


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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2022

Работа выполнена на кафедре теоретической и геотехнической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и в ОАО «Кузбасском головном институте по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий».

Научный руководитель: **Простов Сергей Михайлович**
доктор технических наук, профессор кафедры СПиЭН ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Официальные оппоненты: **Кутепов Юрий Иванович**
доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидрогеологии и экологии НЦ геомеханики и проблем горного производства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», профессор

Конурин Антон Игоревич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**

Защита состоится 02 июня 2022 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (384-2) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте организации по адресу

<http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/dissertations/>

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюленев М. А.

Общая характеристика работы

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 геофизических зондирований, обеспечивающие построение объемных геолого-геофизических 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 неустойчи-

вых зон грунтовых оснований горнотехнических сооружений для снижения риска техногенных аварий», выполненного при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические 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, инженерно-геологических 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 геолого-геофизических 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 натуральных 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 инженерно-геологических, 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 ОГГМ бортов угольных разрезов и прогнозу их устойчивости / КузГТУ, ОАО «Кузбассгипрошахт». – Кемерово, 2021. – 31 с. Методический документ согласован с Сибирским филиалом АО «ВНИМИ», 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 научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014» (Кемерово, 2014); IV международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2019); XII всероссийской, научно-практической конференции 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.

Основное содержание работы

В первой главе выполнен анализ состояния решения проблемы мониторинга строения, состояния и оценки устойчивости откосных сооружений при открытой геотехнологии.

Согласно указаниям ВНИМИ, вероятность нарушения устойчивости бортов разрезов определяется неблагоприятным сочетанием инженерно-геологических, 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.

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. Большой вклад в развитие методов предельного равновесия внесли С.П. Бахаева, А. Бишоп, Э.Л. Галустьян, С.С. Голушкевич, А.В. Жабко, Н.Н. Маслов, Н. Моргенштерн, М.Е. Певзнер, В. Прайс, У. Ренкин, В.В. Ржевский, В.Т. Сапожников, В.В. Соколовский, Е. Спенсер, К. Терцаги, В. Феллениус, Г.Л. Фисенко, Р.Р. Чугаев, Г.М. Шахунянц, О. Янбу и др. Развитие численных методов прогноза устойчивости откосных сооружений реализовано в работах А.Я. Александрова, Р. Баттерфилда, С.М. Белоцерковского, П. Бенерджи, Бребии, Н.П. Векуа, М.Н. Гольдштейна,

Т. Громадки, А.И. Каландии, С. Крауча, Т. Круза, Ч. Лея, С.Г. Михлина, Н.И. Мухеллишвили, Ф. Риццо, А. Старфилда, А.Б. Фадеева и др. Методы вероятностной оценки отражены в работах А.И. Арсентьева, Э. Г. Газиева, Э. Л. Галустьяна и др. В отечественной практике наибольшее распространение получили методы алгебраического сложения моментов сил и векторного сложения (многоугольника) сил.

Исходной информацией для прогноза устойчивости откосных сооружений являются данные о состоянии и физико-механических свойствах слагающих их горных пород, которые получают прямыми и косвенными методами физико-технического контроля. 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, обеспечивающим принципиальное повышение точности геомеханического про-

гноза. 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.

Существенный вклад в развитие экспериментальных методов контроля состояния и свойств прибортовых массивов внесли А.С. Вознесенский, О.В. Герасимов, К.А. Дорохин, Р.Н. Достовалов, А.Н. Дронов, Д.А. Зубов, А.А. Иванов, А.С. Калюжный, З.Г. Каюмов, К.Н. Константинов, А.И. Конурин, М.А. Кузнецов, Г.А. Куляндин, Ю.И. Кутепов, В.В. Левашов, К.С. Мальский, А.А. Нагибин, Ф.К. Низаметдинов, Н.Ю. Никулин, В.В. Одабаи-Фард, В.И. Панин, М.Р. Пономаренко, А.И. Посеренин, И.В. Ренард, Ю.И. Розанов, В.В. Романов, В.В. Рыбин, Н.А. Смирнов, К.О. Соколов, Ю.А. Старцев, В. Л. Шкуратник, Л.Л. Федорова, В.К. Хмелевской, Ю.В. Якубовский и др.

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

Вторая глава в рамках решения первой задачи посвящена совершенствованию методов обработки баз данных геофизических зондирований и разработке алгоритмов прогноза устойчивости откосов на основе ОГГМ.

Степень развития деформационных процессов в прибортовом массиве характеризуется коэффициентом сейсмической анизотропии \vec{K}_a , комплексно отражающем опасность оползнеобразования:

$$K_a = \frac{V_{p_{\parallel}}}{V_{p_{\perp}}}, \quad (1)$$

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

Диаграмму кругового сейсмического зондирования предложено аппроксимировать эллипсом:

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

где $A = \cos\varphi \cdot \cos\gamma + \sin\varphi \cdot \sin\gamma$; $B = \sin\varphi \cdot \cos\gamma + \cos\varphi \cdot \sin\gamma$; a , b – размеры осей эллипса, м; φ , γ – полярный угол и угол поворота большой оси эллипса, град.

Параметры эллипса a , b , γ определяют с использованием метода наименьших квадратов и адаптивного случайного поиска, являющегося 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

$$F = \sum_k [V_k - V(a, b, \gamma, \varphi_k)]^2, \quad (3)$$

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

Метод адаптивного случайного поиска также 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

$$u(r) = \frac{I\rho_1}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(r^2 + (2nh)^2)}} \right], \quad (4)$$

где r – расстояние от источника тока до точки измерения потенциала, м; ρ_1 – УЭС слоя, Ом·м; h – мощность рыхлого водонасыщенного слоя, м; I – ток источника, А; z – вертикальная координата точки измерения потенциала, м; K – коэффициент «отражения» тока на нижней границе слоев.

С использованием разложением в ряд Тейлора получена функция эффективного удельного электросопротивления (УЭС) ρ_k .

$$\rho_k(r) = \rho_1 \left[1 + \sum_{n=1}^N \frac{p(n)r^3}{(r^2 + (2nh)^2)^{1,5}} \right], \quad (5)$$

где ρ_k – значение эффективного УЭС, Ом·м; $p(n)$ – коэффициенты полинома-аппроксиманта, полученные с помощью метода наименьших квадратов.

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 j -ой точке профиля)

$$\Phi(h) = [\rho_k^T(h_j) - \rho_k^П(h_j)]^2 \quad (6)$$

Реализация ОГГМ возможна путем описания элементов приборного массива триангуляционными поверхностями за счет разбиения 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 комплекс алгоритмов, реализующих метод векторного сложения сил. Прогноз выполняют по расчетным значениям механических свойств для множества расчетных сечений. В массиве значений невязок $[F_1...F_n]$ находят наиболее напряженную поверхность скольжения с наименьшей величиной невязки ΔF_{min} . Если полученное значение невязки многоугольника сил по наиболее напряженной поверхности скольжения превышает допустимое ΔF_d , изменяют значение коэффициента запаса устойчивости n и повторяют процедуру до выполнения этого условия. Описанные выше алгоритмы реализован в компьютерных программах, на которые получены свидетельства о государственной регистрации.

Общий алгоритм прогноза устойчивости откосных сооружений на основе ОГГМ включает следующие последовательно выполняемые этапы: построение триангуляционной модели проектной или фактической поверхностей приборного массива, поверхностей естественного ослабления, разуплотненных и влагонасыщенных зон по данным инженерно-геологических и геофизических изысканий; построение геомеханической модели (ввод физико-механических свойств прибор-

тового 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 (рис. 1).

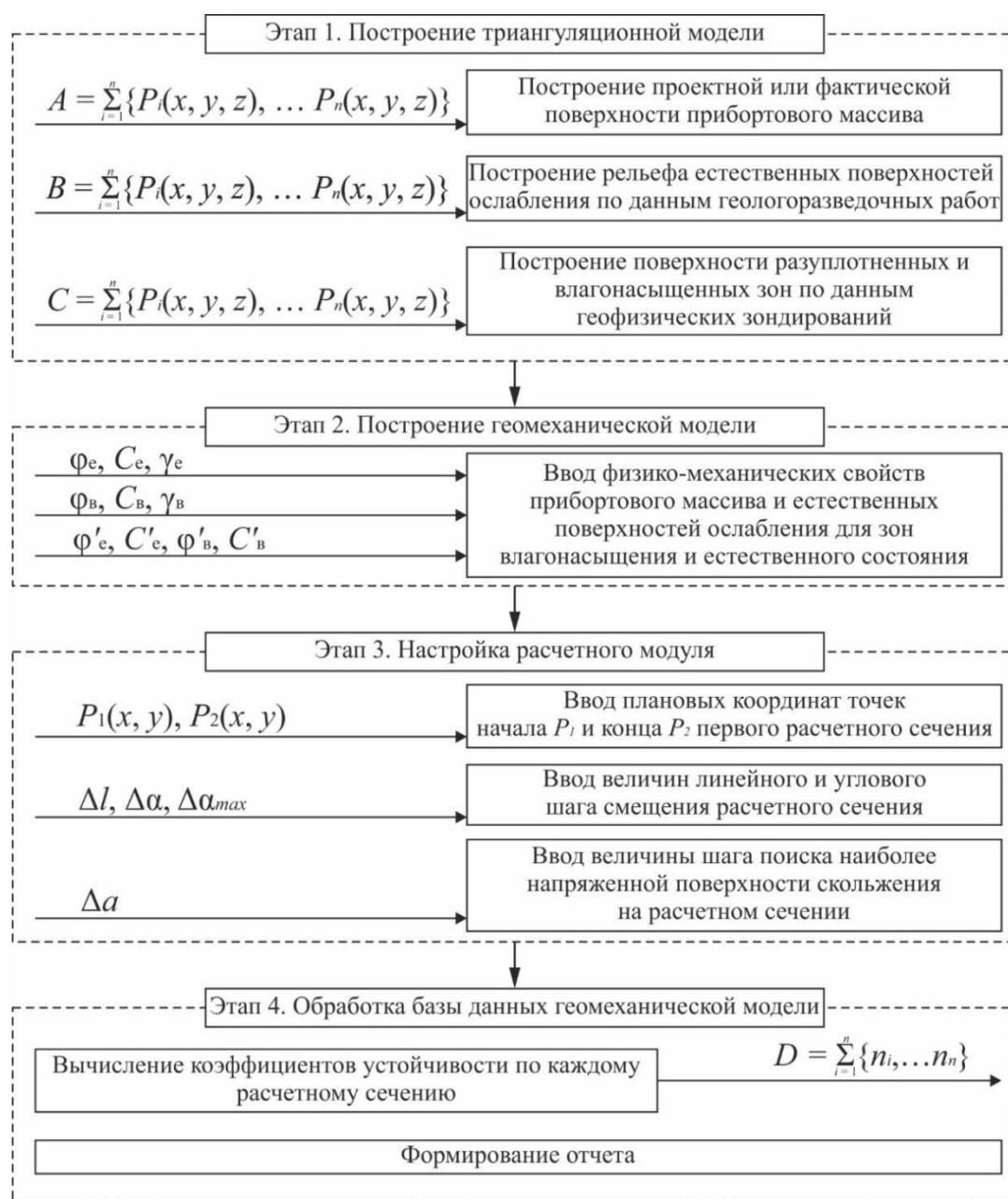


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма прогноза устойчивости откосных сооружений на ОГГМ: A, B, C, E – множество точек P_i с координатами x, y, z ; D – множество коэффициентов запаса устойчивости n ; $\varphi_{в(е)}, C_{в(е)}, \gamma_{в(е)}$ – угол внутреннего трения, сцепление и объемный вес в зонах влагонасыщения (естественной влажности); $\varphi'_{в(е)}, C'_{в(е)}$ – угол внутреннего трения и сцепление по естественным поверхностям ослабления в зонах влагонасыщения (естественной влажности); $\Delta l, \Delta \alpha, \Delta \alpha_{max}$ – величины линейного, углового и максимального углового шагов поиска наиболее опасного сечения в плане; Δa – шаг поиска наиболее напряженной поверхности скольжения в расчетном сечении

Решение задачи разработки методов и алгоритмов построения ОГГМ откосных сооружений и прогноза их устойчивости позволило перейти к исследованию особенностей прогноза устойчивости откосных сооружений естественного и тех-

ногенного сложения на угольных разрезах Кузбасса и Республики Узбекистан.

Третья глава в рамках решения второй задачи посвящена исследованию изменения устойчивости откосных сооружений естественного сложения в условиях техногенного и естественного водонасыщения, подработки подземными горными выработками на угольных разрезах «Бачатский», «Ангренский», «Кедровский».

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, способствовавшим нарушениям технологического режима, аварийному стоянию автодороги и ЛЭП.

Обработка данных многолетнего мониторинга, проведенного КузГТУ, методами электрических зондирований и профилирований по продольным x_1 , x_2 и поперечным профилям y_1 - y_5 позволила диагностировать расположение скрытого фильтрационного коллектора по глубине и в плане, а также с использованием разработанного метода обработки электрофизических данных дать прогноз изменений мощности слоя четвертичных отложений (рис. 2).

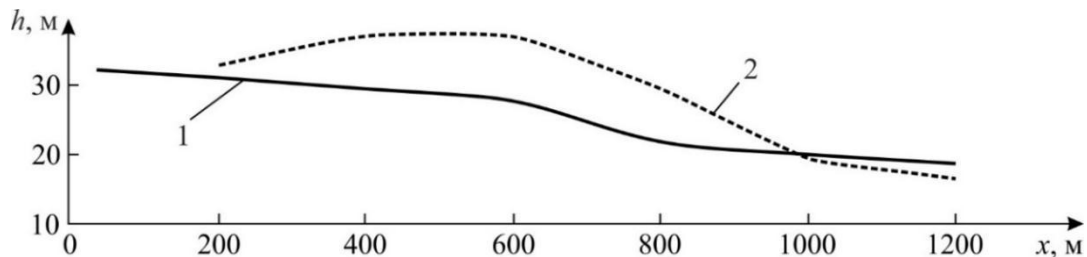


Рис. 2 – Расчетные графики изменения мощности рыхлых четвертичных отложений для электрофизических профилей O_1x_1 (1) и O_2x_2 (2)

Эти данные в совокупности с результатами геологических изысканий и обратных расчетов по участкам произошедших оползней позволили построить ОГГМ прибортового массива (рис. 3а) и произвести расчет коэффициента запаса устойчивости по наиболее опасным сечениям (рис. 3б), диапазон которого на наиболее оползнеопасном участке составил $n = 1,06$ - $1,38$ (табл. 1).

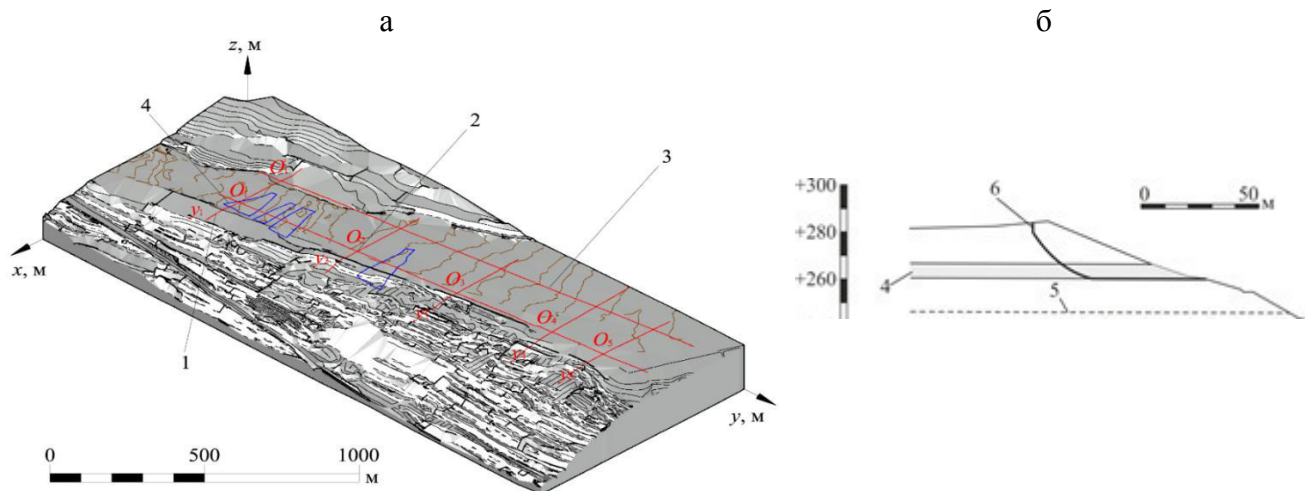


Рис. 3 – ОГГМ прибортового массива (а) и геофизический профиль O_1y_1 (б):
1 – поперечный геофизический профиль; 2 – точка ВЭЗ; 3 – продольный геофизический профиль; 4 – фильтрационный коллектор; 5 – кровля коренных пород; 6 – наиболее напряженная поверхность скольжения.

Элементы ОГГМ и результаты прогноза устойчивости прибортового массива

Профиль	$z_в$, м	$z_н$, м	h , м	α , град	n
O_1y_1	284,3	259,9	24,4	20	1,06
O_2y_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_5y_5	302	273,5	28,5	12	1,97

Сокращения: $z_в / z_н$ – отметки верхней и нижней бровок призмы возможного обрушения; h – высота призмы возможного обрушения; α – результирующий угол; n – коэффициент запаса устойчивости.

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. Для разработки рекомендаций по устранению последствий оползня «Центральный» произведена обработка базы данных полевых исследований, проведенных геофизическими службами Республики Узбекистан, при этом были использованы разработанные методы обработки данных круговых сейсмических зондирований и электропрофилеграфий.

Анализ изменения коэффициента сейсмической анизотропии в плане и во времени показал, что критерием опасности развития оползня является $K_a > 1,6$ (рис. 4).

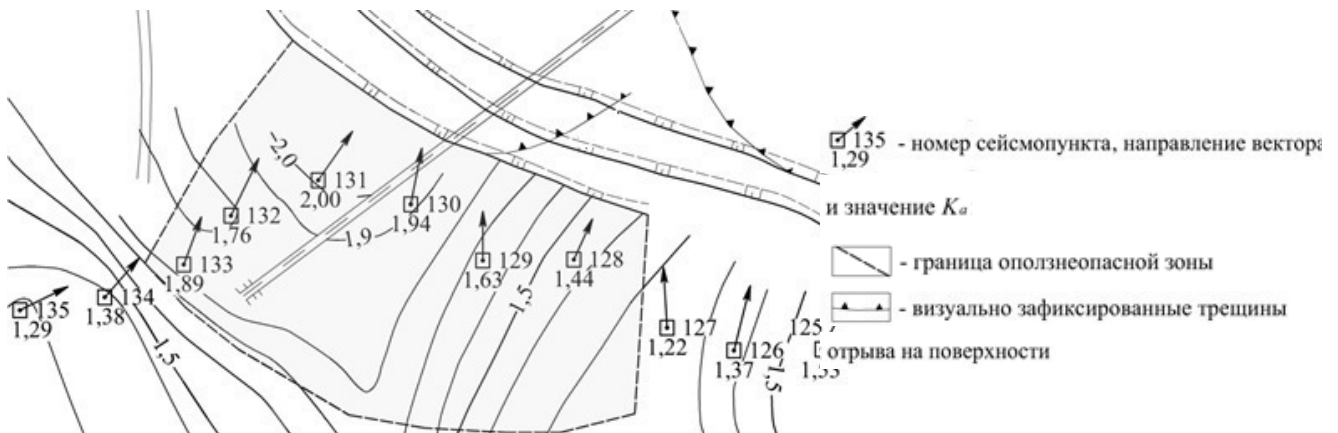


Рис. 4 – Положение оползнеопасной зоны на схеме опытного участка в южном борту разреза «Ангренский» (геологоразведочная экспедиция АО «Уголь», Республика Узбекистан)

По отрицательным аномалиям на графиках электропрофилеграфирования, 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 (табл. 2).

Базы данных геолого-геофизических изысканий, дополненные результатами обратных расчетов прочностных параметров пород, слагающих борт, позволили

сформировать ОГГМ, установить наиболее опасные геологические разрезы и дать прогноз устойчивости борта (рис. 5).

Таблица 2
Корреляционные зависимости между параметрами геоэлектрического и геологического разрезов (h – в м, ρ_k – в Ом·м)

Уравнение	Коэффициент корреляции r (корреляционное отношение R)	Критерий надежности оценки Фишера	
		$F_{расч}$	$F_{крит}$
$h = 0,39\rho_k + 40,95$	$r = 0,76$	54,22	4,08
$h = 10,78\rho_k^{0,44}$	$R = 0,77$	59,03	4,08
$h = 44,90e^{0,01\rho_k}$	$R = 0,74$	48,47	4,08
$h = -0,003\rho_k^2 + 0,912\rho_k + 22,004$	$R = 0,78$	58	4,1

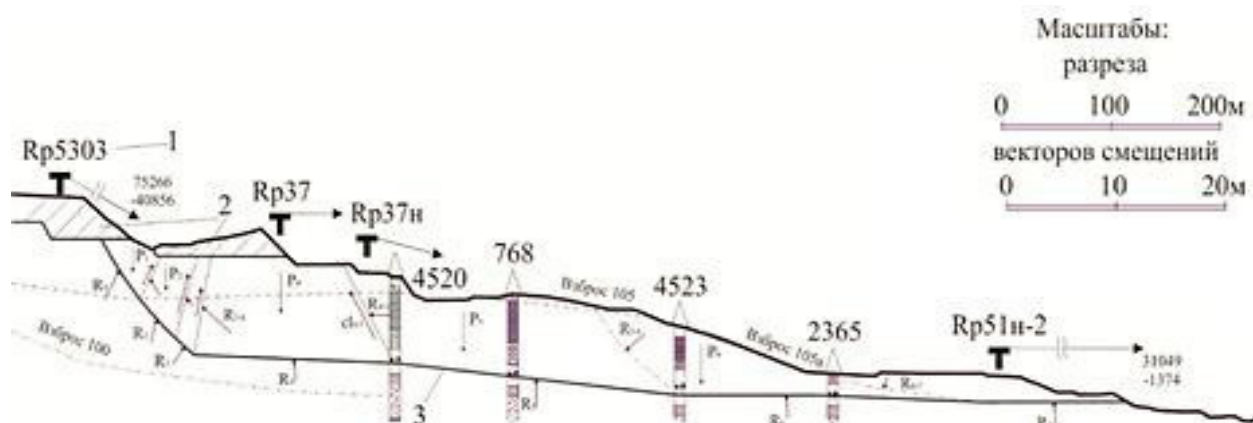


Рис. 5 – Расчетная схема прогноза устойчивости борта в районе оползня «Центральный» по наиболее опасному геологическому разрезу после завершения первого этапа разгрузки головной части: 1 – репер наблюдательной станции; 2 – обрабатываемая часть оползня; 3 – поверхность скольжения оползня.

С учетом рекомендаций по снижению результирующего угла борта с $10-11^\circ$ до 9° , обеспечивающего разгрузку головной части оползня, коэффициент запаса устойчивости борта будет повышен с $n = 1,0-1,04$ до $n = 1,06-1,09$ (табл. 3).

Таблица 3
Элементы ОГГМ и результаты прогноза устойчивости борта в районе оползня «Центральный» на различные периоды времени

Геологический разрез	z_6 , м	z_H , м	h , м	α , град	n
Положение на конец 2018/2025 года					
1-1	1076,0/1040,0	897,2/897,2	178,8/142,8	11/9	1,00/1,06
2-2	1103,8/1070,0	884,1/884,1	219,7/185,9	10/9	1,00/1,08
3-3	1095,6/1070,0	878,6/878,6	217,0/191,4	10/9	1,04/1,09

Сокращения аналогичны табл. 1.

Состояние северного борта разреза «Кедровский» осложнено процессами, связанными с выемкой пласта «Владимировский» подземным способом. Геологические изыскания позволили определить необходимые физико-механические 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. На томограммах высокоомные участки соответствуют расположению разуплотненных зон обрушений и трещиноватости, а низкоомные – водонасыщенным зонам.

На основе ОГГМ проведен прогноз устойчивости борта по основным геологическим разрезам (рис. 6), 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 XVIIIa (табл. 4).

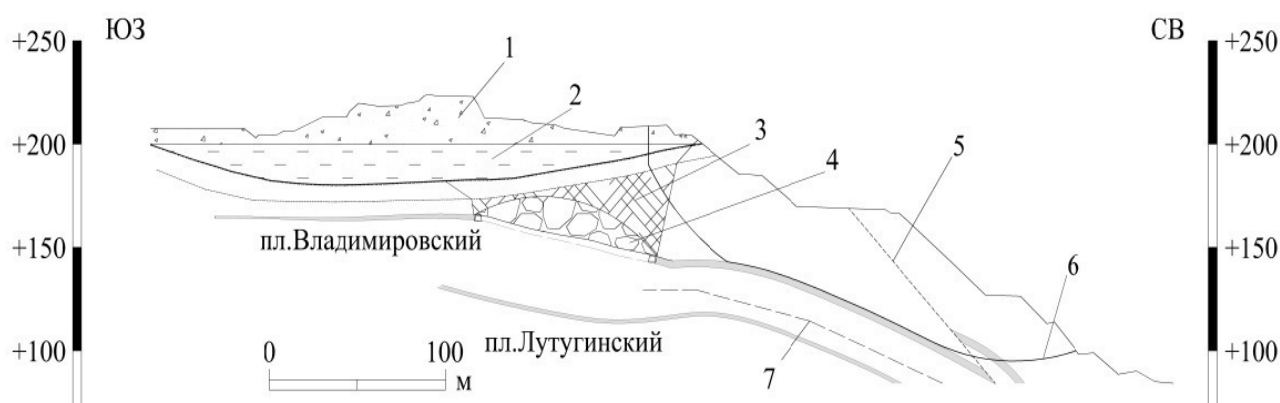


Рис. 6 – Геологический разрез XIX:

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

Таблица 4

Элементы ОГГМ и результаты геомеханической оценки прибортового массива

Геологический разрез	$z_{в}, м$	$z_{н}, м$	$h, м$	$\alpha, град$	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
XVIIIв	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

Дополнительные сокращения: 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

Выполненные исследования показали, что 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.

Четвертая глава в рамках решения третьей задачи посвящена исследованию изменения устойчивости откосных сооружений техногенного сложения в условиях деформированного борта в результате оползня дамбы гидроотвала, при отработке намывного массива гидроотвала, отсыпки вскрышных пород на намывное основание на угольных разрезах «Краснобродский» и «Кедровский».

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 ОГГМ (рис. 7а) выполнен прогноз устойчивости деформированного массива по профилям (рис. 7б), при этом коэффициент запаса устойчивости изменялся в диапазоне $n = 1,1-1,46$ (табл. 5).

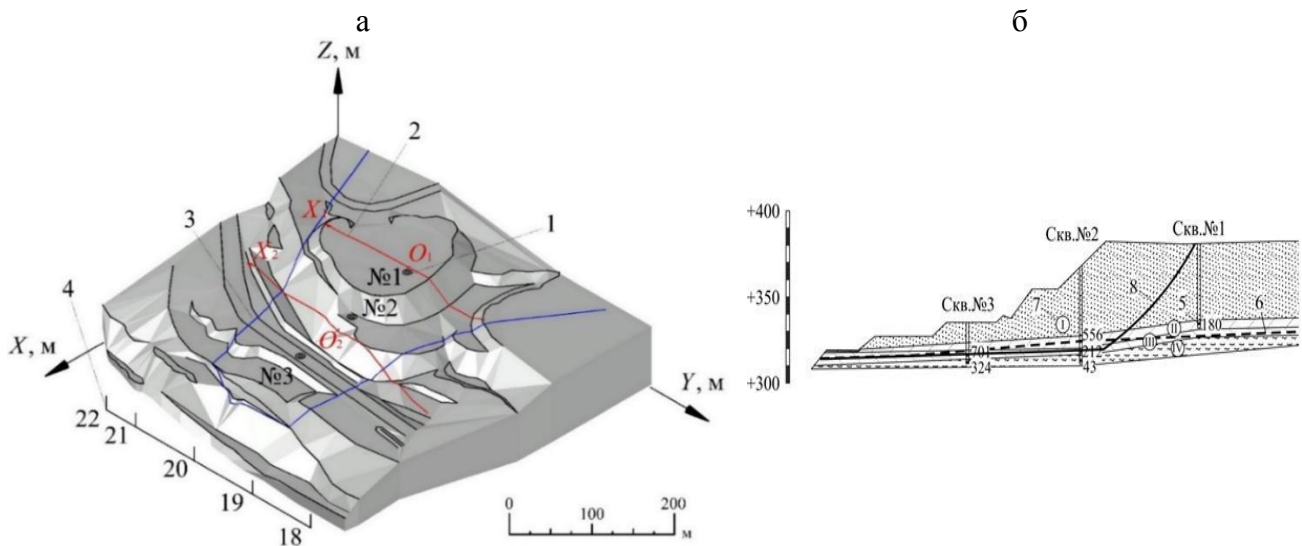


Рис. 7 – ОГГМ техногенного массива (а) и профильная линия 20 (б): 1 – геологическая скважина; 2 – профиль ВЭЗ и ЭП; 3 – границы влагонасыщенной зоны; 4 – профильные линии; 5 – номер датчика порового давления; 6 – депрессионная кривая; 7 – геологический слой; 8 – наиболее напряженная поверхность скольжения

Таблица 5

Элементы ОГГМ и результаты прогноза устойчивости техногенного массива

Профиль	z_b , м	z_n , м	h , м	α , град	h_1 , м	P , МПа	n
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

Дополнительные сокращения: h_1 – диапазон мощностей влагонасыщенной зоны; P – диапазоны значений порового давления по скважинам № 1, 2, 3.

Таким образом, участки бортов разрезов, непосредственно прилегающие к гидроотвалам, характеризуются повышенной опасностью оползнеобразования, особенно при складировании сухих пород вскрыши поверх намывных. Этому спо-

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 пригрузки намывных пород сухим отвалом. Для формирования ОГГМ 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.

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 ОГГМ 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 (рис. 8), а при создании ограждающих насыпей (перемычек) из сухих пород – информация об избыточном поровом давлении под этими объектами.

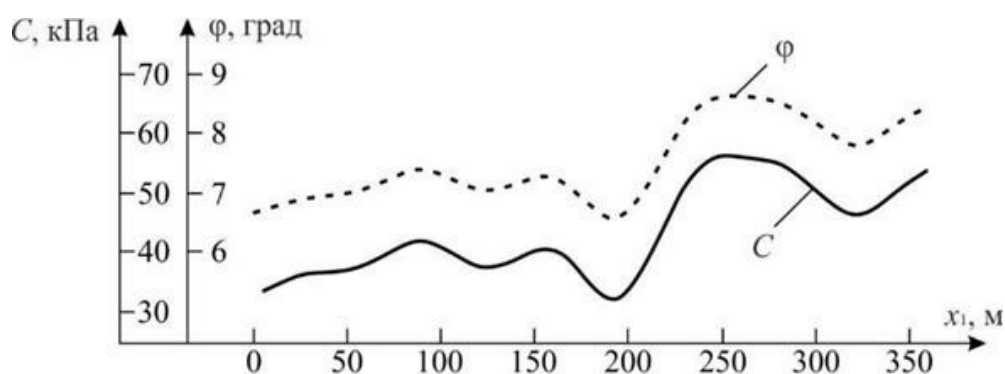


Рис. 8 – Графики зависимости прочностных свойств намывных грунтов от координат профиля x_1 (КузГТУ), использованный в расчетах

При обработке гидромеханизированным способом намывных пород, относительно однородных по прочностным свойствам, устойчивость откоса гидровскрышного забоя в наибольшей степени определяется абсолютными величинами набранных прочностных показателей на обрабатываемом участке и неблагоприятным сочетанием формы уступа (наличием выступающих участков, изрезанность забоя в плане) с высотой заходки. Установленный диапазон коэффициента запаса устойчивости составил $n = 1,03–3,76$ (табл. 6).

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 (рис. 9). Установленный диапазон изменения коэффициента запаса устойчивости для данного участка массива значительно уже и составил $n = 1,29–1,59$ (см. табл. 6).

Оценка диапазона повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе ОГГМ проведена с помощью задания последовательно уменьшающегося линейного шага Δx построения расчетных сечений. Оценка проведена для борта естественного сложения разреза «Бачатский» и техногенного

(разделительная перемычка разреза «Кедровский»).

Таблица 6

Элементы ОГГМ и результаты прогноза устойчивости

Сечение	z_B , м	z_H , м	h_2 , м	C , кПа	φ , град	α , град	P , кПа	n
Гидровскрышной забой								
1	213,8	201,2	12,6	18	8	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			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
Разделительная перемычка								
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

Дополнительные сокращения: h_2 – высота прибортового массива.

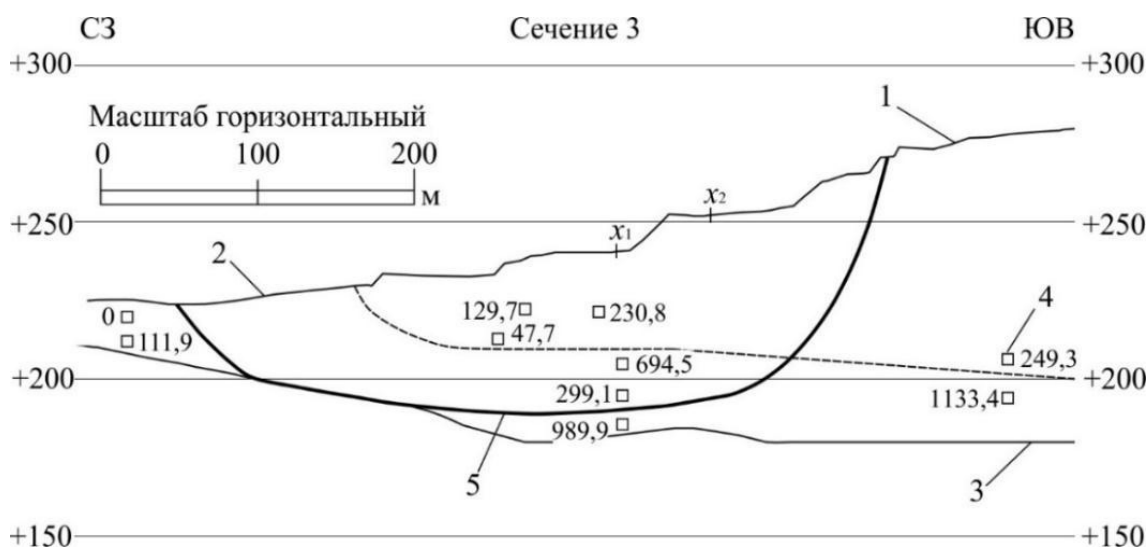


Рис. 9 – Пример расчета по сечению 3:

1 – поверхность разделительной перемычки; 2 – поверхность намывных пород; 3 – естественный рельеф; 4 – показание датчика порового давления, кПа; 5 – наиболее напряженная поверхность скольжения

Предложенный подход позволил повысить точность прогноза устойчивости в пределах расчетных моделей на 25,6 и 21,9 % соответственно (рис. 10). Таким образом, прогноз устойчивости откосных сооружений на основе ОГГМ с учетом неоднородности физических свойств инженерно-геологических массивов обеспечивает снижение влияния человеческого фактора за счет поиска оползнеопасного участка путем перебора множества расчетных сечений через заданные величины линейного и углового шагов.

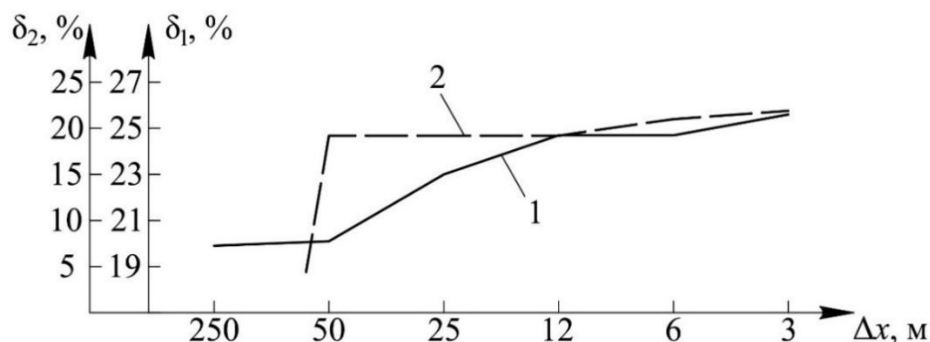


Рис. 10 – Графики зависимости повышения точности расчета коэффициента запаса устойчивости δ от величины линейного шага Δx для условий разрезов «Бачатский» (1) и «Кедровский» (2) разрезов

В пятой главе в рамках решения четвертой задачи выполнена разработка и реализация методики прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов на основе объемных геолого-геофизических моделей. Разработанная методика включает: маркшейдерско-геодезический мониторинг и инженерно-геологические изыскания на исследуемом участке; комплекс геофизических зондирований, в зависимости от типа откосного сооружения (естественное или техногенное); гидромеханический мониторинг при наличии намывных пород; построение объемной геолого-геофизической модели откосного сооружения на основе обобщения результатов инженерно-геологических изысканий, геофизических зондирований, маркшейдерско-геодезического и гидромеханического мониторинга; определение оползнеопасных зон и вероятного направления оползня; разработку рекомендаций по безопасному ведению горных работ.

По результатам проведенных исследований в рамках проектов, выполненных в ОАО «Кузбассгипрошахт», даны рекомендации по повышению устойчивости откосных сооружений на угольных разрезах сибирских регионов и Республики Узбекистан, обеспечивающие повышение безопасности ведения горных работ и снижение затрат на предотвращение технологических аварий (табл. 7).

Таблица 7

Использование разработанных рекомендаций ОАО «Кузбассгипрошахт»

Разрез	Объект	№ договора
«Ангренский»	Северо-западный борт	4682П/04 от 21.11.2018
«Кедровский»	Разделительная перемычка гидроотвала №3	4433П/07(1)-дс от 29.06.2018
«Кедровский»	Участок борта в зоне влияния подземных горных работ	4433П/07(1)-дс от 29.06.2018
«Бачатский»	Западный борт в четвертичных отложениях	4505П/07 от 25.06.2018
«Краснобродский», уч. «Новосергеевский»	Внешний породный отвал «Перспективный»	3915П/12 от 24.09.2020
«Распадский-Коксовый», уч. «Поле Шахты №1»	Рабочий борт	4679П/03 от 09.01.2019
«Зашуланский»	Основание внешнего отвала	4675П/01 от 18.08.2016
«Черниговский»	Восточный борт	4695П/01 от 01.02.2018
«Барзасский»	Внешний отвал	4734П от 10.08.2020
«Березовский Западный»	Опасная зона 4-1	4725П/01 от 13.03.2020
«Пермяковский»	Борт в четвертичных отложениях	4717/01 от 01.10.2020
«Мугунский»	Внутренний отвал	4705П/01 от 10.12.2018

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 нерешённость, связанная с отсутствием методов количественной интерпретации геофизических зондирований, обеспечивающих построение объемных моделей бортов, необоснованностью принципов автоматизированного выбора наиболее опасного сечения, неизученностью особенностей объемных геолого-геофизических 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 физико-механических 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 усло-

вия 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 песчано-глинистых отложений на межскважинных интервалах оценивают путем инверсии зондирования, 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 пригрузки 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).

Основное содержание диссертации опубликовано
в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. **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.).
2. **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.
3. **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.
4. **Караблин, М.М.** Прогноз устойчивости прибортового массива оползня «Центральный» угольного разреза «Ангренский» на основе объемной геолого-геофизической модели / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2020. – № 3. – с. 39 – 49.
5. **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.).
6. **Караблин, М.М.** Учет пространственной изменчивости физико-механических свойств техногенного массива гидроотвала при отработке намывных отложений / М.М. Караблин, С.М. Простов // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 2. – с. 34 – 42.
7. **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.
8. **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.

в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

9. 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).
10. **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).
11. **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).

в прочих изданиях:

12. **Караблин, М.М.** Оценка устойчивости бортов при синклинальном залегании пород / М.М. Караблин, С.П. Бахаева // Сборник материалов V всероссийской, 58 научно-практической конференции молодых ученых «Россия молодая» [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2013.
13. **Караблин, М.М.** Автоматизированная оценка устойчивости грунто-

вых дамб // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть II / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Санкт-Петербург, 2014. – С.206.

14. **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.

15. **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.

16. **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.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

Подписано в печать 29.03.2022. Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд.л. 1,37.

Тираж 100 экз. Заказ № 155

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А