экспоненциальной, полиномиальной.

Для каждого вида вычислялась мера зависимости мощности слоя h рыхлых четвертичных отложений от УЭС ρ_k в точке зондирования: для линейной зависимости – коэффициент корреляции, для остальных – корреляционное отношение. В качестве критериев надежности полученных уравнений использован: F – критерий Фишера. Результаты анализа представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

	Коэффициент корреляции г	Критерий над	цежности
Уравнение	$(V_{\text{opposituation}}, \sigma_{\text{opposituation}}, P)$	оценки Ф	ишера
	(Корреляционное отношение К)	$F_{\rm pac4}$	$F_{ m \kappa put}$
$h = 0,39\rho_k + 40,95$	r = 0,76	54	4,1
$h = 10,78 \rho_k^{-0,44}$	R = 0,77	57	4,1
$h = 44,90e^{0,01\rho}_{k}$	R = 0,74	46	4,1
$h = -0,003\rho_k^2 + 0,912 \ \rho_k + 22,004$	R = 0,78	58	4,1

Корреляционные зависимости между параметрами геоэлектрического и геологического разрезов (*h* – в м, ρ_k – в Ом·м)

Таким образом, для детализации изменений величины h на межскважинных интервалах вне обводненных зон целесообразно использовать полиномиальную зависимость.

По расположению границ отрицательных аномалий на графиках $\rho_k(x)$ по всем профилям (ПР1 – ПР16) установлены границы обводненных зон на плане опытного участка (см. рис.3.12).

В результате обобщения баз данных инженерно-геологических и геофизических изысканий в соответствии с алгоритмом, разработанным в п. 2.4, создана объемная геолого-геофизическая модель борта разреза в районе оползня «Центральный» (рис. 3.15).

Для оползня характерно цикличное развитие деформационного процесса: параллельно верхней бровке откоса многократно формируются вертикальные трещины отрыва, происходит оседание и горизонтальное смещение отколовшихся блоков. Поверхность блоков мало нарушена. Эти особенности деформирования указывают на оползание пород по слабому контакту, расположенному в основании. Анализом результатов маркшейдерских инструментальных и визуальных наблюдений поверхность скольжения приурочили к глинам и пескам сузакского яруса палеогена.



Рис. 3.15 – Схема объемной геолого-геофизической модели оползня «Центральный»: 1 – трещина отрыва; 2 – граница оползня; 3 – репер наблюдательной станции; 4 – русла саев; 5 – границы влагонасыщенных зон

Основной причиной интенсивных геомеханических процессов оползней «Центральный» и «Северный» является инфильтрация поверхностных и подрусловых вод через разрывные нарушения, за счет чего образуется естественная поверхность ослабления на «подрезанном» участке за счет механической суффозии песков и снижения показателей сопротивления сдвигу переувлажненных глин сузакского яруса палеогена. В результате формируется контактный оползень по

поверхности скольжения, представленной в верхней части – сместителем разрывного нарушения, в нижней – породами глинисто-песчаного состава.

Для установленной анализом инструментальных наблюдений поверхности скольжения оползня методом обратных расчетов по геологическим разрезам 1-1, 2-2 и 3-3 (см. рис.3.15) определены показатели сопротивления сдвигу для зон влагонасыщения и естественной влажности (табл. 3.6).

Таблица 3 6

Показатели сопротивления сдвигу по поверхное	сти скольж	кения опол	тзня «Центр	альный» ¹
Литологическая разность (толща)	ф _е , град	φ _в , град	$C_{\rm e}$, к $H/{ m m}^2$	<i>C</i> _в , кН/м ²
Четвертичные отложения Q	32	30	35,3	17,7
Неогеновые отложения N_{1-2}	-/14 ²	-/12	-/0,0	-/0,0
Туркестанский P_2^3 и Алайский P_2^2 ярусы Палеогена	34/24	32/18	0,0/0,0	0,0/0,0
Опоковидные глины Сузакского яруса Палеогена P_2^1	7/6,5	6/5,5	2,9/2,9	2,5/2,5
Меловые отложения K_2	17/7	-/6	0,0/0,0	-/0,0
Джигиристанская свита Юрских отложений J_3^{dg}	7,5/7	6,5/6	3,9/3,9	2,9/2,9

Примечание: 1 – в таблице приняты сокращения ϕ_e , ϕ_B , C_e , C_B для обозначения углов внутреннего трения и сцепления в состояниях естественной влажности и влагонасыщенном; 2 – в числителе представлены значения по поверхности скольжения, проходящей в толще ненарушенной структуры, в знаменателе – совпадающей со сместителями разрывных нарушений в толщах.

Результатами обратных расчетов установлено следующее.

1. Значения сцепления C по поверхности скольжения для известняков, мергелей и песчаников равны нулю. Для остальных литотипов глинистого состава значения C изменяются от 2,5-2,9 до 17,7 кН/м² в зоне влагонасыщения и от 2,9-3,9 до 35,3 кН/м² в зоне естественной влажности. Для глинистых пород это объясняется их способностью после обрушения сохранять остаточное сцепление вследствие частичного восстановления нарушенных структурных связей. В остальных случаях поверхность скольжения является разрывной структурой, сдвигающие силы по которой уравновешиваются только силами трения.

2. Значения углов внутреннего трения φ в призме упора оползня изменяются от 5,5 до 6,5° в зоне влагонасыщения и от 6,5 до 7,5° в зоне естественной влажности.

Для предотвращения развития геомеханических процессов до конца 2025 года предусмотрено завершить первый этап разгрузки головной части оползня «Центральный». Используя показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения оползня, выполнен прогноз устойчивости контура оползня на конец

2018 и 2025 годов методом многоугольника сил. На рис.3.16 показана расчетная схема для прогноза устойчивости по геологическому разрезу 1-1. Результаты прогноза по геологическим разрезам представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Результаты прогноза устойчивости борта в районе оползня «Центральный» на различные периоды времени

Геологический разрез	Ze. M	Z_{μ} , M	<i>h</i> . м	α, град	n
Положение на конец 20	18 года	511)	- 7	T T	
1-1	1076,0	897,2	178,8	11	1,00
2-2	1103,8	884,1	219,7	10	1,00
3-3	1095,6	878,6	217,0	10	1,04
Положение на конец 20	25 года				·
1-1	1040,0	897,2	142,8	9	1,06
2-2	1070,0	884,1	185,9	9	1,08
3-3	1070,0	878,6	191,4	9	1,09

В таблице приняты сокращения: z_{θ}/z_{μ} – отметки верхней и нижней бровок; h – высота борта; α – результирующий угол борта; n – коэффициент запаса устойчивости.



Рис. 3.16 – Расчетная схема прогноза устойчивости борта в районе оползня «Центральный» по геологическому разрезу 1-1 после завершения первого этапа разгрузки головной части: 1 – репер наблюдательной станции; 2 – отрабатываемая часть оползня; 3 – поверхность скольжения оползня.

Получены следующие результаты прогноза устойчивости:

 Состояние равновесия оползня на конец 2018 года оценивается как предельное, т.к. значения коэффициентов запаса устойчивости по геологическим разрезам 1-1, 2-2 и 3-3 равны 1,00, 1,00, 1,04 соответственно.

– После выполнения первого этапа мероприятий по разгрузке головной части оползня к концу 2025 года значения коэффициентов запаса устойчивости по геологическим разрезам 1-1, 2-2 и 3-3 увеличатся до 1,06, 1,08 и 1,09 соответственно.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [99-102].

3.3 Прогноз устойчивости откосов бортов разрезов в зонах влияния подземных горных работ

Влияние процессов подработки исследовано в условиях разреза «Кедровский». Исследуемый прибортовой массив расположен в пределах профильных линий 400-510 с высотными отметками от + 120 до +195 м (рис. 3.17).



Рис. 3.17 - Объемная геолого-геофизическая модель исследуемого участка

На рассматриваемом участке в верхней части геологического разреза залегают преимущественно песчаники, подстилаемые алевролитами, которые являются вмещающими для угольного пласта Владимировский. Отметки кровли пласта Владимировский изменяются от +140 м до +67 м, мощность пласта составляет 3-4 м. Также на рассматриваемом участке выявлен пласт Викторовский. Он характеризуется малой мощностью (0,4-0,6 м) и частым выклиниванием. В пределах разведочных линий XVIII (профиль 410) и XX (профиль 530) обнаружены разрывные нарушения I и II. Физико-механические свойства вмещающих горных пород, угля и естественных поверхностей ослабления с учетом структурного ослабления после подработки подземными горными работами представлены в табл. 3.8.

Гидрогеологические исследования на месторождении показали, что степень обводненности коренных пород хаотично неравномерна, как в плане, так и в разрезе и зависит от тектонической нарушенности отложений, литологического состава и степени их трещиноватости, а также от геоморфологического их положения. Подземные воды относятся к типу весеннего и осеннего питания с явным преобладанием первого. Подъем уровней наблюдается в период интенсивного та-

яния снега с апреля по июнь. Форма пьезометрической поверхности подземных вод в ненарушенных условиях в общих чертах повторяла гипсометрическую поверхность рельефа, но в настоящее время в результате работы разреза здесь образовалась воронка депрессии.

Таблица 3.8

(по данным А	ю ук «кузоассраз	резуголь»)	
Литологическая разность (толща)	ρ, кН/м³	<i>С</i> , кПа	ф, град
Четвертичные отложения	20,1	54,0	16
Выветрелые коренные породы	22,8	153,0	33
Невыветрелые коренные породы	24,6	274,7	33
Зона тектонически нарушений	20,9	47,1	15
Уголь	13,2	107,9	28
Намывные породы	19,1	24,5	12
Породы сухих отвалов	18,1	14,7	32
Зона обрушений	19,6	0,0	31
Зона трещин	20,6	15,3	32
Естественные поверхности ослабления в ви	де контактов:		
Песчаников с алевролитом	_	35,3	20
Четвертичных и коренных пород	_	20,6	14
Угля с вмещающими породами	—	25,5	14

Физико-механические свойства горных пород и естественных поверхностей ослабления (по данным АО УК «Кузбассразрезуголь»)

В таблице приняты сокращения: ρ – объемный вес; С – сцепление; φ – угол внутреннего трения.

Результаты замеров фактических уровней воды в гидронаблюдательных скважинах представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Результаты замеров фактических уровней воды в гидронаблюдательных скважинах (по данным АО УК «Кузбассразрезуголь»)

<i>Z</i> , м	<i>Н</i> _{скв} , м	Н _в , м	Z _B , M	Дата замера
	•	Скважина 26	03	
		56,5	129,5	03.2017
186,0	80	74,2	111,8	04-05.2017
		вода отсутв.	вода отсутв.	06.2017
		Скважина 26	04	
		10,7	154,3	04.2017
165,0	65	30,0	135,0	05.2017
		вода отсутв.	вода отсутв.	06.2017
		Скважина 26	05	
		53,4	141,6	04.2017
195,0	74	68,7	126,3	05.2017
		вода отсутв.	вода отсутв.	06.2017
		Скважина 26	06	
121,1	67	19,5	101,6	04.2017

В таблице приняты сокращения: Z – абсолютная отметка устья скважины; H_{ckb} – глубина скважины; H_{B} – глубина до уровня воды; Z_{B} – абсолютная отметка уровня воды.

Для детализации строения прибортового массива на межскважинных интервалах выполнены геофизические исследования методом электротомографии с использованием аппаратуры «СКАЛА-64» по трем профильным линиям общей длиной 1345 м (рис. 3.18).



Рис. 3.18 – Геоэлектрические разрезы по профилям (НФ «КУЗБАСС-НИИОГР»): 1 - a; 2 - 6; 3 - в

По аномалиям удельного электросопротивления установлено расположение разуплотненных и водонасыщенных зон.

Методом предельного равновесия выполнена геомеханическая оценка прибортового массива по коэффициенту запаса устойчивости для геологических разрезов XIXa, XIX-1, XIX, XVIIIв, XVIIIa, XVIII. Результаты представлены в табл. 3.10 и на рис. 3.19.

Таблица 3.10

Геологический разрез	<i>Z</i> _B , M	<i>Z</i> _н , М	<i>h</i> , м	α, град	k_1	k_2	n_1	n_2
XIXa	163,2	84,0	79,2	35	0,4	0,0	1,90	2,39
XIX-1	206,5	88,5	118,0	25	0,5	0,1	1,59	1,88
XIX	209,2	100,1	109,1	25	0,0	0,0	1,46	1,46
XVIIIb	220,0	85,4	134,6	21	0,5	0,1	1,08	1,25
XVIIIa	195,8	89,0	106,8	22	0,1	0,0	1,06	1,10
XVIII	196,1	110,0	86,1	25	0,2	0,1	1,50	1,52

Результаты геомеханической оценки прибортового массива

В таблице приняты сокращения: $z_{\rm B}/z_{\rm H}$ – отметки верхней и нижней бровок; h – высота прибортового массива; α – результирующий угол; k_1/k_2 – коэффициенты обводнения при максимальном и минимальном уровнях подземных вод; n_1/n_2 – коэффициенты запаса устойчивости при обводнении k_1/k_2 соответственно



Рис. 3.19 – Геологические разрезы XIX – а, XVIIIв – б, XVIIIа – в: 1 – породы отвала «сухой вскрыши»; 2 – намывные отложения; 3 – зона трещин; 4 – зона обрушений; 5 – разрывное нарушение; 6 – наиболее напряженная поверхность скольжения; 7 – уровень подземных вод

По результатам геомеханической оценки прибортового массива установлено, что прибортовой массив на разведочных линиях XIXa, XIX-1, XIX, XVIII находится в устойчивом состоянии, на разведочных линиях XVIIIв и XVIIIа – в деформируемом. В следствие пространственно-временных изменений свойств и состояния горных пород, а также различия положений и направлений расчетных сечений в пределах расчетной зоны диапазон изменения значений коэффициента запаса устойчивости *n* составил 1,06-2,39.

Таким образом, сочетание природных и техногенных факторов, включающих гидрогеологические условия территории, сезонный климатический режим, тектоническую нарушенность месторождения и накладываемые на нее зоны

93

сдвижения, связанные с подработкой, приводят к формированию весьма сложной анизотропной геологической структуры прибортового массива, включающей локальные разуплотненные и водонасыщенные зоны, что существенно снижает устойчивость борта.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [103, 104].

Выводы

Исследовано изменение устойчивости откосных сооружений естественного сложения при воздействии техногенного, естественного водонасыщения и подработки подземными выработками.

1. В результате неблагоприятной геологической структуры прибортового массива и увеличения нагрузки от организованного отвала вскрышных пород на намывной массив гидроотвала «Сагарлыкский» западный борт Бачатского угольного разреза оказался в зоне техногенного водонасыщения, что привело к интенсивным оползням песчано-глинистых отложений, способствовавших нарушениям технологического режима, аварийному стоянию автодороги и ЛЭП.

Обработка данных многолетнего мониторинга, проведенного КузГТУ, методами электрических зондирований и профилирований по продольным и поперечным профилям позволила диагностировать расположение скрытого фильтрационного коллектора по глубине и в плане, а также с использованием разработанного в п.2.2 метода обработки электрофизических данных дать прогноз изменений мощности слоя четвертичных отложений. Эти данные в совокупности с результатами геологических изысканий и обратных расчетов по участкам произошедших оползней позволили построить объемную геолого-геофизическую модель прибортового массива и произвести расчет коэффициента запаса устойчивости по наиболее опасным сечениям, диапазон которого на наиболее оползнеопасном участке составил n = 1,06-1,38.

2. Одним из наиболее оползнеопасных угольных разрезов в мире считается «Ангренский» (Республика Узбекистан). Сочетание интенсивного выхода подземных вод на поверхность откосов, большое количество участков обводнения с высокой размокаемостью пород, развитие зон выветривания и трещиноватости привело к формированию ряда оползней с объемом до 800 млн. м³, площадью в плане до 1,06 км². Несмотря на то, что службами разреза ведется постоянный инструментальный контроль горизонтальных и вертикальных смещений, организована сеть водопонижающих скважин, средний объем оползней составляет 60 млн. м³/год.

Для разработки рекомендаций по устранению последствий оползня «Центральный» произведена обработка базы данных полевых исследований, проведенных геофизическими службами Республики Узбекистан, при этом были использованы разработанные в п.2.1 и 2.2 методы обработки данных круговых сейсмических зондирований и электропрофилирований. Анализ изменения коэффициента сейсмической анизотропии в плане и во времени показал, что критерием опасности развития оползня является $K_a > 1,6$. По отрицательным аномалиям на графиках электропрофилирования, составляющих более 0,2 от средних значений, диагностированы контуры в плане фильтрационных коллекторов (древних русел «саев»), а корреляционный анализ связи мощности *h* водонасыщенных рыхлых отложений с величиной эффективного электросопротивления ρ_k позволил получить ряд надежных зависимостей для экспресс-прогноза изменения величины *h* при больших площадях обследования.

Базы данных геолого-геофизических изысканий, дополненные результатами обратных расчетов прочностных параметров пород, слагающих борт, позволили сформировать объемную модель, установить наиболее опасные геологические разрезы и дать прогноз устойчивости борта. С учетом рекомендаций по снижению результирующего угла борта с 10-11° до 9°, обеспечивающего разгрузку головной части оползня, коэффициент запаса устойчивости борта будет повышен с n = 1,0-1,04 до n = 1,06-1,09.

3. Состояние северного борта разреза «Кедровский» осложнено процессами, связанными с выемкой пласта «Владимировский» подземным способом. позволили Геологические изыскания определить необходимые физикомеханические свойства горных пород и естественных поверхностей ослабления. Гидрогеологические исследования показали неравномерность обводнения коренных пород в пространстве и во времени. Для детализации строения прибортового массива на межскважинных интервалах НФ «КУЗБАСС-НИИОГР» проведены исследования методом электротомографии по трем профильным линиям. На томограммах высокоомные участки соответствуют расположению разуплотненных зон обрушений и трещиноватости, а низкоомные – водонасыщенным зонам. На основе объемной геолого-геофизической модели проведен прогноз устойчивости борта по основным геологическим разрезам, причем учитывались коэффициенты обводнения при максимальном и минимальном уровнях подземных вод. Диапазон

изменения коэффициента запаса устойчивости составил n = 1,06-2,39, а наиболее оползнеопасным является сечение по разведочной линии XVIIIа.

4. Устойчивость откосных сооружений естественного сложения определяется сочетанием природных и техногенных факторов, включающих гидрогеологические условия территории, сезонный климатический режим, тектоническую нарушенность месторождения и накладываемые на нее зоны сдвижения, связанные с подработкой, что приводит к формированию весьма сложной геологической структуры прибортового массива, включающей локальные разуплотненные и влагонасыщенные зоны. Поэтому объективный прогноз устойчивости борта в подобных условиях кроме анализа данных геологических изысканий и гидрогеологических наблюдений должен включать геофизический мониторинг формирования и развития аномальных зон, создание на этой основе объемной модели и автоматизированный расчет коэффициента запаса устойчивости с циклическим выбором наиболее опасного сечения.

ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТЕХНОГЕННОГО СЛОЖЕНИЯ

Изменение устойчивости откосных сооружений техногенного сложения исследовалось в следующих горно-технических условиях:

– деформированный техногенный массив из вскрышных пород, сформированный в результате оползня дамбы гидроотвала;

отработка намывного массива гидроотвала;

– техногенный массив из вскрышных пород на намывном основании.

4.1 Прогноз устойчивости откосов деформированного техногенного массива, прилегающего к гидроотвалу

Исследования проводились в условиях разреза «Краснобродский». Гидроотвал «Бахтыхтинский» является сооружением овражно-балочного типа с односторонним обвалованием с высотой в тальвеге лога до 38 м и площадью 98 га.

Намыв гидроотвала осуществлялся в период с 1958 по 1962 гг. со стороны дамб обвалования. С 1973 г. гидроотвал служит основанием отвала сухой вскрыши, формирование которого ведется с применением технологической схемы автомобильно-бульдозерного отвалообразования.

В 2005 г. при интенсивном развитии отвала в районе профильных линий 18-22 произошло деформирование техногенного массива в сторону горных выработок. После завершения оползневых процессов максимальные отметки отвала превышали значение +380 м.

Инженерно-геологические изыскания выполнены межотраслевым научным центром ВНИМИ с 1979 по 2006 гг. (табл. 4.1).

1 au 11411a 4 1

			1 / 1			/		
Слой	Описание	Δh , м	ρ, τ/м ³	W, %	ф, град	<i>С</i> , МПа		
1	2	3	4	5	6	7		
Инженерно-геологические изыскания 1979 года								
т	Породы «сухой»	0.0.10.5	1,80	-	30	0,01		
1	вскрыши	0,0-10,5						
	Суглинок мягкопла-		1,90		18-20	0,01-0,025		
II, III	стичный с	10,5-26,3		27,8				
	прослоями супеси							
Инжен	Инженерно-геологические изыскания 1989 года							
Ι	Породы «сухой»	0.0.18.0	1,80	-	30	-		
	вскрыши	0,0-10,0						
II, III	Намывной суглинок		1,95-1,96	25,0-26,5	20-25	0,01-0,04		
	тугопластичный с	18,0-26,0						
	прослоями супеси							

Физико-механические свойства пород техногенного массива (АО «ВНИМИ»)

1	2	3	4	5	6	7			
Инжен	Инженерно-геологические изыскания 2006 года								
Ι	Породы «сухой»	0,0-18,0	1,80	-	30	0,01			
	вскрыши								
II	Намывная супесь с	18.0-26.0	1.95-2.13	7.5-10.6	17-24	0.02-0.05			
	прослоями суглинка	10,0 20,0	1,50 =,10	,,0 10,0	1, 2.	0,02 0,00			
III	Намывной суглинок	26.0.30.5	2.06.2.16	126-212	6-10	0.03-0.05			
	с прослоями супеси	20,0-30,3	2,00-2,10	12,0-21,2	0-10	0,03-0,03			
IV	Суглинок основания	30.0.38.0	2,05-2,12	18,7-24,0	6-8	0,07-0,12			
	аллювиальный	50,0-58,0							

В таблице приняты сокращения: *Δh* – интервалы глубин; ρ – плотность; *W* – влажность; φ – угол внутреннего трения; *C* – сцепление.

Анализ полученных данных показывает, что на момент актуальных изысканий намывные породы уплотнены, имеют высокие показатели плотности (1,95-2,16 т/м³) и низкие значения влажности (7,5-21,2 %), консистенция пород мягкопластичная и тугопластичная. Отмечается тенденция увеличения сцепления намывных пород за период наблюдений. Результаты ВЭЗ представлены на рис. 4.1.



Рис. 4.1 – Результаты ВЭЗ №1 (а), №2 (б) и их качественной интерпретации (КузГТУ): 1 – насыпной грунт (породы сухой вскрыши); 2 – намывные грунты гидроотвала; 3 – аллювиальный суглинок основания отвала

Результаты комплексного качественного анализа и количественной интерпретации геолого-геофизической информации с использованием методики, изложенной в п.2.2, следующие:

Продолжение таблицы 4.1

– глубина зондирований составила $h \approx 0,15AB$ (где AB – разнос питающих электродов установки);

– геоэлектрическая структура массива в районе основной части соответствует двухслойному разрезу; слой влагонасыщенных намывных грунтов расположен на интервале AB = 90-240 м ($h_1 = 13-36$ м), что характеризуется снижением уровня эффективного УЭС ρ_{κ} с 75-80 до 60-65 Ом·м (ВЭЗ №1) до 40-50 Ом·м (ВЭЗ №2); слой намывных влагонасыщенных грунтов неоднороден, возможно чередование прослоев с различной степенью влажности;

– ниже намывного слоя (AB > 220 м, $h_1 > 33$ м) расположен подстилающий слой плотных коренных пород (песчаник), что характеризуется повышением уровня эффективного УЭС ρ_{κ} до 140-150 Ом·м.

Результаты интерпретации электропрофилирования представлены на рис. 4.2 (расположение геофизических профилей представлено на рис.4.4а).



Рис. 4.2 – Результаты ЭП по профилям O_1x_1 (а) и O_2x_2 (б), прогнозируемое изменение глубины h_1 залегания верхней границы влагонасыщенного слоя (КузГТУ): AB – границы влагонасыщенной зоны

Анализ полученных данных показал следующее:

– по профилю $O_1 x_1$ величина h_1 изменяется в диапазоне от 24 до 37 м при среднем значении $h_1 = 31$ м, закономерных изменений h_1 в пределах профиля не установлено;

– по профилю O_2x_2 величина h_1 изменяется в диапазоне от 12 до 24 м, причем при приближении к границам исследуемого участка h_1 имеет минимальные значения, т.е. намывной слой вдавлен в средней части массива насыпными породами, а его верхняя граница изогнута в соответствии с рельефом подстилающих коренных пород естественного лога.

Результаты гидрогеомеханического мониторинга получены на основе данных наблюдательной сети, состоящей из 6 датчиков порового давления, установленных в 3 скважины: 180 (скв. №1); 556, 212, 43 (скв. №2); 701, 324 (скв. №3). Проведенные измерения свидетельствуют о наличии избыточного порового давления в намывных породах района скважины №2 и его отсутствии в верхней части скважины №1 и всей толщи скважины №3. В глинистых грунтах естественного основания избыточное поровое давление отмечалось по всем точкам измерений, при этом максимальные его значения зарегистрированы по датчику, установленному в скважине №3, а минимальные – по датчику скважины №1.

Для построения депрессионной кривой в теле гидроотвала выполнен пересчет значений порового давления в метры водяного столба. График изменения порового давления *P* с течением времени *t* представлен на рис.4.3.



На основании построенной объемной геолого-геофизической модели выполнен прогноз устойчивости техногенного массива по профильным линиям 18 – 22. Результаты представлены на рис. 4.4 и в табл. 4.2.



Рис. 4.4 – Объемная геолого-геофизическая модель техногенного массива (а) и профильные линии 18 (б), 20 (в), 22 (г): 1 – геологическая скважина; 2 – профиль ВЭЗ и ЭП; 3 – границы влагонасыщенной зоны; 4 – профильные линии; 5 – номер датчика порового давления; 6 – депрессионная кривая; 7 – геологический слой; 8 – наиболее напряженная поверхность скольжения

1	02
T	02

Таблица 4.2

Профиль	<i>Z</i> ₆ , M	Z_{H}, M	<i>h</i> , м	α, град	$h_1,{ m M}$	<i>Р</i> , МПа	п
18	373,5	339,2	34,3	28	0	0,513-0,566	1,32
19	357,2	335,1	22,1	21	7-11	0,513-0,566	1,19
20	382,1	305,2	76,9	19	8-12	0,513-0,566	1,10
21	378,0	338,0	40,0	27	2-9	0,513-0,566	1,26
22	370,5	342,0	28,5	30	0	0,513-0,566	1,46

Результаты прогноза устойчивости техногенного массива

В таблице приняты сокращения: z_{θ}/z_{h} – отметки верхней и нижней бровок; h – высота отвала; α – результирующий угол откоса отвала; h_{1} – диапазон мощностей влагонасыщенной зоны; P – диапазоны значений порового давления по скважинам №1, 2, 3; n – коэффициент запаса устойчивости.

По результатам прогноза устойчивости техногенного массива установлено следующее:

величина коэффициента запаса устойчивости *п* изменяется в диапа зоне от 1,10 до 1,46 при нормативном значении 1,20;

– наиболее опасным сечением является профиль 20, приуроченный к центральной части влагонасыщенной зоны.

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [105, 106].

4.2 Прогноз устойчивости откосов техногенных массивов при отработке намывных пород

Исследования проводились на разрезе «Кедровский». Гидроотвал №3 расположен в северо-восточной части Кедровского угольного разреза. В результате расконсервации запасов под гидроотвалом принято решение о его частичном смыве, причем для ограждения зоны гидромеханизации возведена трехъярусная насыпь (разделительная перемычка) общей высотой до 60 м (рис. 4.5).



Рис. 4.5 – Схема гидровскрышного забоя и разделительной перемычки (АО «УК «Кузбассразрезуголь»): 1 – направление перемещения забоев гидровскрышных работ; 2 – инженерно-геологическая скважина; 3 – геофизический профиль

Инженерно-геологические изыскания включали в себя бурение 16 скважин, проходку нескольких закопушек и измерения в пяти точках методом статического зондирования. Результаты изучения физико-механических свойств отвальных пород и естественно залегающих грунтов четвертичных отложений представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

(no (() no (() sourcepuspesynomial))							
Породы (контакты слоев)	γ, кН/м³	С, кПа	ф, град				
Отвальная смесь	18,1	14,7	32				
Намывные грунты в забое	18.4	18	8				
гидромеханизации	10,7	10					
Естественно залегающие четвертичные	10.1	26	14				
отложения	1),1	20	17				

Физико-механические свойства природных и техногенных пород (AO «УК «Кузбассразрезуголь»)

В таблице приняты сокращения: φ – угол внутреннего трения; *С* – сцепление; γ – объемный вес

Прогноз пространственной изменчивости механических свойств намывного массива гидроотвала вблизи ограждающей перемычки произведен методом электротомографических измерений с использованием аппаратуры СКАЛА-48. Влияние порового давления в намывных глинистых грунтах, обусловленного гравитационным уплотнением породами сухой вскрыши, исследовано на основании данных наблюдений по 14 пьезометрическим датчикам ПДС струнного типа.

Пространственная изменчивость значений углов внутреннего трения φ и сцепления *C* намывных грунтов по профилям x_1 и x_2 установлена по результатам электротомографических измерений с использованием ранее установленной зависимости физических свойств от удельного электрического сопротивления [107]. Графики зависимости механических свойств намывных грунтов от координат профилей представлены на рис. 4.6, результаты замеров по датчикам порового давления в намывных отложениях – в табл. 4.4.

Из анализа результатов гидрогеологических наблюдений следует отметить наличие избыточного порового давления во всем намывном массиве под разделительной перемычкой.

На основе полученных баз экспериментальных данных построены объемные геолого-геофизические модели, представленные в графической форме на рис. 4.7а и 4.8, а также выполнен прогноз устойчивости откосов разделительной перемычки (рис. 4.8). Результаты расчетов приведены в табл. 4.5.



Рис. 4.6 – Графики зависимости прочностных свойств намывных грунтов от координат профилей x₁ (a) и x₂ (б) (КузГТУ)

Таблица 4.4

Номер скважины	Номер датчика	Поровое давление Р, кПа
	1312	694,5
1–12	1041	989,9
	1054	299,1
2 12	1049	249,3
2-12	1043	1133,4
2.07	257	230,8
2-07	201	129,7
2-08	353	47,7
	528	0,0
1–07	544	111,9
	506	254,8
6–11	334	84,5
2.04	859	70,6
2-04	503	165,9

Результаты замеров по датчикам порового давления (АО «УК «Кузбассразрезуголь»)



б





1 – поверхность намывного массива; 2 – естественный рельеф; 3 – наиболее напряженная поверхность скольжения



Рис. 4.8 – Объемная геолого-геофизическая модель разделительной перемычки: 1 – расчетный профиль; 2 – продольный геофизический профиль; 3 – поверхность намывных пород; 4 – инженерно-геологическая скважина, оборудованная датчиком порового давления



Рис. 4.9 – Пример расчета по сечению 3: 1 – поверхность разделительной перемычки; 2 – поверхность намывных пород; 3 – естественный рельеф; 4 – показание датчика порового давления, кПа; 5 – наиболее напряженная поверхность скольжения

Результаты прогноза устойчивости показали, что устойчивость откоса гидровскрышного забоя в наибольшей степени определяется абсолютными величинами набранных прочностных показателей на отрабатываемом участке и неблагоприятным сочетанием формы уступа с высотой заходки.

Сечение	Z _B , M	<i>Z</i> н, М	<i>h</i> , м	С, кПа	ф, град	α, град	Р, кПа	п	
	Гидровскрышной забой								
1	213,8	201,2	12,6			25	-	1,04	
2	213,4	204,8	8,6			20	-	1,37	
3	211,6	209,0	2,6			8	-	3,72	
4	206,9	201,8	5,1			8	-	3,76	
5	208,0	203,8	4,2	18	8	34	-	1,56	
6	212,5	198,2	14,3			22	-	1,03	
7	212,6	208,6	4,0			29	-	1,93	
8	211,9	205,4	6,5			14	-	1,64	
9	212,8	201,5	11,3			21	-	1,03	
			Разде	лительная пе	ремычка				
1	271,0	231,3	39,7	23-48	5-7	8	0-1133,4	1,40	
2	272,9	230,5	42,4	20,5-75,5	5-9	7	0-1133,4	1,59	
3	270,7	229,7	41,0	9-81	3-9	7	0-1133,4	1,29	
4	268,2	226,5	41,7	43-63	7-9	9	0-1133,4	1,42	
5	247,7	223,0	24,7	43-63	7-8	10	0-1133,4	1,38	

В таблице приняты сокращения: z_{g}/z_{h} – отметки верхней и нижней бровок; h – высота прибортового массива; α – результирующий угол; u – значение порового давления; n – коэффициент запаса устойчивости.

Установленный диапазон коэффициента запаса устойчивости составил 1,03–3,76. Устойчивость разделительных перемычек из сухих пород на намывном основании в наибольшей степени зависит от глубины расположения и мощности слабого намывного слоя и абсолютной величины избыточного порового давления в этом слое. Установленный диапазон изменения коэффициента запаса устойчивости для данного участка массива значительно уже, чем для гидровскрышного забоя, и составил n = 1,29-1,59.

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [108].

4.3 Оценка повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений

Количественная оценка повышения точности прогноза устойчивости выполнена с использованием геолого-геофизических моделей откосных сооружений. Для каждой модели по ряду расчетных сечений методом предельного равновесия, являющимся одним из наиболее распространенных в инженерной практике, вычислены коэффициенты запаса устойчивости *n*. По результатам расчетов в первом приближении определены границы участков минимальных значений *n*. Путем последовательных приближений в пределах полученных участков уменьшался ли-

n

нейный шаг Δx построения расчетных сечений (рис.4.10). Для каждой итерации (шага) вычислена величина повышения точности прогноза (определения координаты положения наиболее опасного расчетного сечения) по формуле

$$\delta = \left(\frac{n_i^{\text{cp}}}{n_i^{\text{MUH}}} - 1\right) \cdot 100\%, \qquad (4.1)$$

где $n_i^{\text{ср}}$, $n_i^{\text{мин}}$ – среднее и минимальное значения коэффициентов запаса устойчивости в *i*-том приближении.



Рис. 4.10 – Алгоритм оценки повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей

Аналогично может быть дана оценка повышения точности геомеханического прогноза за счет поворота расчетного сечения с заданным угловым шагом при сложной геометрии уступа в плане. В связи с относительной прямолинейностью исследуемых участков откосных сооружений оценка влияния углового шага по-
строений расчетных сечений на точность прогноза устойчивости в данной работе не производилась.

В качестве примеров использования методики рассмотрены откосные сооружения Бачатского (п.3.1) и Кедровского (разделительная перемычка, п.4.2) угольных разрезов.

Для Бачатского угольного разреза в первом приближении геомеханической оценки величина линейного шага построения расчетных сечений Δx определена произвольно и равна половине расстояния между поперечными геофизическими профилями (250 м). За начало системы координат продольного профиля принята точка O_1 (см. рис.3.5а). По результатам выполненных расчетов установлена зависимость коэффициента запаса устойчивости *n* от продольной координаты *x* (рис. 4.11а). Полученный график имеет одну точку минимума с коэффициентом запаса устойчивости *n* = 1,051 (x = 0 м). Для дальнейшего анализа выбраны границы участка поиска наиболее опасного сечения, соответствующие диапазону продольной координаты $x \in [-50 \text{ м}; +50 \text{ м}]$. Величины линейных шагов Δx построения расчетных сечений составили: 50, 25, 12, 6, 3 м. Графики зависимости коэффициентов запаса устойчивости от продольной координаты x представлены на рис. 4.116.



Рис. 4.11 – Графики зависимости коэффициентов запаса устойчивости *n* от координаты продольного профиля *x* при величине линейного шага $\Delta x = 250$ м (а) и его уменьшении (б): $1 - \Delta x = 50$ м; $2 - \Delta x = 25$ м; $3 - \Delta x = 12$ м; $4 - \Delta x = 6$ м; $5 - \Delta x = 3$ м

По результатам анализа графиков (рис.4.11) и данных табл. 4.6 установлено следующее:

– при уменьшении шага построения расчетных сечений Δx практически в каждой итерации наблюдается снижение величины коэффициента запаса устойчивости *n* от 1,051 ($\Delta x = 250$ м) до 1,003 ($\Delta x = 3$ м), таким образом точность геомеханического прогноза увеличивается;

– продольная координата *x* точки минимума графика функции изменяется от -50 ($\Delta x = 50$ м) до +34 м ($\Delta x = 3$ м), при этом с каждой итерацией отклонение координаты *x* от предыдущего значения снижается.

Таблица 4.6

Результаты анализа влияния линейного шага Δ*x* поиска наиболее опасного сечения на минимальное значение коэффициента запаса устойчивости *n_{min}* в условиях Бачатского угольного разреза

Линейный шаг Δx ,	Минимальное значение	Продольная координата
М	коэффициента запаса устойчивости n _{min}	профиля <i>x</i> , м
250	1,051	0
50	1,049	-50
25	1,024	+25
12	1,010	+37
6	1,010	+37
3	1,003	+34

Для разделительной перемычки (Кедровский угольный разрез) в первом приближении геомеханической оценки величина линейного шага построения расчетных сечений Δx составила 100 м. За начало системы координат продольного профиля принято устье скважины 2-02 (см. рис.4.8). По результатам выполненных расчетов установлена зависимость коэффициента запаса устойчивости *n* от продольной координаты *x* (рис. 4.12а). Полученный график имеет одну точку минимума с коэффициентом запаса устойчивости *n* = 1,343 (*x* = 200 м). Для дальнейшего анализа выбраны границы участка поиска наиболее опасного сечения, соответствующие диапазону продольной координаты *x* є [+125 м; +225 м]. Величины линейных шагов Δx построения расчетных сечений составили: 50, 25, 12, 6, 3 м. Графики зависимости коэффициентов запаса устойчивости от продольной координаты *x* представлены на рис. 4.126.

Результаты исследований, представленные на рис. 4.12 и в табл. 4.7 в значительной мере совпадают с результатами, полученными на предыдущем участке: – при уменьшении шага построения расчетных сечений Δx установлено снижение величины коэффициента запаса устойчивости *n* от 1,343 ($\Delta x = 100$ м) до 1,150 ($\Delta x = 3$ м) за счет более детального учета изменений расчетных данных;

– продольная координата *x* точки минимума графика функции изменяется от +200 ($\Delta x = 100$ м) до +169 м ($\Delta x = 3$ м), при этом с каждой итерацией отклонение координаты *x* от предыдущего значения снижается.



Рис. 4.12 – Графики зависимости коэффициентов запаса устойчивости *n* от координаты продольного профиля *x* при величине линейного шага $\Delta x = 100$ м (а) и его уменьшении (б): 1 – $\Delta x = 50$ м; 2 – $\Delta x = 25$ м; 3 – $\Delta x = 12$ м; 4 – $\Delta x = 6$ м; 5 – $\Delta x = 3$ м

Таблица 4.7

Результаты анализа влияния линейного шага Δx поиска наиболее опасного сечения на минимальное значение коэффициента запаса устойчивости n_{min} в условиях Кедровского угольного разреза

угольного разреза				
Линейный шаг Δ <i>х</i> , м	Минимальное значение	Продольная координата		
	коэффициента запаса устойчивости <i>n_{min}</i>	профиля <i>x</i> , м		
100	1,343	+200		
50	1,176	+175		
25	1,176	+175		
12	1,176	+175		
6	1,158	+169		
3	1,150	+172		

На основании выполненных исследований влияния линейного шага построения расчетных сечений Δx на минимальное значение коэффициента запаса устойчивости n_{min} с использованием закономерности (4.1) принятой методики построены графики зависимости величины повышения точности расчета коэффициента запаса устойчивости δ от величины Δx для условий Бачатского и Кедровского угольных разрезов (рис.4.13).



Рис. 4.13 – Графики зависимости точности расчета коэффициента запаса устойчивости δ от величины линейного шага Δx для условий Бачатского (1) и Кедровского (2) угольных разрезов

Предложенный подход позволил повысить точность прогноза устойчивости в пределах расчетных моделей для Бачатского и Кедровского угольных разрезов на 25,6 и 21,9 % соответственно.

Более детально полученные результаты изложены в работе автора [109].

Выводы

Исследовано изменение устойчивости откосных сооружений техногенного сложения при деформировании борта в результате оползня дамбы гидроотвала, при отработке намывного массива гидроотвала, при сооружении насыпного массива из вскрышных пород на намывном основании. Получены следующие результаты.

1. На разрезе «Краснобродский» в результате оползневых процессов гидроотвала «Бахтыхтинский» с сооруженным на намывном основании отвала сухой вскрыши произошло деформирование техногенного массива, сложенного породами сухой вскрыши, намывными супесями и суглинками, слоем суглинков в основании, причем физико-механические свойства слоев изменялись в широких пределах. Электрофизический мониторинг позволил установить расположение слоя намывных грунтов по глубине массива и в плане, а гидромеханический мониторинг – пространственно-временные изменения порового давления в этом слое. На основе построенной объемной геолого-геофизической модели выполнен прогноз устойчивости деформированного массива по пяти профилям, при этом коэффициент запаса устойчивости изменялся в диапазоне n = 1,1-1,46.

Таким образом, участки бортов разрезов, непосредственно прилегающие к гидроотвалам, характеризуются повышенной опасностью оползнеобразования, особенно при складировании сухих пород вскрыши поверх намывных. Этому способствует сочетание следующих факторов: увеличение суммарной высоты борта; формирование в борту влагонасыщенной ослабленной зоны, имеющей сложную конфигурацию в плане и по глубине; наличие в пределах этой зоны избыточного порового давления, возрастающего за счет пригруза намывных пород сухим отвалом. Для формирования объемной геолого-геофизической модели кроме геометрии борта обязательно следует устанавливать в плане и по глубине границы зон влагонасыщенных пород методом электрических зондирований, а также проводить мониторинг порового давления в пределах этой зоны.

2. На разрезе «Кедровский» в результате расконсервации запасов под гидроотвалом №3 было принято решение о его частичном смыве, причем для ограждения зоны гидромеханизации возведена трехъярусная насыпь (разделительная перемычка) высотой до 60 м.

Установлено, что при создании объемных геолого-геофизических моделей техногенных массивов, сформированных на площадях погашенных гидроотвалов, кроме результатов традиционных маркшейдерских измерений и прямых инженерно-геологических изысканий весьма важными являются информативные базы данных о пространственно-временных изменениях физико-механических свойств намывных пород, обусловленных их водоотдачей и консолидацией, которые с высокой детальностью на межскважинных интервалах могут быть получены на основе статистических зависимостей от изменений электропроводящих свойств методами электрических зондирований или томографии, а при создании ограждающих насыпей (перемычек) из сухих пород – информация об избыточном поровом давлении под этими объектами.

При отработке гидромеханизированным способом намывных пород, относительно однородных по прочностным свойствам, устойчивость откоса гидровскрышного забоя в наибольшей степени определяется абсолютными величинами набранных прочностных показателей на отрабатываемом участке и неблагоприятным сочетанием формы уступа (наличием выступающих участков, изрезанность забоя в плане) с высотой заходки. Установленный диапазон коэффициента запаса устойчивости составил *n* = 1,03–3,76.

Устойчивость ограждающих сооружений из сухих пород в наибольшей степени зависит от глубины расположения и мощности слабого намывного слоя и абсолютной величины избыточного порового давления в этом слое. Установленный диапазон изменения коэффициента запаса устойчивости для данного участка массива значительно уже и составил n = 1,29-1,59.

3. Для оценки диапазона повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей разработан алгоритм расчета величины повышения точности определения координат наиболее опасного сечения при задании последовательно уменьшающегося линейного шага Δx построения расчетных сечений и углового шага $\Delta \phi$ поворота этого сечения. Оценка проведена для борта естественного сложения (Бачатский угольный разрез) и техногенного (разделительная перемычка Кедровского разреза).

В результате расчетов установлено, что достоинством разработанного алгоритма прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геологогеофизических моделей с учетом неоднородности физических свойств инженерно-геологических массивов является снижение влияния человеческого фактора за счет поиска оползнеопасного участка путем перебора множества расчетных сечений через заданные величины линейного и углового шагов. Предложенный подход позволил повысить точность прогноза устойчивости в пределах расчетных моделей для Бачатского и Кедровского угольных разрезов на 25,6 и 21,9 % соответственно.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

5.1 Методика прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей

На основе проведенных исследований, результаты которых изложены в главах 2-4, разработана общая методика прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей, алгоритм которой представлен на рис. 5.1.

Алгоритм включает в себя следующие этапы.

4. Маркшейдерско-геодезический мониторинг и инженерногеологические изыскания на исследуемом участке.

5. Комплекс геофизических зондирований, в зависимости от типа откосного сооружения (естественное или техногенное).

6. Гидромеханический мониторинг при наличии намывных пород.

7. Построение объемной геолого-геофизической модели откосного сооружения на основе обобщения результатов инженерно-геологических изысканий, геофизических зондирований, маркшейдерско-геодезического и гидромеханического мониторинга.

8. Определение оползнеопасных зон и вероятного направления оползня.

9. Разработка рекомендаций по безопасному ведению горных работ.

5.2 Внедрение разработок при ведении горных работ на угольных разрезах

Результаты исследований внедрены в производство при ведении горных работ на угольных разрезах сибирского региона и Республики Узбекистан: Бачатский, Краснобродский, Кедровский, Ангренский, Распадский-Коксовый, Зашуланчкий, Черниговский, Барзасский, Березовский, Пермяковский, Мугунский. Результаты использования разработанных рекомендаций представлены в табл. 5.1.



Рис. 5.1 – Общая методика прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей

Использование разработанных рекомендаций

Наименование		
разреза, объект,	Проблема	Рекомендации
№ договора		
1	2	3
Ангренский, северо- западный борт, договор № 4682П/04 от 21.11.2018 г.	Цикличное развитие оползня «Центральный» объемом до 120 млн.м ³	Методом обратных геомеханических расчетов определены показатели со- противления сдвигу по поверхности скольжения. По результатам обработ- ки данных геофизических исследова- ний установлено положение ослаб- ленных зон. Разработаны рекоменда- ции по разгрузке головной части оползня, геофизическому контролю устойчивости борта, регулированию стока поверхностных вод.
Кедровский,	Вероятность развития де-	Даны рекомендации по изучению
Разделительная пере- мычка гидроотвала №3, договор № 4433П/07(1)-дс от 29.06.2018 г.	формаций в процессе консо- лидации намывных пород	пространственно-временного измене- ния порового давления и физико- механических свойств намывных по- род на основе статистических зави- симостей от изменений электропро- водящих свойств методом электрото- мографии.
Кедровский, участок	Наличие в прибортовом мас-	Разработана программа геофизиче-
борта в зоне влияния	сиве структурно ослабленных	ских исследований для определения
подземных горных ра-	(разуплотненных) зон, в ре-	границ ослабленных зон, рекоменда-
бот, договор №	зультате подработки подзем-	ции по установлению критерия
443311/0/(1)-дс от 20.06.2018 г	ными горными выраоотками	оползнеопасности в условиях разреза
29.00.20101.		
Бачатский запалный	Формирование оползневого	Ланы рекоменлации по установлению
борт в четвертичных	фронта протяженностью до 2	границ водонасышенных зон методом
отложениях, договор	км вследствие снижения	электрических зондирований и при-
№ 4505П/07 от	прочности водонасыщенных	ведению прибортового массива в
25.06.2018 г.	пород	устойчивое состояние
Краснобродский, уча-	Наличие слабых намывных	Разработаны рекомендации по гидро-
сток «Новосергеев-	пород в основании проекти-	геомеханическому мониторингу и
ский», договор №	руемого внешнего породного	установлению границ водонасыщен-
3915П/12 от 24.09.2020	отвала «Перспективный», от-	ных зон методом электрических зон-
Г.	сыпаемого на намывные по-	дирований в южной части внешнего
	роды гидроотвала «Прямои Ускат»	породного отвала «Перспективныи»
Распадский-Коксовый	Наличие в прибортовом мас-	Разработана программа геофизиче-
(участок «Поле	сиве структурно ослабленных	ских исследований для определения
Шахты №1»), рабочий	(разуплотненных) зон, в ре-	границ ослабленных зон, рекоменда-
00рт, договор №		
40/911/05 OT 09.01.2019	зультате подработки подзем-	ции по установлению критерия
F	зультате подработки подзем- ными горными выработками	ции по установлению критерия оползнеопасности в условиях разреза

1	2	3
Зашуланский, основа- ние внешнего отвала, договор № 4675П/01 от 18.08.2016 г.	Наличие в основании отвала слоев суглинка текучей кон- систенции и супеси пластич- ной переменной мощности	Даны рекомендации по расположе- нию профилей геофизических иссле- дований методом электротомографии для определения границ распростра- нения слабых слоев и последующего прогноза устойчивости откосов внешнего отвала
Черниговский, восточ- ный борт, договор № 4695П/01 от 01.02.2018 г.	Вероятность формирования ослабленных водонасыщен- ных и разуплотненных зон вблизи ликвидированного гидроотвала и подземных горных выработок шахты «Южная»	Разработана программа контроля со- стояния массива, включающая кон- струкцию сети гидронаблюдательных скважин и профилей геофизических исследований методом электротомо- графии для определения границ ослабленных зон
Барзасский, внешний отвал, договор № 4734П от 10.08.2020 г.	Наличие в основании отвала слоев суглинков мягко- и те- кучепластичной консистен- ции переменной мощности	Даны рекомендации по расположе- нию профилей геофизических иссле- дований методом электротомографии для определения границ распростра- нения слабых слоев и последующего прогноза устойчивости откосов внешнего отвала
Березовский Западный, опасная зона 4-1, договор № 4725П/01 от 13.03.2020 г.	Оползень расслоившегося массива. Зафиксирован в но- ябре 2019 г. на горизонтах +400 ÷ +247 м между про- фильными линиями 52-98. Размеры опасной зоны со- ставляли: в плане – 920 м; по высоте – 153 м. Результиру- ющий угол борта составляет 32-34°. Вблизи верхней бров- ки деформирующегося борта происходит скопление воды с последующим перетеканием на нижележащие горизонты по поверхности откосов	Определены методом обратных гео- механических расчетов показатели сопротивления сдвигу по поверхности скольжения, разработаны рекоменда- ции по стабилизации оползня, раз- грузке призмы активного давления и геофизическому исследованию поло- жения ослабленных зон
Пермяковский, договор № 4717/01 от 01.10.2020 г.	Наличие участков потенци- ально оползнеопасных зон в бортах четвертичных отло- жений, обусловленных влия- нием временных водотоков	Разработана программа геолого- геофизического контроля геомехани- ческого состояния бортов в четвер- тичных отложениях
Мугунский, внутренний отвал, до- говор № 4705П/01 от 10.12.2018 г.	Деформирование внутренних отвалов в виде оползней, пе- рекрывающих пространство между нижней бровкой от- сыпаемого отвала и вскры- тым угольным пластом.	Определены методом обратных гео- механических расчетов показатели сопротивления сдвигу по контакту «отвал-основание» и предельные па- раметры, соответствующие несущей способности пород основания отвала.

Таким образом, результаты проведенных исследований способствовали увеличению безопасности ведения горных работ за счет повышения точности прогноза устойчивости откосов техногенных массивов.

Более детально полученные результаты изложены в работах автора [88, 93, 94, 99-106, 108, 109].

Выводы

1. Разработанная методика прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов включает: маркшейдерско-геодезический мониторинг и инженерно-геологические изыскания на исследуемом участке; комплекс геофизических зондирований; гидромеханический мониторинг при наличии намывных пород; построение объемной геолого-геофизической модели; определение оползнеопасных зон и вероятного направления оползня; разработка рекомендаций по безопасному ведению горных работ.

2. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по повышению устойчивости откосных сооружений на угольных разрезах Кузбасса и Республики Узбекистан, обеспечивающие увеличение безопасности ведения горных работ и снижение затрат на предотвращение технологических аварий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по прогнозу устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей, включающей алгоритмы обработки данных сейсмических и электрических зондирований методом адаптивного случайного поиска, формирования триангуляционной модели прибортового массива, отстраивания вероятной поверхности скольжения, компьютерной реализации прогноза устойчивости методом векторного сложения сил, алгоритм автоматизированного поиска наиболее оползнеопасного сечения, обеспечивающее увеличение точности прогноза, способствующее повышению безопасности ведения горных работ и снижению затрат на предотвращение технологических аварий.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации сводятся к следующему.

1. Актуальность проблемы совершенствования методов прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов обусловлено большим суммарным объемом оползней, достигающим ежегодно 50-110 млн. м³, а также ее нерешенность, связанная с отсутствием методов количественной интерпретации геофизических зондирований, обеспечивающих построение объемных моделей бортов, необоснованностью принципов автоматизированного выбора наиболее опасного сечения, неизученностью особенностей объемных геолого-геофизический моделей породных массивов естественного сложения и техногенных.

2. Повышение точности оценки степени развития деформационных процессов в прибортовом массиве обеспечивается при круговом сейсмическом зондировании путем расчета параметров эллипса сейсмической анизотропии с определением минимума целевой функции методом адаптивного случайного поиска. Детализация изменения мощности рыхлого слоя песчанно-глинистых отложений на межскважинных интервалах достигается инверсией электрических зондирований, а расположения локальных влагонасыщенных зон – по отрицательным аномалиям на графиках электропрофилирования или элетротомограммах.

3. Основой объемной модели откосного сооружения является триангуляция поверхности прибортового массива, при этом расчетный профиль строят по точкам пересечения проекции сечения с ребрами триангуляции с использованием уравнений элементов профиля и правил отстраивания вероятной поверхности скольжения, а автоматизация поиска наиболее опасного сечения обеспечивается циклическим заданием его поступательного смещения и поворотом в плане с заданным шагом с определением коэффициента запаса устойчивости методом векторного сложения сил.

Общий алгоритм геомеханического прогноза включает следующие основные этапы: построение триангуляции проектной или фактической поверхности прибортового массива и поверхностей естественного ослабления; ввод физикомеханических свойств пород в естественном состоянии по базам данных инженерно-геологический изысканий; ввод поверхностей ослабленных разуплотненных и влагонасыщенных зон по базам данных геофизических зондирований; ввод начальных координат расчетного сечения, величин шагов его линейного и углового смещения; расчет коэффициентов запаса устойчивости по каждому расчетному сечению.

4. Экспериментально определенный диапазон изменения коэффициента запаса устойчивости откосных сооружений естественного сложения для условий Кузбасса и Республики Узбекистан составляет 1,06-2,39. Он определяется сочетанием природных и техногенных факторов, включающих гидрогеологические условия территории, сезонный климатический режим, тектоническую нарушенность месторождения и накладываемые на нее зоны сдвижения, связанные с подработкой локальные разуплотненные и влагонасыщенные зоны, что приводит в ряде случаев к формированию весьма сложной геологической структуры.

При создании объемных геолого-геофизических моделей следует учитывать, что границы оползнеопасных разуплотненных зон соответствуют критическому значению коэффициента сейсмической анизотропии, который для условий разреза «Ангренский» составляет $K_a > 1,6$, границы ослабленных водонасыщенных зон диагностируют по локальным отрицательным аномалиям эффективного УЭС ρ_k на графиках электропрофилирования или томограммах, составляющих более 0,2 от средних значений, изменение мощности рыхлого слоя песчаноглинистых отложений на межскважинных интервалах оценивают путем инверсии зондирований, а при больших площадях обследования – экспресс-методом с использованием корреляционных зависимостей от изменений ρ_k .

5. Геомеханические особенности деформированных участков бортов разрезов, прилегающих к гидроотвалам, состоят в увеличенной суммарной высоте борта, залегании в борту влагонасыщенной зоны из оползших намывных пород, имеющей сложную конфигурацию в плане и по глубине, наличии в пределах этой зоны избыточного порового давления, возрастающего за счет пригруза намывного

слоя сухим отвалом. Это требует установления границ влагонасыщенной зоны методом электрических зондирований и проведения в ее пределах мониторинга порового давления.

При создании объемных моделей техногенных массивов, сформированных на площадях погашенных гидроотвалов, определяющей является информация о пространственно-временных изменениях физико-механических свойств намывных пород, обусловленных их водоотдачей и консолидацией, получаемая методами электрических зондирований и томографии, а при сооружении ограждающих насыпей (перемычек) из сухих пород – информация о поровом давлении под этими объектами. При отработке гидромеханизированным способом намывных пород устойчивость откоса забоя в наибольшей степени определяется абсолютными величинами набранных прочностных показателей массива и неблагоприятным сочетанием формы уступа с высотой заходки. Устойчивость ограждающих сооружений из сухих пород на намывном основании в наибольшей степени зависит от глубины расположения и мощности намывного слоя, абсолютной величины порового давления в этом слое.

6. Основным достоинством разработанной методики прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей с учетом неоднородности физических свойств массивов бортов разрезов является снижение влияния человеческого фактора за счет автоматизированного поиска оползнеопасного участка путем перебора множества расчетных сечений через задаваемые величины линейного и углового шагов. Экспериментально установлено, что предложенный подход позволяет повысить точность прогноза устойчивости в условиях массивов естественного и техногенного сложения на 21,9-25,6%.

Дальнейшие исследования целесообразно производить в следующих направлениях: обоснование необходимой и достаточной детальности геологической, геофизической, гидрогеологической, и маркшейдерской информации для сокращения объемов изысканий; разработка рациональных алгоритмов поиска наиболее опасных сечений (исключение заведомо неопасных интервалов профилей, управление диапазонами линейного и углового шагов задания расчетных сечений в зависимости от требуемой точности прогноза).

Список литературы

1. Демин, А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз / А.М. Демин. – М.: ГЕОС, 2009. – 79 с.

2. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. – СПб., 1998. – 208 с.

3. Бахаева, С.П. Прогноз устойчивости откосных сооружений угольных разрезов / С.П. Бахаева, С.М. Простов, Н.А. Смирнов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2015. – 386 с.

4. Ольховатенко, В.Е. Инженерная геология угольных месторождений Кузнецкого бассейна [Текст]: монография / В.Е. Ольховатенко. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 150 с.

5. Жариков, В.П. Рациональное землепользование при формировании отвалов и гидроотвалов на разрезах Кузбасса / В.П. Жариков, В.В. Ермошкин, Р.Г. Клейменов // ГИАБ. – 2012. – №2. – С. 28-32.

6. Кельгинбаев, З.С. К вопросу комплексного использования минерального сырья Ангренского каолино-угольного месторождения / А.Н. Кельгинбаев, З.С. Салимов, Г.М. Ибрагимов, С.И. Якубов // Горный вестник Узбекистана. – 2008. – № 1. – С. 22–25.

7. Силкин, А.А. Управление долговременной устойчивостью откосов на карьерах Узбекистана / А.А. Силкин, В.Н. Кольцов, А.А. Шеметов, Ю.А. Жиянов, С.Б. Иноземцев. – Ташкент: Фан, 2005. – 229 с.

8. Трофимов, В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С Зиангиров. Под. Ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Издательство МГУ, 2005. – 1024 с.

9. Скударнов, Д.Е. Анализ смертельного травматизма при добыче угля открытыми горными работами / Д.Е. Скударнов, В.А. Портола, А.А. Квасова, А.В. Сачков // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2018. – № 1. – С. 33-39.

10. Нефедов, Б.Н. Выявление причин деформации старовозрастных породных отвалов на угольных разрезах / Б.Н. Нефедов, И.В. Зеньков // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2016. – № 3. – С. 99–101.

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

12. Кутепов, Ю.И. Инженерно-геологические условия внешнего отвалообразования на разрезах Кузбасса / Ю.И. Кутепов, А.Д. Васильева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 10. – С. 122-131.

13. Якубов, С.И. Изучение оползневых явлений – один из проблемных вопросов при добыче угля на разрезе «Ангренский» / С.И. Якубов, И.П. Сидорова Б.Р. Раимжанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – С. 370-375.

14. Пенеко, А.И. Атчинский оползень – уникальный опыт борьбы с опасным явлением / А.И. Пенеко, С.Я. Красников // Горный вестник Узбекистана. – 1998. – № 1. – С. 18–21.

15. Хурсанов, Х.П. Оползневые явления на Ангренском месторождении бурового угля / Х.П. Хурсанов, В.Н. Колпаков, С.Я. Красников // Горный вестник Узбекистана. – 2002. – № 2. – С. 19–26.

16. Хурсанов, Х.П. Угольная промышленность Узбекистана: этапы становления, пути развития и перспективы // Горный вестник Узбекистана. – 2008. – № 1. – С. 3–9.

17. Кривенко, Ю.Н. Разрез «Ангренский» – уникальное каолино-угольное месторождение / Ю.Н. Кривенко, В.И. Бондар // Горный вестник Узбекистана. – 2008. – № 1. – С. 10–14.

18. Бахаева, С.П. Оценка устойчивости борта котлована под промышленную площадку шахты / С.П. Бахаева, Д.В. Гурьев // ГИАБ. – 2021. – №1. – С. 32-42.

19. Бахаева, С.П. Об оценке геоэкологического ущерба от оползания техногенного массива / С.П. Бахаева, С.В. Дубинин // Известия вузов. Горный журнал. – 2016. – №3. – С. 59-66.

20. Приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» (Зарегистрировано в Минюсте России 18.12.2020 № 61603).

21. Coulomb, C. Application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs a l'architecture // Mémoires de savants étranges de l'Académie des sciences. – P., 1773.

22. Певзнер, М.Е. Геомеханика: Учебник для вузов / М.Е. Певзнер, М.А. Иофис, В.Н. Попов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. – 438 с.

23. Гальперин, А.М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 473 с.

24. Жабко, А.В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2015. – № 4(40). – С. 45-57.

25. Фисенко, Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965.

26. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды. – М.: Наука, 1990. – 272 с.

27. Голушкевич, С.С. Статика предельных состояний грунтовых масс / С.С. Голушкевич. – М.: Гос. изд-во техн-теор. лит-ры, 1957. – 288 с.

28. Попов, В.Н. Управление устойчивостью карьерных откосов / В.Н. Попов, П.С. Шпаков, Ю.Л. Юнаков. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. – 683 с.

29. Галустьян, Э.Л. Геомеханика открытых горных работ: Справочное пособ. – М.: Недра, 1992. – 272 с.: ил. 30. Арсентьев, А.И. Устойчивость бортов и осушение карьеров. Учебник для вузов / А.И. Арсентьев, И.Ю. Букин, В.А. Мироненко. – М.: Недра, 1982. – 165 с.

31. Астафьев, Ю.П. Управление состоянием массива горных пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых / Ю.П. Астафьев, Р.В. Попов, Ю.М. Николашин. – Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 272 с.

32. Мочалов, А.М. Определение параметров бортов карьеров и поддержание их в устойчивом состоянии / А.М. Мочалов, В.Н. Попов, Г.М. Еремин. – М.: Горная книга, 2016. – 224 с.

33. Гордеев, В.А. Расчетные способы метода предельного равновесия при оценке устойчивости карьерных откосов / В.А. Гордеев, М.Х. Бобаев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – №1. – с. 66-73.

34. Хуан, Я.Х. Устойчивость земляных откосов / под ред. В.Г. Мельника. – М.: Стройиздат, 1988. – 240 с.

35. Жабко, А.В. Исследование закономерностей процесса дизентеграции горных пород на основе теории устойчивости откосов горнотехнических сооружений: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», Екатеринбург, 2019.

36. Саинов, М.П. Методика расчета устойчивости откосов по пространственным поверхностям скольжения в виде эллипсоида вращения // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 188-200.

37. Slope stability and stabilization methods. Second Edition / Lee W. Abramson, Thomas S. Lee, Sunil Sharma, Glenn M. Boyce. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 712 p.

38. Черчинцева, Т.С. Объемная задача определения коэффициента запаса устойчивости / Т.С. Черчинцева, Т.С. Кузнецова // ГИАБ. – 2004. – Семинар №13. – С. 210-213.

39. 3D stability analysis method of concave slope based on the Bishop method / Zhang Tianwen, Cai Qingxiang, Liu Han, Jisen Shu, Wei Zhou // International Journal of Mining Science and Technology. -2017. - P. 1-6.

40. Three-dimensional critical slip surface locating and slope stability assessment for lava lobe of Unzen volcano / Mowen Xie, Wang Zengfu, Xiangyu Liu, Xu Bo. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – No.3. – Vol.1. – P. 82-89.

41. Souza, João Paulo Tavares Análise 2d e 3d da estabilidade da barragem de fundão / João Paulo Tavares. Souza, Moura Nícolas Rodrigues, Jr. Gilson de F.N. Gitirana // REEC. -2019. - Vol.15. - No. 2. - P. 123-136.

42. Cheng, Y. M. Slope Stability Analysis and Stabilization / Y. M. Cheng, C. K. Lau. – CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. – 426 p.

43. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987.

44. Смолич, С.В. Основы геомеханики: учебное пособие / С.В. Смолич, В.А. Бабелло. – Чита: Изд-во Забайкал. Гос. ун-та, 2017. – 143 с.

45. Ковров, А.С. Анализ методов оценки уступов и бортов карьеров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 74-79.

46. Yuan-Liang Chang. Slope stability analysis using strength reduction technique» / Yuan-Liang Chang, Tien-Kuen Huang // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 2005. – Vol. 28 – No. 2 – P. 231-240.

47. Пайшанбиев, С.А. Основные преимущества и недостатки метода конечных элементов при решении задач инженерной геодинамики / С.А. Пайшанбиев, Э.В. Калинин // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы второй Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. – 2018. – С. 199-205.

48. Заиров, Ш.Ш. Формирование устойчивости бортов при ведении взрывных работ на карьерах Кызылкумского региона / Ш.Ш. Заиров, Ш.Р. Уринов, Р.У. Номдоров // Горные науки и технологии. – 2020. – № 5(3). – С. 235-252.

49. Фоменко, И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности: диссертация на соискание ученой степени доктора геолога-минералогических наук. ФГБОУ ВПО «Российский государственный геологоразведочный университет (МГРИ-РГГРУ) имени Серго Орджоникидзе», Москва, 2014.

50. Бенерджи, П. Метод граничных элементов в прикладных науках: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 494 с.

51. Meng, J. Stability Analysis of Earth Slope Using Combined Numerical Analysis Method Based on DEM and LEM / J. Meng, W. Yixian, Y. Zhao, H. Ruan, Y. Liu // Tehnički vjesnik. – 2018. – Vol. 25. – No. 5. – P. 1265-1273.

52. Бахаева, С.П. Расчеты на прочность отвалов вскрышных пород на слабом основании / С.П. Бахаева, В.А. Гоголин, И.А. Ермакова // Физикотехнические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №3. – С. 46-54.

53. Спирин, В.И. Оптимизация конструкций бортов карьеров на основе оценки рисков / В.И. Спирин, И.С. Ливинский, Э. Хормазабаль // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – Вып. 3. – С. 317-331.

54. Газиев, Э.Г. Вероятностная оценка надежности скальных массивов / Э.Г. Газиев, В.И. Речицкий – М.: Стройиздат, 1985. – 104 с.

55. Бахаева, С.П. Прогноз устойчивости насыпных дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств суглинистых грунтов / С.П. Бахаева, Д.В. Гурьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №1. – С. 23-32.

56. Простов, С.М. Геолого-электромагнитный мониторинг грунтового основания сооружения / С.М. Простов, О.В. Герасимов, Н.Ю. Никулин, Д.А. Зубов // ГИАБ. – 2009. – №5. – С. 266-269.

57. Простов, С.М. Георадиолокационный контроль структуры, состояния и свойств грунтового основания автомобильной дороги / С.М. Простов, О.В. Герасимов, Н.Ю. Никулин, Д.А. Зубов // Вестник КузГТУ. – 2007. – №5(63). – С. 38-43.

58. Простов, С.М. Диагностирование состояния и свойств грунтов основания надшахтного сооружения / С.М. Простов, Н.Ю. Никулин // ГИАБ. – 2011. – №12. – С. 125-128.

59. Никулин, Н.Ю. Комплексный геолого-геофизический мониторинг состояния и свойств грунтового основания горнотехнического сооружения / Н.Ю. Никулин, С.М. Простов, О.В. Герасимов // Вестник КузГТУ. – 2012. – №3(91). – С. 3-8.

60. Никулин, Н.Ю. Георадиолокационный мониторинг при изучении свойств закрепленного массива // Вестник КузГТУ. – 2013. – №3(97). – С. 7-11.

61. Денисова, Е. В. Моделирование процессов отражения плоской электромагнитной волны в многослойной среде: нефтенасыщенный пласт, вмещающий трещину гидроразрыва / Е. В. Денисова, А. П. Хмелинин, А. И. Конурин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 195-205. – DOI 10.33764/2618-981Х-2021-2-3-195-205.

62. Простов, С.М. Георадиолокационный мониторинг при укреплении грунтовых оснований горнотехнических сооружений в Кузбассе / С.М. Простов, Н.Ю. Никулин // Вестник КузГТУ. – 2015. – №5(111). – С. 11-19.

63. Solovitsky, A.N. About control of industrial stability of dams of the fuel and energy complex facilities in Kuzbass on the basis of application of shallow-depth geophysical technologies / A.N. Solovitsky, N.Yu. Nikulin, A.V. Nastavko, N.A. Smirnov, K.A. Makarov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020.

64. Смирнов, Н.А. Применение метода электротомографии для исследования геологического строения основания отвалов / Н.А. Смирнов, М.А. Кузнецов, В.А. Рожнов, С.В. Манакова // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Сборник материалов XI международной научно-практической конференции. Под редакцией Тайлакова О. В. – 2015.

65. Клейменов, Р.Г. Контроль состояния и свойств техногенных массивов гидроотвалов на угольных разрезах Кузбасса / Р.Г. Клейменов, В.В. Ермошкин, С.М. Простов // ГИАБ. – 2009. – №10. – С. 157-160.

66. Клейменов, Р.Г. Комплексный мониторинг процессов в гидроотвале, расположенном в прибортовой зоне // Р.Г. Клейменов, С.М. Простов, М.В. Гуцал // ГИАБ. – 2010. – №7. – С. 188-194.

67. Инструкция по наблюдению за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. – Л.: ВНИМИ, 1971. – 188 с.

68. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 118 с.

69. Кутепов, Ю.И. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова, А.Д. Васильева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 109–120.

70. Розанов, Ю.И. Опыт применения методов космической геодезии для геомеханического мониторинга массивов горных пород при открытых горных работах / Ю.И. Розанов, М.А. Кузнецов, Р.Н. Достовалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 100–106.

71. Розанов, Ю.И. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») / Ю.И. Розанов,

А.А. Завьялов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 7. – С. 40–46.

72. Одабаи-Фард, В.В. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии / В.В. Одабаи-Фард, М.Р. Пономаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 11. – С. 59–67.

73. Натурные методы исследования прочностных свойств горных пород и породных контактов / Ф.К. Низаметдинов, А.А. Нагибин, В.В. Левашов, Р.Ф. Низаметдинов, Н.Ф. Низаметдинов, А.Е. Касымжанова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 26-33.

74. А. с. 1040146 СССР, МКИ Е21С 39/00. Способ определения линии скольжения массива уступа карьера / З.Г. Каюмов. – № 2975579/22-03 ; Заявл. 28.08.80 ; Опубл. 07.09.83, Бюл. №33.

75. Соколов, К.О. Алгоритм обработки данных георадиолокации для выявления контуров деформационных геологических структур // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 10. – С. 138–144.

76. Федорова, Л.Л. Георадиолокационная оценка влажности горных пород / Л.Л. Федорова, Г.А. Куляндин, К.О. Соколов // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 152–158.

77. Дорохин, К.А. Опыт применения скважинных сейсмоаккустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D- и 3D-построений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 80–88.

78. Мониторинг миграции водонасыщенных участков в борту карьера для оценки его устойчивости / В.В. Рыбин, В.И. Панин, К.Н. Константинов, Ю.А. Старцев, А.С. Калюжный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 184–195.

79. Санчаа, А.М. Применение метода электротомографии для поиска водоносных горизонтов в геологических условиях восточной части Новосибирской области / А.М. Санчаа, А.Н. Фаге, О.В. Шемелина // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 90–105.

80. Романов, В.В. Комплекс геофизических методов исследований полигонов твердых отходов горнодобывающих предприятий / В.В. Романов, К.С. Мальский, А.И. Посеренин, А.Н. Дронов, А.А. Иванов // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2018. – № 11. – С. 114–120.

81. Sokolov, M. Prediction of the Geomechanical State of the Fixed Ground Basis of a Mining Building / Mikhail Sokolov, Mikhail Karablin // IVth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. – 105. – 01036. – (2019).

82. Karablin, M. Landslide hazard zones determination on open pit mine edge by circular seismic sounding method / Mikhail Karablin, Dmitry Sirota, Sergey Prostov, Olmos Abdurasulov // Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology. E3S Web of Conferences. -303. -01020. -(2021).

83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661977. Программа расчета коэффициента анизотропии акустических

свойств пород прибортового массива / М.М. Караблин, Д.Ю. Сирота, С.М. Простов. – № 2020661977; Заявл. 05.09.2020; Зарегистр. 05.10.2020.

84. Якубовский, Ю.В., Ренард И.В. Электроразведка – М.: Недра, 1991. – 238 с.

85. Хмелевской, В.К., Бондаренко В.М. Электроразведка. Справочник геофизика – М.: Недра, 1989. – 222 с.

86. Бурсиан, В.Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке – Л.: Недра, 1972. – 368 с.

87. Сирота, Д.Ю. Повышение скорости вычислений для одной задачи электроразведки // Вестник КузГТУ. – 2008. – Т 1. – С. 81 – 85.

88. Караблин, М.М. Прогноз устойчивости прибортового массива в глинистых грунтах четвертичных отложений с учетом влияния фильтрационных коллекторов на примере Бачатского угольного разреза / М.М. Караблин, Д.Ю. Сирота, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 3. – С. 36 – 47.

89. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662360. Программа расчета мощности рыхлых четвертичных отложений по результатам электрических зондирований / М.М. Караблин, Д.Ю. Сирота, С.М. Простов. – № 2020662360; Заявл. 05.10.2020; Зарегистр. 12.10.2020.

90. Скворцов, А.В., Мирза Н.С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2006. – 168 с.

91. Тюкачев, Н.А. Программирование графики в Delphi / Н.А. Тюкачев, И.В. Илларионов, В.Г. Хлебостроев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 784 с.: ил. + CD-ROM.

92. Делоне, Б.Н. О пустой сфере // Изв. АН СССР. ОМЕН. – 1934. – № 4. – С. 793–800.

93. Karablin, M. Automated Stability Analysis of Soil Slopes / Mikhail Karablin, Dmitry Gurev, Sergey Prostov // IVth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences. -105. -01015. -(2019).

94. Караблин, М.М. Автоматизированный прогноз устойчивости борта карьера в глинистых породах четвертичных отложений / М.М. Караблин, Д.В. Гурьев, С.М. Простов, Ю.В. Лесин // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 6. – С. 21 – 30 (In Eng.).

95. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611636. Устойчивый борт / М.М. Караблин, Д.В. Гурьев, С.М. Простов. – № 2021611636; Заявл. 25.01.2021; Зарегистр. 02.02.2021.

96. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617755. Устойчивая насыпь / Д.В. Гурьев, М.М. Караблин. – № 2015617755; Заявл. 23.04.2015; Зарегистр. 22.07.2015.

97. Дунаев, В.А. Оценка и прогноз устойчивости уступов карьеров в массивах скальных пород на основе геоинформационных технологий / В.А. Дунаев, Н.А. Годовников // ГИАБ – 2014 – № 4 – С. 134-137.

98. Бас, Н.С. Проектирование программного обеспечения для расчета устойчивости откосных сооружений / Н.С. Бас, В.Н. Костин // ГИАБ – 2016 – № 11 – С. 33-46.

99. Караблин, М.М. Прогноз устойчивости прибортового массива оползня «Центральный» угольного разреза «Ангренский» на основе объемной геологогеофизической модели / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 3. – С. 39 – 49.

100. Караблин, М.М. Прогноз устойчивости бортов карьеров на основе объемных геолого-геофизических моделей / М.М. Караблин, Д.В. Брыков, С.М. Простов // Сборник материалов XII всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2020.

101. Караблин, М.М. Оползневые процессы в бортах при ведении горных работ на угольном разрезе «Ангренский» / М.М. Караблин, С.М. Простов, Ю.В. Лесин // Известия вузов. Горный журнал. – 2019. – № 8. – С. 47-57.

102. Караблин, М.М. Диагностирование оползнеопасных зон прибортового массива разреза «Ангренский» по данным сейсмо- и электроразведки / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 1. – С. 48-59.

103. Караблин, М.М. Оценка влияния гидрогеологических процессов и подработки на устойчивость прибортового массива угольного разреза / М.М. Караблин, С.М. Простов, Н.А. Смирнов // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 36 – 44 (In Eng.).

104. Караблин, М.М. Новый подход к прогнозу устойчивости откосов горнотехнических сооружений / М.М. Караблин, С.М. Простов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2021. – № 7. – С. 345-352.

105. Караблин, М.М. Прогноз устойчивости техногенного грунтового массива, прилегающего к ликвидированному гидроотвалу / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 5. – С. 47 – 55.

106. Караблин, М.М. Прогноз устойчивости оползневого участка карьера, прилегающего к гидроотвалу / М.М. Караблин, Д.Э. Харитонов, С.М. Простов // Сборник материалов XII всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2020.

107. Простов, С.М. Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований / С.М. Простов, С.П. Бахаева, Н.А. Смирнов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – №. 1. – С. 69–78.

108. Караблин, М.М. Учет пространственной изменчивости физикомеханических свойств техногенного массива гидроотвала при отработке намывных отложений / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 2. – С. 34 – 42.

109. Караблин, М.М. Оценка повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей / М.М. Караблин, С.М. Простов // Вестник КузГТУ. – 2021. – № 4. – С. 66 – 76.

Фрагмент программы расчета коэффициента анизотропии акустиче-

```
ских свойств пород прибортового массива
```

```
unit FindEllips3D;
var
  SeismopunctTotal: Integer;
type
  Vec1 = array [1 .. 3] of Double;
  Vec2 = array [1 .. 100] of Double;
function FF(M: Vec1; T: Double):
Double;
function MF(M: Vec1; T, F: Vec2):
Double;
procedure FindMin2D(M0: Vec1; T, F:
Vec2; Delta: Double; var MM: Vec1;
 var ZM: Double);
procedure FindMinSA(M0: Vec1; T, F:
Vec2; T0, TMIN, RT: Double; NS, NT:
Integer;
 var MM: Vec1; var ZM: Double);
function FF(M: Vec1; T: Double):
Double;
var
  A, AA, B, BB, GAM: Double;
begin
 A := M[1];
 B := M[2];
 GAM := M[3];
  AA := Cos(T) * Cos(GAM) + Sin(T) *
Sin(GAM);
  BB := Sin(T) * Cos(GAM) - Cos(T) *
Sin(GAM);
 FF := A * B / Sqrt (AA * AA * A * A
+ BB * BB * B * B);
end;
function MF(M: Vec1; T, F: Vec2):
Double;
var
  S, Q: Double;
 k: Integer;
begin
  S := 0;
  for k := 1 to SeismopunctTotal do
  begin
    Q := F[k] - FF(M, T[k]);
    S := S + Power(Q, 2);
  end;
  Result := S;
end;
procedure FindMin3D(M0: Vec1; T, F:
Vec2; Delta: Double; var MM: Vec1;
 var ZM: Double);
var
```

program LandslideFactorProject;

```
Alf, Bet, Z0, Z1, Z2, k: Double;
  I, KK, J: Integer;
  M1, M2, R: Vec1;
begin
  Alf := (Sqrt(5.0) + 1.0) * 0.5;
  Bet := (Sqrt(5.0) - 1.0) * 0.5;
  ZO := MF(MO, T, F);
  I := 1;
  k := 1.0E-2;
  while ((k >= Delta) OR (I = 300))
DO
  begin
    for KK := 1 to 10 do
    begin
      for J := 1 to 3 do
      begin
        R[J] := 2.0 * Random - 1.0;
       M1[J] := M0[J] + k * R[J];
      end;
      if (M1[1] <= 0.0) then
        M1[1] := 15.0 * Random;
      if (M1[2] <= 0.0) then</pre>
       M1[2] := 15.0 * Random;
      if (M1[3] <= 0.0) or (M1[3] >=
Pi / 2.0) then
        M1[3] := Pi * Random / 2.0;
      Z1 := MF(M1, T, F);
      if (Z1 < Z0) then
      begin
        for J := 1 to 3 do
        begin
          M2[J] := M1[J] + Alf *
(M1[J] - M0[J]);
        end;
        if (M2[1] <= 0.0) then
          M2[1] := 15.0 * Random;
        if (M2[2] <= 0.0) then
         M2[2] := 15.0 * Random;
        if (M1[3] <= 0.0) or (M1[3]
>= Pi / 2.0) then
          M1[3] := Pi * Random /
2.0;
        Z2 := MF(M2, T, F);
        if (Z2 < Z1) then
        begin
          for J := 1 to 3 do
          begin
           M0[J] := M2[J];
          end;
          ZO := Z2;
          k := k * Alf;
        end
        else
        begin
          for J := 1 to 3 do
          begin
           MO[J] := M1[J];
          end;
```

ZO := Z1; k := k * Alf; end end else begin FOR J := 1 to 3 do begin MO[J] := MO[J];end; Z0 := Z0;end; end; k := Bet * k; I := I + 1;end; for J := 1 to 3 do begin MM[J] := M2[J]; end; ZM := MF(MM, T, F);end; procedure FindMinSA(M0: Vec1; T, F: Vec2; T0, TMIN, RT: Double; NS, NT: Integer; var MM: Vec1; var ZM: Double); var V0, M1, C, NUM, MQ: Vec1; ZO, Z1, ZQ, R1, D01, P, RATIO: Double; J, I, M, jj, h, II: Integer; begin for J := 1 to 3 do begin V0[J] := 1.0E0; C[J] := 2.0E0; MM[J] := M0[J]; NUM[J] := 0.0E0; end; ZO := MF(MO, T, F);ZM := Z0; while (TO >= TMIN) do begin for M := 1 to NT do begin for jj := 1 to NS do begin for h := 1 to 3 do begin for I := 1 to 3 do begin if (I = h) then begin R1 := 2.0E0 * Random -1.0E0: M1[I] := M0[I] + V0[I] * R1; end else begin M1[I] := M0[I]; end: if (I = 3) then

begin if (M1[I] <= 0.0) OR (M1[I] >= Pi() / 2.0) then begin M1[I] := Pi() * Random / 2.0E0; end; end else begin if (M1[I] <= 0.0) then begin M1[I] := 15.0 * Random; end; end; end; Z1 := MF(M1, T, F); if (Z1 <= Z0) then begin IF (Z1 < ZM) then begin for J := 1 to 3 do begin MM[J] := M1[J];end; ZM := Z1; end; for J := 1 to 3 do begin M0[J] := M1[J]; end: Z0 := Z1;NUM[h] := NUM[h] + 1; end else begin := (Z1 - Z0) D01 - 7 MAX(ABS(Z1), ABS(Z0)); P := EXP(-D01 / T0); P := P / (P + 1.0E0); if (P >= Random) then begin for J := 1 to 3 do begin MO[J] := M1[J];end; Z0 := Z1;NUM[h] := NUM[h] + 1; end else begin for J := 1 to 3 do begin MO[J] := MO[J];end; Z0 := Z0;end; end: end; end; for II := 1 to 3 do begin RATIO := NUM[II] / NS;

if (RATIO > 0.6) then begin V0[II] := V0[II] * (1.0E0 + C[II] * ((RATIO - 0.60E0) / 0.40E0)); end else begin if (RATIO < 0.40E0) then begin V0[II] := V0[II] / (1.0E0 + C[II] * ((0.40E0 - RATIO) / 0.40E0)); end else begin VO[II] := MIN(VO[II]),10.0); end; end; end; for J := 1 to 3 do begin NUM[J] := 0.0E0;end; end; TO := TO * RT; if (ABS(Z0 - ZM) <= 1.0E-4) then begin for J := 1 to 3 do begin MM[J] := MM[J];end; ZM := ZM; Break: end else begin for J := 1 to 3 do begin MO[J] := MM[J];end; ZO := ZM; end; end; FindMin3D(MM, T, F, 1.0E-6, MQ, ZQ); MM := MQ; ZM := ZQ; end; procedure FindMin2D(M0: Vec1; T, F: Vec2; Delta: Double; var MM: Vec1; var ZM: Double); var Alf, Bet, ZO, Z1, Z2, R1, R2, k: Double; I, KK, J: Integer; M1, M2: Vec1; begin Alf := (Sqrt(5.0) + 1.0) * 0.50;Bet := (Sqrt(5.0) - 1.0) * 0.50; ZO := MF(MO, T, F);

I := 1;k := 0.1;while ((k >= Delta) or (I = 300)) do begin for KK := 1 to 10 do begin R1 := 2.0 * Random - 1.0; R2 := 2.0 * Random - 1.0; M1[1] := M0[1] + k * R1; M1[2] := M0[2] + k * R2; M1[3] := M0[3];if (M1[1] <= 0.0) then M1[1] := 15.0 * Random; if (M1[2] <= 0.0) then M1[2] := 15.0 * Random; Z1 := MF(M1, T, F);if (Z1 < Z0) then begin M2[1] := M1[1] + Alf * (M1[1] - M0[1]); M2[2] := M1[2] + Alf * (M1[2] - M0[2]); M2[3] := M1[3];**if** (M2[1] <= 0.0) **then** M2[1] := 15.0 * Random; if (M2[2] <= 0.0) then M2[2] := 15.0 * Random; Z2 := MF(M2, T, F);if (Z2 < Z1) then begin for J := 1 to 3 do begin M0[J] := M2[J]; end; ZO := Z2; k := k * Alf; end else begin for J := 1 to 3 do begin M0[J] := M1[J]; end; Z0 := Z1;k := k * Alf; end end else begin for J := 1 to 3 do begin MO[J] := MO[J];end; ZO := ZO; end; end; k := Bet * k; I := I + 1;end; **for** J := 1 to 3 do begin MM[J] := M0[J];end;

```
ZM := MF(MM, T, F);
end;
end.
unit LandslideFactor;
var
  T, F, FT: Vec2;
  AnisotropFactor: Double;
procedure TForm1.ButtonCalc(Sender:
TObject);
var
  i: Integer;
  M0, MM: Vec1;
  ZM, GAMM: Double;
begin
  Randomize;
  SeismopunctTotal
                    := CountSeis-
mopunkt (StrGrdAheadWaveSpeed);
  for i := 1 to SeismopunctTotal do
  begin
    F[i]
                      ReadFromColTa-
             :=
ble(StrGrdAheadWaveSpeed, 2, i);
    T[i]
                                   :=
DegToRad (ReadFromColTable (StrGrdAhea
dWaveSpeed, 1, i));
  end;
  if
      (RadioGroup1.ItemIndex = 0)
then
  begin
   MO[1] := 1;
    MO[2] := 1;
    MO[3] := 0;
    FindMinSA(MO, T, F, 5, 1.0E-5,
0.95, 5, 5, MM, ZM);
  end
  else
  begin
    GAMM
                                   :=
StrToFloatSafe (EditUgolNaklonaEllips
a.Text);
    MO[1] := 1;
    MO[2] := 1;
    MO[3] := GAMM * PI / 180;
    FindMin2D(M0, T, F, 1.0E-10, MM,
ZM);
  end;
  StrGrdAheadWaveSpeed.Cells[3,
                                  0]
:= 'Vp(теор)';
  for i := 1 to SeismopunctTotal do
  begin
    FT[i] := FF(MM, T[i]);
    StrGrdAheadWaveSpeed.Cells[3, i]
:= Round(FT[i]).ToString;
  end;
  AnisotropFactor := IfThen(MM[1] >
MM[2], MM[1] / MM[2], MM[2] /
MM[1]);
  DrawDiagram(F, T);
end;
```

```
end.
```

Фрагмент программы расчета мощности рыхлых четвертичных

отложений по результатам электрических зондирований

```
program MoshnostSloyaProject;
unit MoshnostSloya;
var
  Form1: TForm1;
  GeoArray: TPointArray;
procedure
TForm1.CalculateButtonClick(Sender:
TObject);
var
  s: string;
  i, j, k: Integer;
  Schet: Integer;
  IndexArray: array of Integer;
begin
  SetLength (GeoArray,
                       ElectroPhys-
icsDataStringGrid.RowCount - 1);
  PointToArray (GeoArray);
  Schet := 0;
  for i := 0 to Length(GeoArray) - 1
do
 begin
    if GeoArray[i].IsVEZ then
      Schet := Schet + 1;
  end;
  SetLength(IndexArray, Schet);
  k := 0;
  for j := 0 to Length (GeoArray) - 1
do
 begin
    if GeoArray[j].IsVEZ then
    begin
      IndexArray[k] := j;
      k := k + 1;
    end;
  end;
  for k := 1 to Length(IndexArray) -
1 do
 begin
    i := IndexArray[k - 1] + 1;
    while i < IndexArray[k] do</pre>
    begin
      if i < IndexArray[k] then</pre>
      begin
        GeoArray[i].r1
                             GeoAr-
                        :=
ray[IndexArray[k - 1]].r1 +
          ((GeoArray[i].x - GeoAr-
ray[IndexArray[k - 1]].x) /
          (GeoArray[IndexArray[k]].x
- GeoArray[IndexArray[k - 1]].x)) *
          (GeoAr-
ray[IndexArray[k]].r1
                               GeoAr-
ray[IndexArray[k - 1]].r1);
        GeoArray[i].r2
                               GeoAr-
                        :=
ray[IndexArray[k - 1]].r2 +
          ((GeoArray[i].x - GeoAr-
```

```
ray[IndexArray[k - 1]].x) /
          (GeoArray[IndexArray[k]].x
- GeoArray[IndexArray[k - 1]].x)) *
          (GeoAr-
ray[IndexArray[k]].r2
                               GeoAr-
                         -
ray[IndexArray[k - 1]].r2);
        ElectroPhysicsDataString-
Grid.Cells[3, i + 1] :=
          FloatTo-
Str(RoundTo(GeoArray[i].r1, -1));
        ElectroPhysicsDataString-
Grid.Cells[4, i + 1] :=
          FloatTo-
Str(RoundTo(GeoArray[i].r2, -1));
      end;
      i := i + 1;
    end;
  end:
  for i := 0 to Length(GeoArray) - 1
do
  begin
    MoshnostVTochke(GeoArray[i]);
    ElectroPhysicsDataString-
Grid.Cells[5, i + 1] :=
      FloatTo-
Str(RoundTo(GeoArray[i].m, -1));
  end;
  DrawChart;
  SetLength (GeoArray, 0);
end;
procedure
             TForm1.PointToArray(var
NewPointArray: TPointArray);
var
  RowIndex, ColIndex: Integer;
  NewPoint: TPoint;
begin
  for RowIndex := 1 to ElectroPhys-
icsDataStringGrid.RowCount - 1 do
 begin
    for ColIndex := 0 to Electro-
PhysicsDataStringGrid.ColCount -
do
    begin
      case ColIndex of
        0:
               (ElectroPhysicsDataS-
          if
tringGrid.Cells[ColIndex, RowIndex]
<> ' - ' )
          then
            NewPoint.IsVEZ := True
          else
            NewPoint.IsVEZ := False;
        1:
          NewPoint.x
                                   :=
StrToFloatSafe (ElectroPhysicsDataStr
ingGrid.Cells
```

```
[ColIndex, RowIndex]);
        2:
         NewPoint.rok
                                 :=
StrToFloatSafe (ElectroPhysicsDataStr
ingGrid.Cells
            [ColIndex, RowIndex]);
        3:
          if NewPoint.IsVEZ then
            NewPoint.rl
                                 :=
StrToFloatSafe(ElectroPhysicsDataStr
ingGrid.Cells
              [ColIndex, RowIndex])
          else
           NewPoint.r1 := 0;
        4:
          if NewPoint.IsVEZ then
           NewPoint.r2
                                 :=
StrToFloatSafe (ElectroPhysicsDataStr
ingGrid.Cells
             [ColIndex, RowIndex])
          else
           NewPoint.r2 := 0;
      end;
      NewPoint.HalfAB
                                  :=
StrToFloat(HalfABEdit.Text);
    end:
    NewPointArray[RowIndex - 1] :=
NewPoint;
  end;
end;
unit RaschetMoshnosti;
type
  TPoint = record
   IsVEZ: Boolean;
   x, rok, r1, r2, m, HalfAB: Dou-
ble;
  end;
  TPointArray = array of TPoint;
  TMatrix = array [0 .. 100, 0 ..
100] of Double;
  TVector = array [0 .. 100] of Dou-
ble;
procedure MoshnostVTochke (var New-
Point: TPoint);
procedure InputData(KK: Double; n:
integer; var x, f: TVector);
var
 i: integer;
begin
 for i := 0 to 100 do
 begin
   x[i] := 0.01 * i;
   f[i] := 2.0 * KK * x[i] / (1.0E0
- KK * x[i]);
  end;
end;
```

```
function Ex(a: Double; n: integer):
Double;
var
 e: Double;
  i: integer;
begin
 e := 1;
 for i := 1 to n do
  e := e * a;
  Result := e;
end;
procedure Gram(n, m: integer; var x,
f: TVector; var a: TMatrix);
var
 p, q, R, s: Double;
 i, j: integer;
begin
  for j := 0 to m do
  begin
   s := 0;
    R := 0;
    q := 0;
    for i := 0 to n do
    begin
     p := Ex(x[i], j);
     s := s + p;
     R := R + p * f[i];
     q := q + p * Ex(x[i], m);
    end;
    a[0, j] := s;
    a[j, m] := q;
    a[j, m + 1] := R;
  end:
  for i := 1 to m do
    for j := 0 to m - 1 do
     a[i, j] := a[i - 1, j + 1];
end;
procedure Gauss(n: integer; var a:
TMatrix; var x: TVector);
var
  k1, n1, k, j, i: integer;
  R, s: Double;
begin
  n1 := n + 1;
  for k := 0 to n do
  begin
    k1 := k + 1;
    s := a[k, k];
    for j := k1 to n1 do
      a[k, j] := a[k, j] / s;
    for i := k1 to n do
    begin
      R := a[i, k];
     for j := k1 to n1 do
       a[i, j] := a[i, j] - a[k, j]
* R;
    end;
  end;
  for i := n downto 0 do
  begin
    s := a[i, n1];
    for j := i + 1 to n do
```

```
s := s - a[i, j] * x[j];
    x[i] := s;
  end:
end;
function ROT(CF: TVector; R, k, H:
Double): Double;
var
  s: Double;
  i: integer;
begin
  if (Abs(k) <= 1.0E-6) then
  begin
   ROT := 1.0;
  end
  else if (Abs(H) <= 1.0E-6) then
  begin
    ROT := (1.0 + k) / (1.0 - k);
  end
  else
  begin
   s := 1.0;
    for i := 1 to 46 do
    begin
      s := s + (CF[i] * Power(R, 3))
1
        (Power(Power(R, 2) + Pow-
er((2.0 * i * H), 2), 1.5));
    end;
    ROT := s;
  end;
end;
function MF(rok, R, k, H: Double;
CF: TVector): Double;
begin
 MF := Power(rok - ROT(CF, R, k,
H), 2);
end;
procedure Gold(a, b, EPS, rok, R, k:
Double; CF: TVector; var XM: Dou-
ble);
var
 q, a0, b0, d, ya0, yb0: Double;
begin
  q := (sqrt(5.0) - 1.0) * 0.5;
  a0 := b - q * (b - a);
  b0 := a + b - a0;
  ya0 := MF(rok, R, k, a0, CF);
  yb0 := MF(rok, R, k, b0, CF);
  d := Abs(yb0 - ya0);
  while d > EPS do
  begin
    if (ya0 < yb0) then
   begin
     b := b0;
     b0 := a0;
      yb0 := ya0;
      a0 := b - q * (b - a);
      ya0 := MF(rok, R, k, a0, CF);
    end
    else
    begin
```

```
a := a0;
      a0 := b0;
      ya0 := yb0;
      b0 := a + b - a0;
      yb0 := MF(rok, R, k, b0, CF);
    end;
    d := Abs(yb0 - ya0);
  end;
  XM := (a0 + b0) / 2.0;
end;
procedure MoshnostVTochke (var New-
Point: TPoint);
var
  n, m: integer;
 x, f, c: TVector;
  a: TMatrix;
  AA, BB, KK, EPS, rok, R, HOPT,
RO1, RO2: Double;
begin
  n := 100;
  m := 45;
  AA := 0.0E0;
  BB := 300.0E0;
  EPS := 1.0E-6;
  RO1 := NewPoint.r1;
  rok := NewPoint.rok;
  rok := rok / RO1;
  RO2 := NewPoint.r2;
  KK := (RO2 - RO1) / (RO2 + RO1);
  R := NewPoint.HalfAB;
  InputData(KK, n, x, f);
  Gram(n, m, x, f, a);
  Gauss(m, a, c);
  Gold (AA, BB, EPS, rok, R, KK, c,
NewPoint.m);
end;
```

```
end.
```

Фрагмент программы «Устойчивый борт»

```
unit Unit6;
interface
type
    const
   x1 = 0;
    y1 = 0;
  end;
var
  Form6: TForm6;
  xls: OleVariant;
  ex, op: Boolean;
  Acad: OleVariant;
  acadmtext: OleVariant;
  xx: Real;
  f, c, y, fshtrih, cshtrih: Real;
  h, b, shaq, alfa, beta, a: Real;
  w, e, h90, q: Real;
  x2, x3, x4, x5, y5, x6, x7, x8, x9,
x10, y6, y7, y8, y9, y10, 158, 156,
    157: Real;
 ugol3, ugol01, r, x01, y01, cc, aa,
bb, dd, ugol110: Real;
  xb, yb, xa, ya, x11, y11, ub1, ub2,
lbok1, lbok2, s1, s2, s3, cu1, cu2,
sseg1,
   sseg2: Real;
  p: array [1 .. 22, 1 .. 4] of Real;
  mnog: array [1 .. 3, 1 .. 10] of
Real;
  ves1,
        ves2, ves3, cosn1, cosn2,
cosn3, cbok1, cbok2, lsum: Real;
 nevyazka, minnevyazka, amin,
                                 x0,
y0, asum1, asr1, asum2, asr2: Real;
  schet, c0: Integer;
implementation
```

```
procedure TForm6.Button1Click(Sender:
TObject);
var
  i, j: Integer;
begin
  with Form5.StringGrid1 do
  begin
    RowCount := 1;
    rows[schet].clear;
  end;
  schet := 0;
  f := StrToFloat(Edit1.text);
  c := StrToFloat(Edit2.text);
  y := StrToFloat(Edit3.text);
  fshtrih := StrToFloat(Edit4.text);
  cshtrih := StrToFloat(Edit5.text);
 h := StrToFloat(Edit6.text);
  b := StrToFloat(Edit7.text);
  shag := StrToFloat(Edit8.text);
```

```
alfa := StrToFloat(Edit9.text);
 beta := StrToFloat(Edit10.text);
  w := 45 + f / 2;
  e := 45 - f / 2;
 h90
      := 2
                           1
                      С
                                (y
tan(DegToRad(e)));
  q := 45 + 0.5 * (f - fshtrih) - 0.5
                               radto-
deg(ArcSIN((SIN(DegToRad(fshtrih))) /
(SIN(DegToRad(f))));
 minnevyazka := 900000000000000;
  a := 0;
  while (a + shag) <= b do</pre>
 begin
   inc(schet);
    a := shag + a;
   x2 := h / tan(DegToRad(alfa));
    x3 := x2 + b;
   x4 := x2 + a;
    x5 := x4;
    y5 := h - h90;
    x10 := x2;
    v10 := h - h90;
    x9 := x3 * COS (DegToRad (beta));
    y9 := x3 * SIN(DegToRad(beta));
   x8
       :=
                (y5
                              x5
tan(DegToRad(w))) /
      (tan (DegToRad (beta))
tan(DegToRad(w)));
    y8 := x8 * tan(DegToRad(beta));
    158 := sqrt(sqr(x5 - x8) + sqr(y5
- y8));
   156 := (158 * SIN(DegToRad(180 -
w + beta))) /
     (SIN(DegToRad(180 - w + beta))
+ SIN(DegToRad(q));
                             156
                                     *
   хб
        :=
                 x5
COS (DegToRad (w));
                 y5
    yб
       :=
                             156
SIN(DegToRad(w));
   x7
       :=
                хб
                             156
                                     *
COS (DegToRad (beta + q));
                                     *
   y7
        :=
                yб
                             156
SIN(DegToRad(beta + q));
   157 := sqrt(sqr(y5 - y7) + sqr(x5
- x7));
   ugol3 := radtodeg(ArcTan((y5
y7) / (x5 - x7)) + 90 - w;
    ugol01 := 180 - 2 * ugol3;
    r := 157 * SIN(DegToRad(ugol3)) /
SIN(DegToRad(ugol01));
   x01 := x5 + r * COS(DegToRad(90 +
w));
   y01 := y5 + r * SIN(DegToRad(90 +
w)):
   cc := y10 - x10 * tan(DegToRad(90
+ e));
   aa := 1 + sqr(tan(DegToRad(90 +
e)));
       := −2 * (−cc + y01)
   bb
```

tan(DegToRad(90 + e)) - 2 * x01; dd := sqr(y01 - cc) - sqr(r) + sqr(x01); ugol110 := radtodeg(ArcTan((y10)) / (x10))); xb := (-bb + sqrt(sqr(bb) - 4 * aa * dd)) / (2 * aa); yb := xb * tan(DegToRad(90 + e)) + cc; xa := (y7 - x7 * tan(DegToRad(90 - f + q + beta))) / (tan (DegToRad (ugol110)) tan(DegToRad(90 - f + beta + q))); уа := хa tan(DegToRad(ugol110)); x11 := xa; y11 := x11 * tan(DegToRad(alfa)); p[1, 1] := x5; p[1, 2] := y5; i := 1; asum1 := 0;for j := 0 to 9 do begin inc(i); p[i, 1] := p[i - 1, 1] - (x5 xb) / 10; p[i, 2] := y01 - sqrt(sqr(r) sqr(-x01 + p[i, 1])); p[i, 3] := radtodeg(ArcTan((p[i - 1, 2] - p[i, 2]) / (p[i - 1, 1] - p[i, 1]))); asum1 := asum1 + p[i, 3]; asr1 := asum1 / 10; end; ub1 := radtodeg(ArcTan((p[11, 2] - y10) / (p[11, 1] - x10))) + 180; lbok1 := sqrt(sqr(p[11, 2] - y10) + sqr(p[11, 1] - x10)); cu1 * := radtodeg(ArcSIN(sqrt(sqr(x5 - xb) + sqr(y5 - yb)) / (2 * r))); sseq1 := (sqr(r) 1 2) (DegToRad(cu1) - SIN(DegToRad(cu1))); s1 := a * h90 + (h - h90 - yb) * 0.5 * a + sseg1; lsum := cul * r * pi / 180; ves1 := s1 * y; cosn1 := lsum * c; cbok1 := lbok1 * c; asum2 := 0; for j := 0 to 9 do begin inc(i); p[i, 1] := p[i - 1, 1] - (xb x7) / 10; p[i, 2] := y01 - sqrt(sqr(r) sqr(-x01 + p[i, 1])); p[i, 3] := radtodeg(ArcTan((p[i - 1, 2] - p[i, 2]) / (p[i - 1, 1] - p[i, 1]))); asum2 := asum2 + p[i, 3]; asr2 := asum2 / 10; end; ub2 := radtodeg(ArcTan((-p[21, 1]

139

+ xa) / (-p[21, 2] + ya))); 1bok2 := sqrt(sqr(p[21, 2] - ya))+ sqr(p[21, 1] - xa)); * C112 := radtodeg(ArcSIN(sqrt(sqr(x7 - xb) + sqr(y7- yb)) / (2 * r))); := (sqr(r) 1 sseg2 2) (DegToRad(cu2) - SIN(DegToRad(cu2))); s2 := sseg2 + ((y11 - ya) + (h y10)) * 0.5 * (x2 - x11) + 0.5 * ((x7 * yb - xb * y7) + (xb * y10 - yb * x10) + (x10 * ya - y10 * xa) + (xa * y7 - x7 * ya)); lsum := cu2 * r * pi / 180; ves2 := s2 * y; cosn2 := lsum * c; cbok2 := lbok2 * c; s3 := 0.5 * ABS((p[21, 1]) (p[21, 2]) + (-xa) * (ya) + (xa p[21, 1]) * (p[21, 2] + ya)) + 0.5 * (xa * y11 - y11 * ya); ves3 := s3 * y; cosn3 := sqrt(sqr(x7) + sqr(y7))* cshtrih; mnog[1, 1] := 0; mnog[1, 2] := 0; mnog[1, 3] := 0;mnog[1, 4] := mnog[1, 2] - ves1; mnog[1, 5] := mnog[1, 3] + cosn1* COS(DegToRad(asr1)); mnog[1, 6] := mnog[1, 4] + cosn1* SIN(DegToRad(asr1)); mnog[1, 7] := mnog[1, 5] + cbok1 * COS(DegToRad(ub1)); mnog[1, 8] := mnog[1, 6] + cbok1 * SIN(DegToRad(ub1)); mnog[1, 9] := (mnog[1, 7] mnog[1, 8] * tan(DegToRad(e))) / (1 - tan(DegToRad(e)) 1 tan(DegToRad(180 - asr1 + f))); mnog[1, 10] := mnog[1, tan(DegToRad(180 - asr1 + f)); 91 1 mnog[2, 1] := mnog[1, 5]; mnog[2, 2] := mnog[1, 6]; mnog[2, 3] := mnog[2, 1]; mnog[2, 4] := mnog[2, 2] - ves2; mnog[2, 5] := mnog[2, 3] + cosn2* COS(DegToRad(asr2)); mnog[2, 6] := mnog[2, 4] + cosn2* SIN(DegToRad(asr2)); mnog[2, 7] := mnog[2, 5] + cbok2 * SIN(DegToRad(ub2)); mnoq[2, 8] := mnoq[2, 6] + cbok2* COS(DegToRad(ub2)); mnog[2, 9] := (mnog[2, 8])mnog[2, 7] * tan(DegToRad(q + beta)) - mnog[1, + mnog[1, 9] 10] tan(DegToRad((90 - f) + asr2))) / (-tan(DegToRad(q + beta)) + tan(DegToRad((90 - f) + asr2))); * mnog[2, 10] := mnog[2, 9]

140

tan(DegToRad((90 - f) + asr2))+ mnog[1, 10] mnog[1, 9] * tan(DegToRad((90 f) + asr2)); mnog[3, 1] := mnog[2, 5]; mnog[3, 2] := mnog[2, 6]; mnog[3, 3] := mnog[3, 1]; mnog[3, 4] := mnog[3, 2] - ves3; mnog[3, 5] := mnog[3, 3] + cosn3* COS (DegToRad (beta)); mnog[3, 6] := mnog[3, 4] + cosn3 * SIN(DegToRad(beta)); mnog[3, 7] := (mnog[3, 4])mnog[3, 3] * tan(DegToRad(beta)) mnog[2, 10] + mnog[2, 9] * tan(DegToRad((90 fshtrih) + beta))) / (tan(DegToRad((90 - fshtrih))) beta)) - tan(DegToRad(beta))); mnog[3, 8] := mnog[3,71 * tan(DegToRad(beta)) + mnog[3, 4] mnog[3, 3] * tan (DegToRad (beta)); if (mnog[3, 5] - mnog[3, 7]) >= 0 then nevyazka := sqrt(sqr(mnog[3, 5] - mnog[3, 7]) + sqr(mnog[3, 6] - mnog[3, 8])) else nevyazka := -sqrt(sqr(mnog[3, 5] - mnog[3, 7]) + sqr(mnog[3, 6] mnog[3, -8])); if nevyazka < minnevyazka then amin := a; minnevyazka := nevyazka; with Form5.StringGrid1 do begin RowCount := RowCount + 1; floatto-Cells[0, schet] := str(a); Cells[1, schet] := floattostr(RoundTo(nevyazka, -3)); end; end; a := amin; x2 := h / tan(DegToRad(alfa)); x3 := x2 + b; x4 := x2 + a; x5 := x4; y5 := h - h90; x10 := x2; y10 := h - h90; x9 := x3 * COS (DegToRad (beta)); y9 := x3 * SIN(DegToRad(beta)); x8 := (y5 - x5 * tan(DegToRad(w))) (tan (DegToRad (beta)) / tan(DegToRad(w)); y8 := x8 * tan(DegToRad(beta)); 158 := sqrt(sqr(x5 - x8) + sqr(y5 v8)); 156 := (158 * SIN(DegToRad(180 - w + beta))) / (SIN(DegToRad(180 - w + beta)) +

SIN(DegToRad(q)); x6 := x5 - 156 * COS(DegToRad(w)); y6 := y5 - 156 * SIN(DegToRad(w)); x7 := x6 - 156 * COS (DegToRad (beta + q)); y7 := y6 - 156 * SIN (DegToRad (beta + q)); 157 := sqrt(sqr(y5 - y7) + sqr(x5 x7)); ugol3 := radtodeg(ArcTan((y5 - y7) / (x5 - x7)) + 90 - w;ugol01 := 180 - 2 * ugol3; r := 157 * SIN(DegToRad(ugol3)) / SIN(DegToRad(ugol01)); x01 := x5 + r * COS(DegToRad(90 + w)); y01 := y5 + r * SIN(DegToRad(90 + w)); cc := y10 - x10 * tan(DegToRad(90 + e)); aa := 1 + sqr(tan(DegToRad(90)) e))); := −2 ***** (−cc + bb y01) * tan (DegToRad (90 + e)) - 2 * x01; dd := sqr(y01 - cc) - sqr(r)sqr(x01); ugol110 := radtodeg(ArcTan((y10) 1 (x10))); xb := (-bb + sqrt(sqr(bb) - 4 * aa * dd)) / (2 * aa); yb := xb * tan(DegToRad(90 + e)) + CC; xa := (y7 - x7 * tan(DegToRad(90 f + q + beta))) / (tan(DegToRad(ugol110)) tan(DegToRad(90 - f + beta + q)));ya := xa * tan(DegToRad(ugol110)); x11 := xa; y11 := x11 * tan(DegToRad(alfa)); p[1, 1] := x5;p[1, 2] := y5; i := 1; asum1 := 0; **for** j := 0 **to** 9 **do** begin inc(i); p[i, 1] := p[i - 1, 1] - (x5 xb) / 10; 2] := y01 - sqrt(sqr(r) p[i, sqr(-x01 + p[i, 1])); p[i, 3] := radtodeg(ArcTan((p[i -1, 2] - p[i, 2]) / (p[i - 1, 1] - p[i, 1]))); asum1 := asum1 + p[i, 3]; asr1 := asum1 / 10; end; ub1 := radtodeg(ArcTan((p[11, 2] y10) / (p[11, 1] - x10))) + 180; lbok1 := sqrt(sqr(p[11, 2] - y10) + sqr(p[11, 1] - x10)); * radtocu1 := deg(ArcSIN(sqrt(sqr(x5 - xb) + sqr(y5 - yb)) / (2 * r))); * ssegl := (sqr(r) 2)

```
(DegToRad(cu1) - SIN(DegToRad(cu1)));
 s1 := a * h90 + (h - h90 - yb) *
0.5 * a + sseg1;
  lsum := cul * r * pi / 180;
 ves1 := s1 * y;
 cosn1 := lsum * c;
 cbok1 := lbok1 * c;
 asum2 := 0;
 for j := 0 to 9 do
 begin
    inc(i);
   p[i, 1] := p[i - 1, 1] - (xb -
x7) / 10;
   p[i, 2] := y01 - sqrt(sqr(r) -
sqr(-x01 + p[i, 1]));
   p[i, 3] := radtodeg(ArcTan((p[i -
1, 2] - p[i, 2]) / (p[i - 1,
     1] - p[i, 1])));
    asum2 := asum2 + p[i, 3];
    asr2 := asum2 / 10;
 end;
 ub2 := radtodeg(ArcTan((-p[21, 1] +
xa) / (-p[21, 2] + ya)));
  lbok2 := sqrt(sqr(p[21, 2] - ya) +
sqr(p[21, 1] - xa));
       :=
                         *
                               radto-
 cu2
                2
deg(ArcSIN(sqrt(x7 - xb) + sqr(y7))
- yb)) / (2 * r)));
         :=
  sseg2
               (sqr(r)
                         1
                              2)
(DegToRad(cu2) - SIN(DegToRad(cu2)));
  s2 := sseg2 + ((y11 - ya) + (h -
y10)) * 0.5 * (x2 - x11) + 0.5 *
   ((x7 * yb - xb * y7) + (xb * y10
- yb * x10) + (x10 * ya - y10 * xa) +
    (xa * y7 - x7 * ya));
  lsum := cu2 * r * pi / 180;
 ves2 := s2 * y;
 cosn2 := lsum * c;
 cbok2 := lbok2 * c;
 s3 := 0.5 * ABS((p[21, 1]) * (p[21,
2]) + (-xa) * (ya) + (xa - p[21, 1])
    (p[21, 2] + ya)) + 0.5 * (xa *
y11 - y11 * ya);
 ves3 := s3 * y;
 cosn3 := sqrt(sqr(x7) + sqr(y7)) *
cshtrih;
 mnog[1, 1] := 0;
 mnog[1, 2] := 0;
 mnog[1, 3] := 0;
 mnog[1, 4] := mnog[1, 2] - ves1;
 mnog[1, 5] := mnog[1, 3] + cosn1 *
COS (DegToRad (asr1));
 mnog[1, 6] := mnog[1, 4] + cosn1 *
SIN(DegToRad(asr1));
 mnog[1, 7] := mnog[1, 5] + cbok1 *
COS (DegToRad (ub1));
 mnog[1, 8] := mnog[1, 6] + cbok1 *
SIN(DegToRad(ub1));
 mnog[1, 9] := (mnog[1, 7] - mnog[1,
```

```
8] * tan(DegToRad(e))) /
   (1 -
                tan (DegToRad (e) )
                                      1
tan(DegToRad(180 - asr1 + f)));
 mnog[1, 10] := mnog[1,
                                91
                                      1
tan(DegToRad(180 - asr1 + f));
 mnog[2, 1] := mnog[1, 5];
 mnog[2, 2] := mnog[1, 6];
 mnog[2, 3] := mnog[2, 1];
 mnog[2, 4] := mnog[2, 2] - ves2;
 mnog[2, 5] := mnog[2, 3] + cosn2 *
COS (DegToRad (asr2));
 mnog[2, 6] := mnog[2, 4] + cosn2 *
SIN(DegToRad(asr2));
 mnog[2, 7] := mnog[2, 5] + cbok2 *
SIN (DegToRad (ub2));
 mnog[2, 8] := mnog[2, 6] + cbok2 *
COS (DegToRad (ub2));
 mnog[2, 9] := (mnog[2, 8] - mnog[2,
7] * tan(DegToRad(q + beta)) - mnog[1,
10]
   + mnog[1, 9] * tan(DegToRad((90 -
f) + asr2))) /
    (-tan (DegToRad (q
                      +
                            beta))
                                      +
tan(DegToRad((90 - f) + asr2)));
mnog[2, 10] := mnog[2, 9]
tan(DegToRad((90 - f) + asr2))
                                      +
mnog[1, 10] ·
   mnog[1, 9] * tan(DegToRad((90 - f)
+ asr2));
 mnog[3, 1] := mnog[2, 5];
 mnog[3, 2] := mnog[2, 6];
 mnog[3, 3] := mnog[3, 1];
 mnog[3, 4] := mnog[3, 2] - ves3;
 mnog[3, 5] := mnog[3, 3] + cosn3 *
COS (DegToRad (beta));
 mnog[3, 6] := mnog[3, 4] + cosn3 *
SIN(DegToRad(beta));
 mnog[3, 7] := (mnog[3, 4] - mnog[3,
3] * tan(DegToRad(beta)) - mnog[2, 10]
+
   mnog[2, 9] * tan(DegToRad((90 -
fshtrih) + beta))) /
   (tan(DegToRad((90 - fshtrih) + be-
ta)) - tan(DegToRad(beta)));
 mnog[3, 8] := mnog[3,
                                71
tan(DegToRad(beta)) + mnog[3,
                                 4]
mnog[3, 3] *
   tan(DegToRad(beta));
  if (mnog[3, 5] - mnog[3, 7]) >= 0
then
   nevyazka := sqrt(sqr(mnog[3, 5] -
mnog[3, 7]) +
     sqr(mnog[3, 6] - mnog[3, 8]))
 else
   nevyazka := -sqrt(sqr(mnog[3, 5] -
mnog[3, 7]) +
      sqr(mnog[3, 6] - mnog[3, 8]));
 Edit11.text
                               floatto-
                     :=
str(RoundTo(nevyazka, -3));
 Edit12.text := floattostr(a);
end;
end
```

Титульный лист «Методических указаний по созданию объемных геолого-геофизических моделей бортов угольных разрезов и прогнозу их устойчивости»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ)

> Кузбасский головной институт по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий ОАО «Кузбассгипрошахт»

СОГЛАСОВАНО: **УТВЕРЖДАЮ:**оо Директор Сибирского филиала Проректор по научной работе АО «ВНИМИ» и международным связям КузГТУ rolly Е. А. Разумов Коспок 2020г. « 28 » 202 Or. УТВЕРЖДАЮ: Генеральный директор JAO «Кузбассгипрошахт» В. Н. Каталицкий 202 Dr.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ по созданию объемных геолого-геофизических моделей бортов угольных разрезов и прогнозу их устойчивости

Научный руководитель работы: д-р. техн. наук, профессор С. М. Простов

Кемерово 2021

Приложение Д

Акт внедрения результатов исследования



Открытое акционерное общество «Кузбасский головной институт по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий»



ОАО «КУЗБАССГИПРОШАХТ»

650993, Кемеровская область - Кузбасс, г. Кемерово, ул. Николая Островского, 34 E-mail: KGSH@KGSH.ru www.KGSH.ru приёмная (3842) 58-56-56 канцелярия (3842) 58-42-78 (3842) 58-01-30



Акт

использования методических разработок, изложенных в диссертации Караблина М. М. «Разработка метода прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей»

ОАО «Кузбассгипрошахт» было принято решение по опробованию:

 методики и программные продукты обработки результатов инженерногеологических и геофизических изысканий;

 методики и программные продукты для построения триангуляционных моделей проектной или фактической поверхностей прибортового массива;

 методики и результаты обратных расчетов физико-механических параметров пород, слагающих прибортовые массивы;

 методики и программные продукты для расчета коэффициентов устойчивости откосных сооружений естественного и техногенного сложения.

Опробование осуществлялась при разработке следующих проектных документаций:

 Технико-экономическое обоснование инвестиций в реконструкцию разреза «Ангренский». Республика Узбекистан., договор № 4682П/04 от 21.11.2018 г., заказчик – АО «Узбекуголь».

– Проект строительства участка «Пихтовский» ООО «Горнорудная компания Урала» с реконструкцией Кедровского угольного разреза филиала ОАО «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез». Первая очередь., договор № 4433П/07(1)-дс от 29.06.2018 г., заказчик – АО «УК «Кузбассразрезуголь».

– Технический проект разработки Бачатского каменноугольного месторождения в границах лицензии КЕМ 11703 ТЭ и первой очереди освоения лицензии КЕМ 01613 ТР филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез». Дополнение №2, договор № 4505П/07 от 25.06.2018 г., заказчик – АО «УК «Кузбассразрезуголь».

– Технический проект разработки Новосергеевского каменноугольного месторождения в границах лицензии на право пользования недрами КЕМ 11670 ТЭ, филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Краснобродский угольный разрез». Дополнение №3, договор № 3915П/12 от 24.09.2020 г., заказчик – АО «УК «Кузбассразрезуголь».

– Технический проект разработки запасов Ольжерасского каменноугольного месторождения. Отработка запасов открытым способом на участке «Поле Шахты № 1» АО «Распадская-Коксовая». Дополнение № 3, договор № 4679П/03 от 09.01.2019 г., заказчик – АО «Распадская-Коксовая».

– Строительство разреза по добыче каменного угля на Зашуланском месторождении. 1 очередь., договор № 4675П/01 от 18.08.2016 г., заказчик – ООО «Разрезуголь».

– Технический проект разработки запасов Глушинского каменноугольного месторождения. Отработка запасов открытым способом на участках Поле шахты Черниговская, Южный, Лутугинский АО «Черниговец» и участка Щегловский ООО «Ровер», договор № 4695П/01 от 01.02.2018 г., заказчик – АО «Черниговец».

– Отработка участка Глушинского каменноугольного месторождения в границах лицензионных участков «Поле шахты Глушинская», «Барзасский», «Барзасский-2», договор № 4734П от 10.08.2020 г., заказчик – ООО СП «Барзасское товарищество».

– Технический проект разработки месторождения запасов угля открытым способом в лицензионных границах участка «Березовский Западный» ООО «Разрез Березовский, договор № 4725П/01 от 13.03.2020 г., заказчик – ООО «Разрез Березовский».

– Проект разведочных работ на участке недр «Инской-2» Уропского каменноугольного месторождения, договор № 4717/01 от 01.10.2020 г., заказчик – ООО «Разрез Пермяковский».

– Проект строительства угледобывающего участка, вскрытие и отработка Юго-Восточной части Южного блока Карьерного поля №1 Мугунского буроугольного месторождения, договор № 4705П/01 от 10.12.2018 г., заказчик – ООО «Мугунский Южный разрез».

Содержание выше указанных методик и результаты опробования представлены в диссертации Караблина М.М.

Главный инженер, к.т.н.

formy

А.В. Бабенко