

На правах рукописи

ДОРОХИН Кирилл Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НА
ОСНОВЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), отдел проблем геотехнологий

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Захаров Валерий Николаевич, член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, директор ИПКОН РАН

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

1. Вознесенский Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института (МГИ) Национального исследовательского технологического университета "МИСиС"

2. Дягилев Руслан Андреевич, кандидат физико-математических наук, и. о. заместителя директора по научной работе ФИЦ ЕГС РАН.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. Филиал ПФИЦ УрО РАН.

Защита состоится « » 2017 год, в на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 в институте проблем комплексного освоения недр РАН по адресу 111020, Москва, Крюковский тупик,4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем комплексного освоения недр РАН.

Автореферат разослан « » 2017 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Докт.техн.наук

И.Ф.Жариков

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Значительная часть объектов инженерной и транспортной инфраструктуры неглубокого подземного заложения находится в условиях влияния процессов как эндогенного, так и экзогенного характера. По этой причине для проектирующих, строительных и эксплуатирующих организаций большое значение приобретают вопросы применения надежных и оперативных способов контроля геодинамического состояния системы "горная выработка - вмещающий массив" неразрушающими методами, а также усовершенствования уже существующих способов контроля.

Подземными объектами неглубокого заложения в данной работе выступают горные выработки, расположенные не глубже первых десятков метров.

Опыт показал, что аварии в выработках неглубокого заложения имеют свои специфические особенности. Они происходят в областях, приуроченных к неблагоприятным геологическим условиям, к которым можно, в первую очередь, отнести зоны ослабленных пород или зоны с неблагоприятным распределением напряжений в массиве, при этом процессы разрушения и деформирования конструкций крепи горной выработки протекают на протяжении длительного времени, что позволяет выявить неблагоприятные процессы задолго до аварийной ситуации.

В теории механики подземных сооружений крепь (обделка) горной выработки и вмещающий массив горных пород представлены как находящиеся в контакте элементы единой деформируемой системы, взаимодействующие друг с другом под влиянием внешних нагрузок и воздействий. Это дает право полагать, что оценка напряженно-деформированного состояния массива вблизи горной выработки - приоритетная задача, связанная с прогнозом ее устойчивости.

Ослабление и разрыхление пород, связанное с изменением поля напряжений в массиве или в результате влияния других дестабилизирующих факторов приводит к образованию вблизи выработки весьма неоднородной зоны неупругих деформаций.

Применяемые на практике статические геомеханические методы для оценки состояния системы "горная выработка - вмещающий массив" не позволяют объективно оценивать причины и механизмы тех или иных деформационных процессов в массиве по причине их точечности применения, вследствие чего они не дают непрерывного прогноза геологических условий в естественном залегании пород на потенциально аварийном участке.

Динамические прочностные характеристики вмещающего массива, традиционно можно рассчитать, используя скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) сейсмических волн. В свою очередь по данным динамических параметров, используя известные корреляционные зависимости, рассчитываются статические деформационные и прочностные характеристики вмещающих пород в естественном их залегании. При этом по динамике изменений этих параметров оценивается состояние массива, что в

конечном итоге, может стать основанием для прогноза устойчивости системы в целом.

В реальных условиях регистрация необходимой составляющей - скорости поперечной волны (V_s) существенно осложнена. Это требует применения дополнительных методик возбуждения и приема, что значительно увеличивает время выполнения работы и ее стоимость. А при условии, если работы ведутся через железобетонную обделку горной выработки (характеризующуюся высокими скоростями упругих волн), регистрация поперечных волн и вовсе практически не осуществима без нарушения обделки.

При этом при сейсмоакустических исследованиях на сейсмограммах присутствуют интенсивные поверхностные волны, которые занимают до 70% волнового поля. Существенная зависимость дисперсионного уравнения поверхностных волн рэлеевского типа от скоростей поперечных волн V_s , характеризующих массив, и в свою очередь, определяющих значение G_d (динамического модуля сдвига), должна позволить исследователю производить оценку изменений физико-механических свойств в массиве, без традиционного использования данных о скоростях распространения продольных и поперечных волн.

Таким образом, разработка оперативного экспресс-метода, на основе дисперсионного анализа поверхностных волн, для изучения динамики изменений физико-механических свойств массива горных пород, в том числе и в заобделочном пространстве горной выработки, без прямой регистрации V_s , представляется актуальной задачей.

Целью работы является обоснование и разработка метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн.

Идея работы заключается в использовании закономерностей и взаимосвязей между получаемыми характеристиками дисперсионных кривых поверхностных волн, изменениями физико-механических свойств массива на различных стадиях деформирования и фактическими изменениями НДС обделки горной выработки для оперативного контроля и возможности дальнейшего прогнозирования начала возможных разрушений горных пород и конструкций подземных сооружений.

Методы исследований включают теоретические расчетные построения дисперсионных кривых по методике аналитического способа расчета скорости поперечных волн по фазовым скоростям поверхностных волн, используя при этом уравнения потенциалов смещений для плоских рэлеевских волн, программное моделирование волновых полей поверхностных волн с последующим дисперсионным анализом при различных сценариях, имитирующих состояние массива.

Экспериментальные наблюдения, которые в рамках работы проводились как традиционными сейсмическими способами обработки в модификации МПВ, так и методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW) в натуральных условиях железнодорожных, автодорожных тоннелях неглубокого заложения,

оползневых склонах, а также тоннелях Санкт-Петербургского метрополитена, при их строительстве и эксплуатации. При этом экспериментальные работы сопровождались комплексом апробированных прямых геомеханических измерений для регистрации реальных последствий изменений напряженного состояния в массиве, что позволяло производить проверку формируемым прогнозам.

Основные задачи исследований

1. Обосновать связь между геодинамическим состоянием массива горных пород и дисперсионными параметрами поверхностных волн.

2. Оценить возможность применения дисперсионного анализа поверхностных волн для прогноза сдвиговых деформаций в массиве и для контроля состояния ближней зоны заобделочного пространства горной выработки в неблагоприятных геологических условиях.

3. Разработать метод оперативной идентификации деформационных процессов в массиве и способ количественной оценки изменений физико-механических свойств слагающих горных пород на основе дисперсионных параметров поверхностных волн.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Активизация геомеханических процессов в виде изменения напряженно-деформированного состояния массива с сопутствующим изменением физико-механических свойств горных пород отражается на дисперсионных параметрах поверхностных волн. Что позволяет при проведении дисперсионного анализа производить экспресс-оценку состояния массива.

2. Разработанный на основе многоканального дисперсионного анализа поверхностных волн метод позволяет осуществлять оценку изменений физико-механических свойств массива, а также определять удаленность, на которой происходят изменения относительно поверхности наблюдений при работах, как с поверхности, так и из горной выработки с железобетонной обделкой.

3. Корреляционная связь между изменениями скоростных характеристик поверхностных волн, для заданных диапазонов λ (длин волн), регистрируемых во вмещающем массиве и изменениями НДС крепи находится на уровне $R^2 \sim 0.73-0.88$. Что подтверждает взаимосвязь состояния крепи, физического состояния вмещающего массива горных пород и сейсмических параметров, характеризующих массив.

4. В качестве связующего параметра регистрируемых характеристик и реологических свойств массива предложен параметр G_d (динамический модуль сдвига). С помощью, которого по имеющимся корреляционным связям можно рассчитать основные динамические и статические физико-механические характеристики массива горных пород.

Достоверность результатов подтверждается большим количеством проведенных модельных расчетов и экспериментальных исследований геофизическими и геомеханическими методами, в состав которых вошли: традиционная сейсморазведка методом МПВ с последующим расчетом физико-механических характеристик массива, работы по оценке напряженно-

деформированного состояния обделки тоннеля (НДС), инклинометрия, гидрогеология, космическая интерферометрия и др.

Обоснованность научных положений и выводов подтверждается обеспечением достаточного объема экспериментальных выборок проведенных исследований, с использованием методов математической статистики, в строящихся и эксплуатируемых автодорожных и железнодорожных тоннелях, тоннелях Санкт-Петербургского метрополитена с 2005 по 2016 гг.

Научная новизна работы

1. Впервые обоснована принципиальная возможность использования дисперсионного анализа поверхностных волн для контроля состояния массива горных пород и обнаружения возрастания геодинамической активности, начиная со стадии упругого деформирования при проведении мониторинговых исследований.

2. Предложен эффективный метод, основанный на связи сейсмических характеристик в виде дисперсионных параметров поверхностных волн с физико-механическими характеристиками горных пород, для обнаружения в массиве дестабилизирующих процессов и оценки их удаленности относительно поверхности наблюдений.

3. Впервые на количественном уровне подтверждена связь между изменением дисперсионных параметров поверхностных волн, изменением физического состояния вмещающего массива и изменением напряженно-деформируемого состояния обделки горной выработки, что доказывает принципиальную возможность использования предложенного метода для оценки, как склоновых деформаций, так и изменений в заобделочном пространстве горной выработки.

4. Использование в расчетах динамического модуля сдвига (G_d), который характеризует способность материала сопротивляться сдвиговым деформациям, и наличие у предложенного параметра корреляционных зависимостей с другими важнейшими физико-механическими характеристиками, позволяет производить количественную оценку состояния исследуемого массива горных пород без регистрации объемных волн.

Практическая значимость

Предложенный метод дисперсионного анализа поверхностных волн позволяет заблаговременно определить переход исследуемой области в опасное предаварийное состояние, оценить развитие деформационных процессов на этапах начального деформирования при слабых изменениях, когда применение традиционных сейсмоакустических методов затруднено или вовсе не осуществимо.

Своевременное определение перехода неблагоприятной области во вмещающем массиве в опасное состояние позволяет заблаговременно выполнить комплекс инженерных укрепительных мероприятий.

Реализация и внедрение результатов работы

Предложенный в работе метод дисперсионного анализа поверхностных волн, широко применяется в ОАО НИПИИ "Ленметрогипротранс" при

обработке сейсмических данных в составе комплекса прямых и косвенных методов в перегонных тоннелях Санкт-Петербургского метрополитена; в транспортных тоннелях в период работы по проходке новых тоннелей параллельных уже существующим; в комплексе геофизических методов по оценке устойчивости оползневых склонов в Северокавказском регионе в рамках горнотехнического мониторинга, обеспечивающего строительные и эксплуатационные службы необходимыми сведениями для определения влияния строительства, технологии и режима эксплуатации тоннелей на активизацию опасных геомеханических процессов.

Экономический эффект от внедрения результатов работы складывается из увеличения оперативности определения динамики развития деформационных процессов в массиве на начальных этапах, сокращения объемов дополнительных работ, требующих специальное возбуждение и прием поперечных волн, а при исследованиях из горной выработки с железобетонной обделкой практической реализацией неразрушающего контроля. Реализация сейсмоакустических наблюдений приводит к уменьшению дорогостоящих статических методов оценки состояния вмещающего массива.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в формулировании цели и задач исследований, разрабатывал методики для проведения измерений, разрабатывал сейсмо-геотехнические модели для теоретических расчетов, имитирующие различные деформационные процессы в массиве. Проводил теоретические расчеты, выполнял полевые эксперименты и обработку полученных данных, обобщал полученные результаты, выполнял их анализ и интерпретацию, осуществлял сбор, систематизацию и анализ данных ранее выполненных работ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Международный научный симпозиум «Неделя горняка- 2013, 2014, 2016, 2017»; XII международный геофизический научно-практический семинар «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых». Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» 2015г.; Третья практическая конференция «Геотехнический мониторинг и мониторинг развития опасных геологических процессов» г. Москва 2015г. Организатор журнал Геомаркетинг; Первая международная научно-практическая конференция и выставка ЕАГО «инженерная, угольная и рудная геофизика-2015, современное состояние и перспективы развития» г. Сочи 2015; 12-я Международная научная школа молодых ученых и специалистов. ИПКОН РАН 2015г.; 7-я международная геолого-геофизическая конференция и выставка EAGE «Санкт-Петербург 2016».; 2-я Международная научная школа академика К.Н.Трубецкого 2016 г. в ИПКОН РАН.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю чл.-корр. РАН, профессору, д.т.н. Захарову В.Н., д.т.н. Малинниковой О.Н., начальнику научно-исследовательского отдела ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс к.т.н. Исаеву Ю.С., вед.н.с. ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс к.т.н. Басову А.Д., с.н.с. научно-исследовательского отдела ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс, к.г.-м.н. Бойко О.В. за поддержку и содействие в проведении исследований.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 202 страницах машинописного текста, 182 иллюстраций, 1 таблицы, библиографического списка из 125 наименований.

Основное содержание работы

Первая глава посвящена анализу современного состояния и проблемам обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации горных выработок неглубокого заложения.

В механике подземных сооружений, крепь (обделка) горных выработок и окружающий массив представлены как находящиеся в контакте элементы единой деформируемой системы "крепь (обделка) - массив", взаимодействующие друг с другом под влиянием внешних нагрузок и воздействий. Отсюда действует основополагающий принцип механики подземных сооружений - принцип взаимодействия крепи (обделки) с окружающим массивом.

Поле напряжений в массиве, вмещающем горную выработку, может меняться вследствие различных причин, причем все влияющие факторы сложным образом суммируются и в результате напряжения крепи (обделки) тоннеля могут достигнуть критических значений, что может привести к разрушению горной выработки.

Характер воздействия на крепь горной выработки зависит от таких факторов как: состав, строение, физико-механические свойства слагающих пород, гидрогеологические условия, размеры выработки, глубина ее заложения, способ и скорость проходки.

Оценка физико-механических свойств массива вблизи горной выработки – приоритетная задача, связанная с прогнозом ее устойчивости. Ослабление и разрыхление горных пород, связанное с изменением поля напряжений в массиве, приводит к образованию вблизи выработки весьма неоднородной зоны неупругих деформаций.

Вклад, который сложно переоценить, в развитие теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния горных пород геофизическими, в том числе сейсмическими методами, внесли Никитин В.Н., Савич А.И., Воронков О.К., Ляховицкий Ф.М., Горяинов Н.Н., Пузырев Н.Н., Бондарев В.И., Захаров В.Н. и многие другие ученые. Результаты экспериментов прошлых лет показали большое преимущество сейсмических

методов по раннему определению изменений напряженно-деформированного состояния массива, когда еще не зафиксированы фактические смещения элементов массива.

Первые корреляционные зависимости между сейсмическими и физико-механическими свойствами нескальных (неупругих) грунтов были получены экспериментально независимо друг от друга Бондаревым В.И. и Минделем И.Г., потом исследования были продолжены Ф.М. Ляховицким, Козловым Е.А., Назаровым Г.Н. В результате систематизации данных в 1971 году была получена целая серия корреляционных уравнений, связывающих сейсмические и физико-механические характеристики песчано-глинистых грунтов.

Теоретические решения, лабораторные и полевые эксперименты, связывающие скорости продольных и поперечных волн с величиной напряжений, свидетельствуют о возрастании скоростей волн при увеличении давления в породах. Таким образом очевидно, что с увеличением $\sigma_{сж0}$, σ_{p0} , $\sigma_{сж}$, C , G_d , скорости упругих волн возрастают, а с уменьшением этих параметров - уменьшаются.

Традиционно оценка физико-механических свойств грунтов подразумевает наличие информации о скорости распространения волн продольного (V_p) и поперечного (V_s) типа. Часто регистрация поперечной волны (V_s) затруднена, например, в случае работы через тонкую железобетонную (высокоскоростную) обделку горной выработки импульс возбуждаемый источником, передается в среду под обделкой по нормали к поверхности, вследствие чего обменные волны (в частности PS) вообще не возникают.

По этой причине в практике возникла необходимость в альтернативном способе оценки состояния пород. Для решения этой задачи автор использует поверхностные волны, которые на сейсмограммах занимают до 70% регистрируемого волнового поля.

Основоположниками изучения поверхностных волн являются такие ученые, как Бреховских Л.М., Левшин А.Л., Андрианова З.С., Кейлис-Борок В.И., Thomson W.T., Haskell N.A.

Особый интерес к поверхностным волнам возник в 70-х годах, когда была доказана принципиальная возможность их применения для оценки важнейших физико-механических свойств грунтов. Тогда были предложены различные способы интерпретации поверхностных волн Рэлея и Лява. Большое количество работ посвященных интерпретации поверхностных волн принадлежат авторам различных научных школ: Левшин А.Л., Бондарев В.И., Савич А.И., Яценко З.Г., Никитин В.Н., Коптев В.И., Бабич В.М., Фомина Н.А., Мухина И.В., Молотков Л.А., Аленицин А.Г., Воронков О.К. и Маров В.И. и др.

В 1998-2005 годах, благодаря развитию компьютерных технологий, существенно усовершенствовались методы анализа поверхностных волн. Были предложены современные методы SASW и сменивший его и получивший большое развитие в последнее десятилетие метод MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – метод многоканального анализа поверхностных волн).

В настоящее время теория поверхностных волн рэлеевского типа основана на том, что поверхностные волны распространяются вдоль свободной поверхности и несут информацию о скоростных характеристиках разреза на глубины соизмеримые с длиной волны.

Метод MASW широко применяется в основном для построения разрезов V_S . Несмотря на все преимущества метода, точность инверсии дисперсионной кривой поверхностных волн в глубинные разрезы V_S достаточно неустойчива, особенно это отмечается при наблюдениях через высокоскоростную обделку.

При мониторинговых исследованиях даже незначительные ошибки могут стать причиной некорректного прогноза, особенно на стадии зарождения деформационных процессов, когда изменения еще совсем небольшие. По этой причине автор сделал попытку разработать экспресс-метод для контроля состояния вмещающего массива, используя только дисперсионные характеристики поверхностных волн рэлеевского типа без инверсии в V_S . А когда в массиве начинают регистрироваться трендовые существенные изменения дисперсионных характеристик, пересчитывать в параметры, характеризующие реологические свойства, для последующего проведения расчетов устойчивости системы горная выработка - вмещающий массив.

Говоря другими словами, практика выступила заказчиком исследований для разработки методики оперативной экспресс оценки состояния исследуемого массива горных пород, когда выполнение исследований традиционными методиками затруднено или не осуществимо, а существующие программные продукты для расчета дисперсионных изображений выступили полезным и удобным инструментом для достижения целей.

Во **второй** главе представлена методика дисперсионного анализа поверхностных волн и способы интерпретации данных.

Приведены результаты экспериментальных исследований по идентификации природы волновых полей. Методика MASW позволяет производить регистрацию волнового поля, используя одноканальные вертикальные сейсмоприемники. Для того чтобы не было сомнений в генезисе регистрируемых волн, в работе был произведен эксперимент с одноканальными и трехканальными сейсмоприемниками. Результаты эксперимента показали, что в состав волнового поля, зарегистрированного одноканальными сейсмоприемниками, входят поверхностные волны, при этом на сейсмограммах прослеживается дисперсия.

Построение дисперсионной кривой в методе MASW осуществляется по принципу наклонного суммирования, при этом сейсмограмма пропускается через систему узкополосных селективных фильтров. Соответственно дисперсионное изображение является результатом процедуры наклонного суммирования для всех частот, определенных частотой среза, зависимость амплитуды наклонного суммирования от частоты и скорости.

Процесс многоканального анализа поверхностных волн начинается с процедуры идентификации природы волн, которая представляет собой аналитическое определение граничных кинематических и динамических

условий для волн, присутствующих на сейсмограмме, и их отображение на рассчитанном дисперсионном изображении. Важным признаком по идентификации поверхностной волны на дисперсионном изображении является существенная зависимость скорости от частоты.

Дальнейшее изучение дисперсионной кривой производится путем пикирования дисперсионного изображения (рис.1) по точкам с максимальной амплитудой, при этом выбор абсолютного максимума амплитуды производится с помощью цифрового отображения значений курсора.

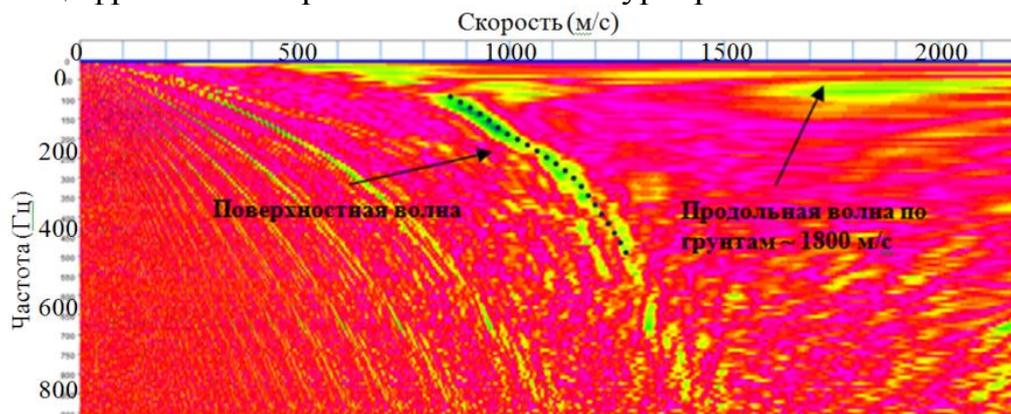


Рисунок 1 - Дисперсионное изображение зарегистрированного волнового пакета, полученное на участке строительства перегонного двухпутного тоннеля от ст. «Беговая» до ст. «Новокрестовская» Петербургского метро (программа обработки Pickwin.США).

Результаты математического моделирования, которые были проведены с целью оценки влияния входящих в состав дисперсионного уравнения, (1), параметров на изменения дисперсионной кривой показали, что кинематические и динамические свойства гармоник волн рэлеевского типа слабо реагируют на изменения характера среды по скорости распространения продольных волн.

$$V(f) = F(V_S, V_P, \rho, h), \quad (1)$$

где V_S -Скорость поперечной волны; V_P - скорость продольной волны; ρ - плотность; h -мощность слоя.

При изменении V_P в слое модели на 10%, фактическое изменение параметров дисперсионной кривой V_R составили всего 1.7%. При изменении мощности верхнего слоя h на 10%, фактические изменения параметров дисперсионной кривой V_R составили 1.3%. Изменение плотности (ρ), в первую очередь, отражается на значениях скорости V_P и V_S , которые и так находятся в составе дисперсионного уравнения. Более того в составе известного уравнения Рэля (2) для однородного бесконечного полупространства присутствуют только скорости продольных и поперечных волн.

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2\right]\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left[1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2\right] = \Omega; \quad (2)$$

Следовательно, параметр плотности интегрирован в значения V_P и V_S .

Эксперимент показал, что определяющее влияние на кинематические и динамические свойства гармоник поверхностных волн оказывает характер строения среды по скорости распространения поперечных волн (V_S). При изменении V_S в слое модели на 10% фактическое изменение параметров дисперсионной кривой V_R составили ~ 9% (рис. 2).

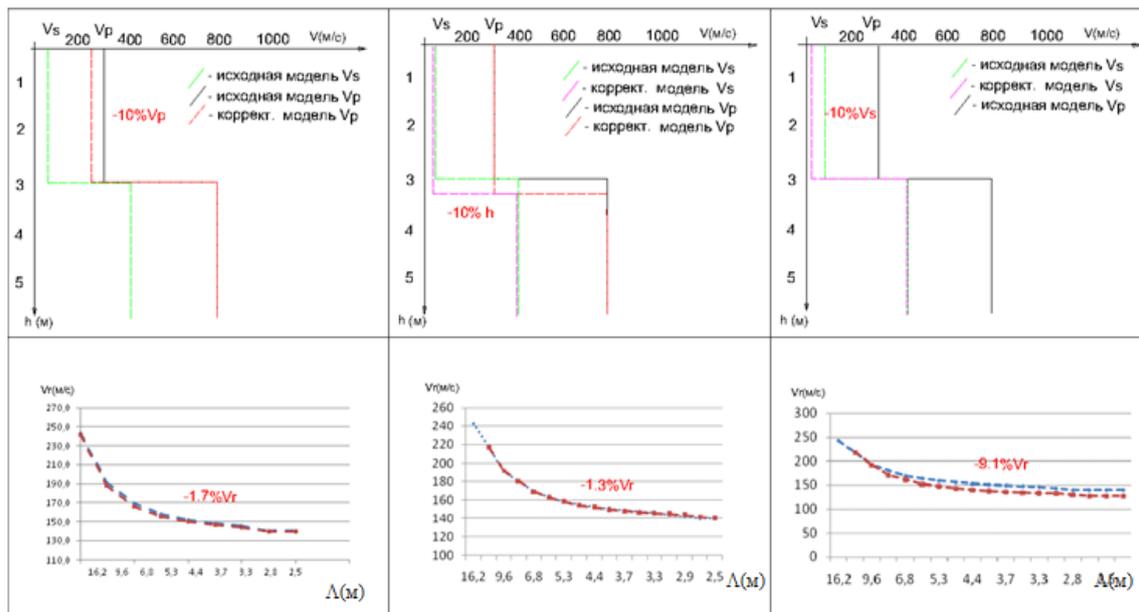


Рисунок 2 - Зависимости кинематических и динамических свойств гармоник рэлеевских волн от изменений значений входящих в уравнение параметров.

Скорость распространения волн поперечного типа (V_S), в большей степени, зависит от уровня структурных связей, которые, в свою очередь, существенно зависят от степени уплотнения пород и их фазового состава. Скорости волн поперечного типа, в отличие от волн продольного типа, практически не реагируют на увлажнение. Реакция может быть связана лишь с нарушением сплошности грунтов в результате их увлажнения, например, снижение скорости поперечных волн в результате разбухания глин при их увлажнении, а это уже прямой признак ослабления структурных связей в породе. Эта особенность является очень полезной при мониторинговых наблюдениях.

Известно, что V_S имеет тесную связь с G_d (динамическим модулем сдвига), который является физической величиной, характеризующей способность материала сопротивляться сдвиговой деформации. При этом эффективный упругий параметр является второй постоянной Ламе (μ), которая определяется величинами пористости и трещиноватости горных пород, коэффициентом Пуассона и величиной действующих напряжений.

Постоянная Ламе является параметром, характеризующим упругие деформации изотропных тел. В линейной теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформаций и тензором напряжений. Но при этом принцип инженерной сейсморазведки основан на том, что закон Гука справедлив для большинства горных пород, в том числе и не абсолютно упругих, при условии, если деформации и напряжения не слишком

велики. Чем меньше величина наблюдаемых деформаций, тем ближе оказывается вещество по своим свойствам к упругому телу. Сейсмическая волна при этом является внешней возбуждающей силой, действующей в какой-либо небольшой области среды, и имеет вид очень короткого импульса.

При необходимости с помощью известных корреляционных зависимостей (Бондарев В.И. Воронков О.К. и др.), у исследователя есть возможность расчета относительных изменений значений основных физико-механических характеристик, таких как φ (угол внутреннего трения), C (сцепление), E_d (модуль Юнга) и др.

Основываясь на исследованиях, проведенных в рамках первой и второй главы, была составлена принципиальная блок-схема разрабатываемого метода.



Рисунок 3 - Принципиальный алгоритм метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн.

В третьей главе представлены результаты экспериментов по оценке отклика дисперсионных кривых на изменения скоростных характеристик в структурных элементах модели, для разрезов с нормальным и инверсным распределением скоростей, с помощью математических (расчетных) и программных построений дисперсионных кривых, характеризующих различные фазы состояния.

В эксперименте были смоделированы ситуации, приближенные к различным геологическим средам и процессам: 1) в 3-хслойной модели по структуре и характеристикам соответствующей оползневому массиву имитировались деформационные процессы, протекающие с развитием растягивающих напряжений в зоне вмещающей поверхность смещения (рис. 4а); 2) в модели, имитирующей контакт обделки горной выработки и вмещающего массива, моделировались процессы снижения прочностных характеристик грунтов в заобделочном пространстве горной выработки (рис. 4б).

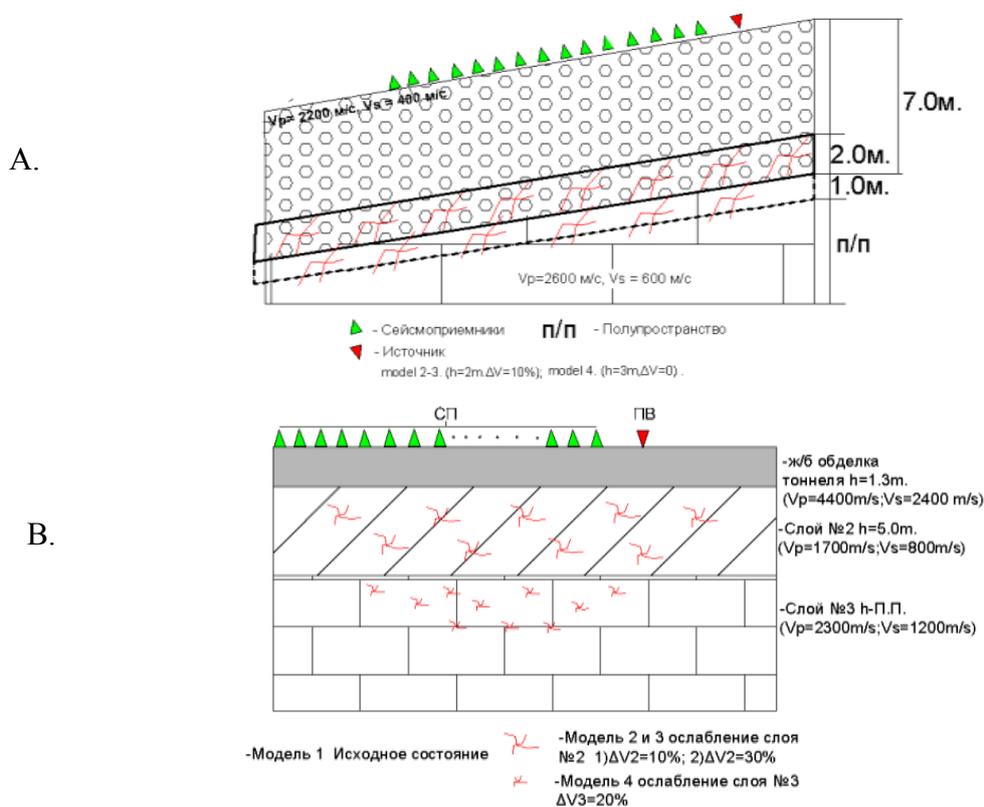


Рисунок 4 – А) Сейсмогеотехническая модель оползневого массива; Б) Сейсмогеотехническая модель системы вмещающий массив - высокоскоростная обделка горной выработки

Программа, на которой производились расчеты, была разработана в отделе НИО ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс». В программе заложен аналитический способ расчета скоростей поперечных волн по фазовым скоростям поверхностных волн, при этом используются зависимости потенциалов смещений (3-4) для двухслойной и трехслойной модели исходя из известных параметров слоев, участвующих в ее формировании.

$$\phi = A_e^{(-m\kappa h)} e^{j\kappa(x-V_R t)} \quad (3)$$

- потенциал горизонтального смещения;

$$\chi = B_e^{(-n\kappa h)} e^{j\kappa(x-V_R t)} \quad (4)$$

- потенциал вертикального смещения;

A, B - коэффициенты, которые зависят от начальной величины сигнала;

$$m^2 = \left(1 - \frac{V_R^2}{V_p^2}\right); \quad (5)$$

$$n^2 = \left(1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}\right); \quad (6)$$

$$\kappa = 2\pi/\lambda \quad (7)$$

x - расстояние от источника волн;

V_p, V_s, V_R – скорости волн продольного, поперечного типа и волн рэлеевского типа; t - время распространения волны; λ - длина волны; h - глубина распространения волны.

Предложенная в программе зависимость позволила рассчитывать скорости V_{R1}, V_{R2}, V_{R3} , и общую наблюдаемую V_R для моделей с известными значениями продольных и поперечных скоростей, характеризующих структурные элементы модели, а также с известными мощностями слоев модели.

Основные результаты представлены на рисунках 5-8.

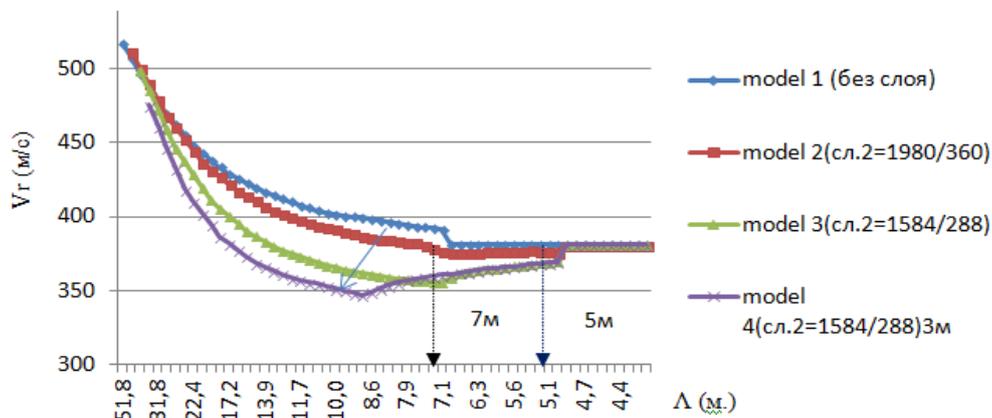


Рисунок 5 – Модель А. Дисперсионные кривые для модели №1 (сохранное состояние промежуточного слоя), модели №2 (ослабленное состояние промежуточного слоя), модели №3 (дальнейшее ослабление слоя) и модели 4 (увеличение ослабленного слоя до 3 метров).

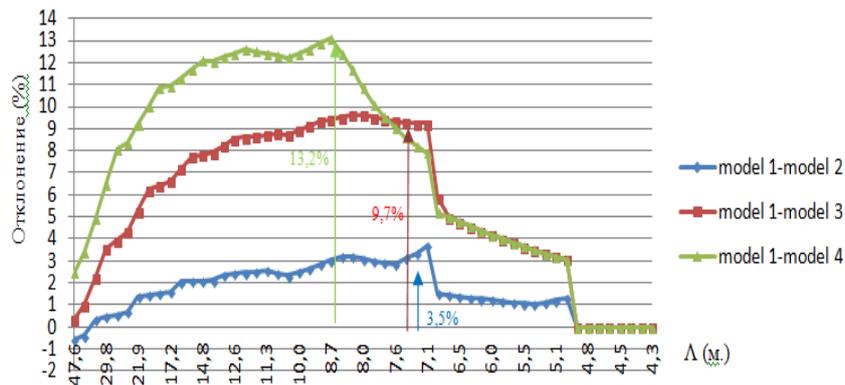


Рисунок 6 – Модель А. Графики отклонений дисперсионных кривых характеризующих модели №2,3,4 от дисперсионной кривой исходной модели №1.

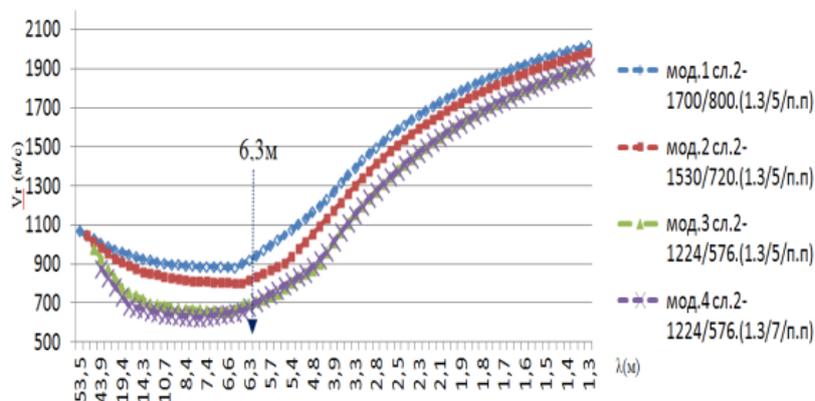


Рисунок 7 – Модель Б. Дисперсионные кривые для модели №1 (сохранное состояние слоя №2), модели №2 и №3 (динамика ослабления слоя №2), модели №4 (вовлечение в деформационный процесс слоя №3 - увеличение слоя №2 на 2 метра).

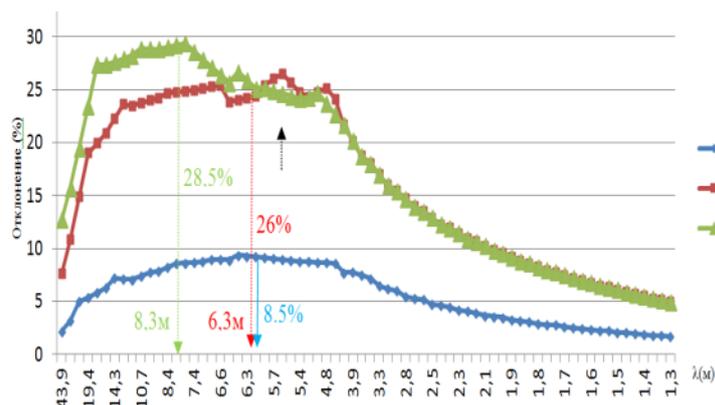


Рисунок 8 – Модель Б. Графики отклонений дисперсионных кривых характеризующих модели №2,3,4 от дисперсионной кривой исходной модели №1.

Основные результаты, которые удалось получить при различных способах моделирования, показали:

1. Траектория дисперсионной кривой отражает все структуры заданной модели;
2. Кривые «Отклонения» отображают даже самые незначительные изменения скоростных характеристик в структурных элементах модели;

3. Изменение положения пика максимальных отклонений по горизонтальной оси говорит об изменении мощности слоя, в котором отмечаются изменения скоростных характеристик;
4. Максимальные отклонения наблюдаются в диапазонах длин волн, которые соответствуют или близки подошве слоя, в котором собственно произошли изменения;
5. Соотношение отклика дисперсионных кривых и фактических изменений скоростных характеристик находится в интервалах: для разрезов с нормальным распределением (модель А) в области 0,4-0,5 (от уровня изменений V_s), и соотношением 0,5-0,9 (от уровня изменений V_s) для разрезов с инверсным распределением скоростей (модель Б - при работе через обделку тоннеля).

По характеру изменений дисперсионной кривой и рассчитанным графикам отклонений, которые выражаются точками перегиба и точками наибольшего отклонения от первоначальной траектории по вертикальной и горизонтальной оси, достаточно точно определяется положение структурного элемента, в котором произошли изменения. Глубина исследуемых элементов идентифицируется длиной волны λ , которая определяется известной формулой:

$$V_R = \gamma \cdot \lambda, \quad (8)$$

где γ - частота, λ - длина волны.

Результаты программного моделирования, которые были получены при содействии института РАНМИ (г. Донецк), в отличие от расчетных методов построения дисперсионных кривых, рассчитывались по синтезированным сейсмограммам, которые представляли собой пакет всего волнового поля.

Из полученных сейсмограмм с помощью инструмента MASW (RadexPro Professional) производился расчет дисперсионных изображений, на которых пикировались дисперсионные кривые поверхностных волн (рис. 9).

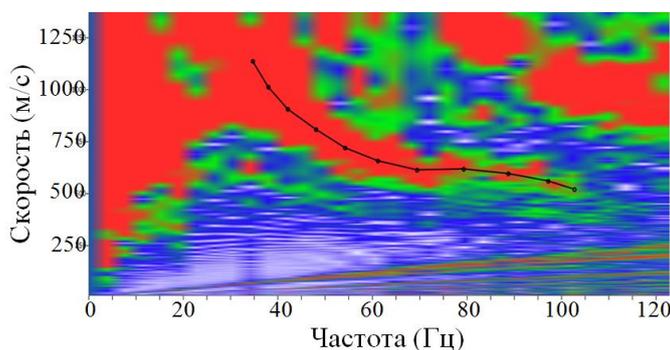


Рисунок 9 – Дисперсионное изображение в окне: $f=(0-125\text{Гц}); V_{\text{фаз}}=(0-1550\text{м/с})$. Дисперсионная кривая поверхностной волны (модель оползня М1).

В результате программного моделирования были подтверждены основные выводы, полученные при расчетных методах построения теоретических дисперсионных кривых.

Четвертая глава диссертации посвящена проверке работоспособности предложенного метода в натуральных условиях.

Исследования были проведены для двух видов задач: 1) оценки устойчивости оползневых склонов с регистрацией поверхностных волн рэлеевского типа на поверхности; 2) оценки состояния ближней зоны заобделочного пространства, вмещающего горную выработку, массива, с регистрацией поверхностных волн рэлеевского типа внутри горной выработки через железобетонную обделку тоннеля.

Оползневый склон, на котором была опробована предложенная методика, находился в п. Хоста, г. Сочи. Оползневые процессы в пределах исследуемой территории имели очень широкое развитие. По результатам проведенных расчетов устойчивости, склон характеризовался коэффициентом устойчивости $K_y = 0,73$, а с учетом сеймики составлял лишь 0,6. Такие характеристики говорят о высокой вероятности активизации оползневых смещений на данном участке. Исследуемый оползневый массив вмещал в себя железнодорожный тоннель. В рамках проекта реконструкции действующего транспортного тоннеля и проходки нового проводился комплексный мониторинг состояния оползневого склона. В частности состав комплексных исследований входили сейсмоакустические исследования методом МПВ для оценки динамического модуля упругости грунтов (E_d), слагающих массив, и контроль напряжений обделки тоннеля с помощью установленных на обделке тоннеля датчиков ПЛДС-400 (рис. 10).

Регистрируемые напряжения в крепи являются суммой геостатического давления вмещающих горную выработку пород (горного давления), тектонического поля начальных напряжений, внешнего гидростатического давления подземных вод, сейсмического воздействия землетрясений и т.п. Они прямо пропорциональны напряжениям, действующим в окружающей горную выработку массиве, т.е. возрастают при возрастании напряжений в массиве.

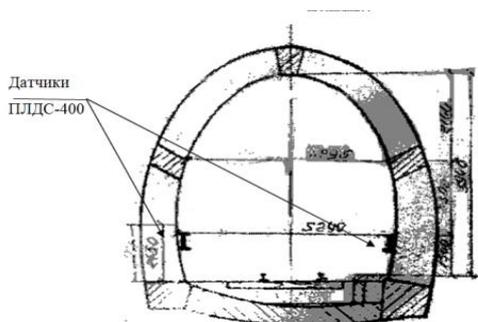


Рисунок 10 – Размещение датчиков ПЛДС в сечении тоннеля.

Геомеханические процессы развития НДС в массиве приводят к геодинамическим событиям, которые могут быть зарегистрированы при многократном определении напряжений обделки (рис. 11).

Уже после завершения мониторинговых исследований, используя накопленные за 2-х летний период сейсмические данные, был проведен дисперсионный анализ поверхностных волн с последующей оценкой

корреляции результатов с ранее полученными значениями модуля Юнга (E_d) и данными изменений НДС обделки тоннеля.

Во время эксперимента оказалось, что сравнивать большое количество дисперсионных кривых не очень удобно, по этой причине автор предложил способ, значительно облегчающий работу с большим количеством мониторинговых данных.

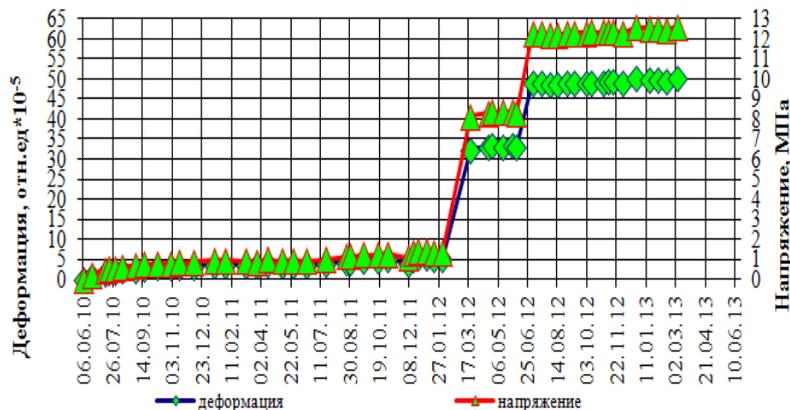


Рисунок 11 – График развития относительных деформаций и напряжений на внутреннем контуре обделки с нагорной стороны в секции 13(период с 2010 по 2013г.).

Способ заключается в выборе некоторого "окна мониторинга", которым является часть кривой, соответствующая определенным длинам волн. В данном случае зная положение потенциальной поверхности смещения и резервной зоны ~7-12м., окно мониторинга выбиралось исходя из некоторого перекрытия этой зоны, т.е. соответствовало интервалу $\lambda=6-12$ м. После выбора окна мониторинга с дисперсионной кривой снимаются значения средней фазовой скорости V_R за каждый цикл мониторинга, и строится график изменения этого параметра во времени (рис.12).

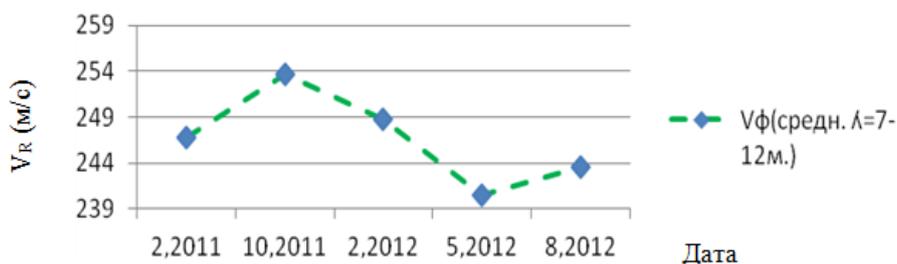


Рисунок 12 - График изменения скоростного режима V_R в мониторинговом окне 6-12м.

Была отмечена высокая корреляция результатов мониторинга. Коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 находятся в пределах 0,73-0,86 (рис.13).

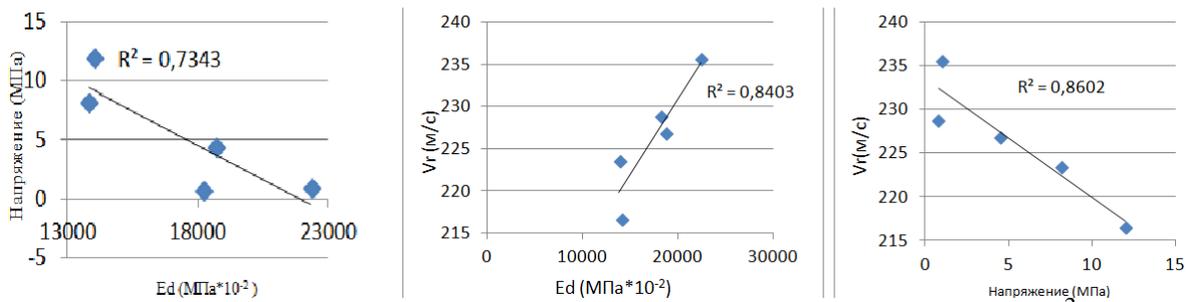


Рисунок 13 – Коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 для параметров: Напряжение(МПа)-Модуль Юнга(МПа10⁻²); V_R (м/с)-Модуль Юнга (МПа10⁻²); V_R (м/с)- Напряжение(МПа) (слева- направо).

Также экспериментальные работы проводились на другом оползневом склоне п. Мамайка. Большое количество разрушенных оползневыми проявлениями строений указывало на значительную оползневую активность участка исследований. В состав комплексного мониторинга также входили сейсмоакустические исследования (МПВ), инклинометрический, гидрогеологический и метод спутниковой интерферометрии. При этом сейсмоакустические данные обрабатывались как традиционным способом МПВ, так и в виде дисперсионного анализа поверхностных волн. Комплексный анализ всех данных различных методов мониторинга показал высокую корреляцию всех измеряемых параметров. При этом было зафиксирована подвижка склона, которая отразилась практически на всех измеряемых параметрах. Рассчитанный коэффициент достоверности аппроксимации для изменений параметров E_d и оконного среднего V_R показал высокие значения $R^2 \sim 0,88$.

В качестве примера экспериментальных работ в горных выработках в работе приведены результаты многолетних наблюдений за вмещающим массивом на участке перегонного тоннеля петербургского метрополитена, известного как "Размыв". В течение 6-ти лет с полугодовым интервалом был осуществлен сейсмоакустический контроль степени разжижения грунтов вокруг тоннеля, с помощью постоянно закрепленной приемной линии. Параллельно с геофизическими исследованиями осуществлялся контроль напряжений обделки тоннеля (НДС).

Экспериментальные исследования заключались в оценке изменений средних скоростей поверхностных волн в выбранном окне мониторинга, который соответствовал интервалу 0-5 метров. Таким образом оценивались изменения, которые происходили в самой ближней к обделке тоннеля зоне (рис. 14).

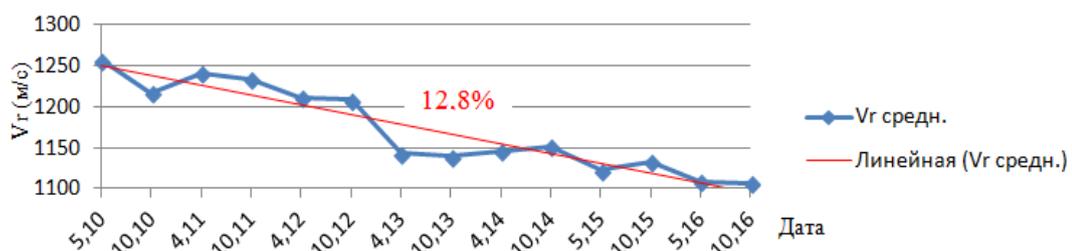


Рисунок 14 - График изменения средней скорости поверхностных волн для окна мониторинга (λ) ~ 0-5 метров.

Выявленные изменения (снижение) скоростного режима поверхностных волн в ближней к тоннелю зоне на 12.8% за шестилетний период времени говорит о том, что значения физико-механических характеристик вмещающих грунтов снизились.

Измерительными датчиками НДС были оснащены кольца на различных пикетах оси тоннеля, а в зону сейсмических исследований непосредственно входило кольцо №148 на Пк180+85,9.

Расчеты показали достаточно высокий коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 \sim 0,85$ между скоростными характеристиками вмещающего массива и значениями НДС обделки тоннеля (рис. 15).

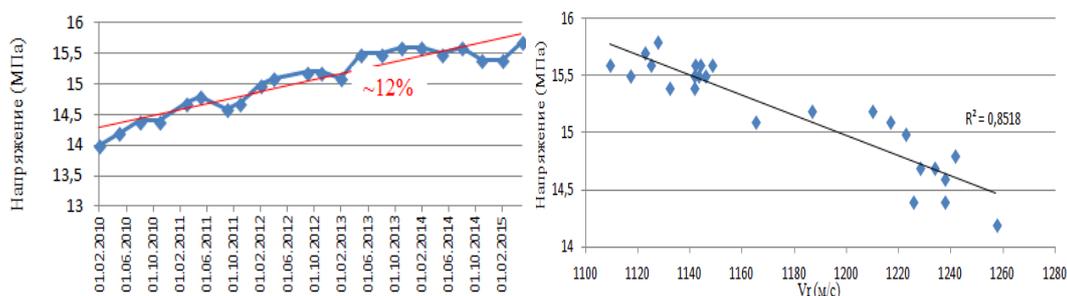


Рисунок 15 – Изменение НДС обделки тоннеля по данным датчика №6; коэффициент достоверности аппроксимации R^2 между параметрами V_R данными НДС.

Для перехода к физико-механическим характеристикам производился пересчет полученных данных в значения динамического модуля сдвига (G_d). Для этого с помощью программы аналитического расчета по имеющимся дисперсионным кривым и известным параметрам обделки тоннеля (исполнительная документация конструкции обделки тоннеля) рассчитываются значения V_s .

Далее по известной зависимости рассчитывались значения G_d , после чего осуществлялось построение графика изменения G_d во времени (рис. 16).

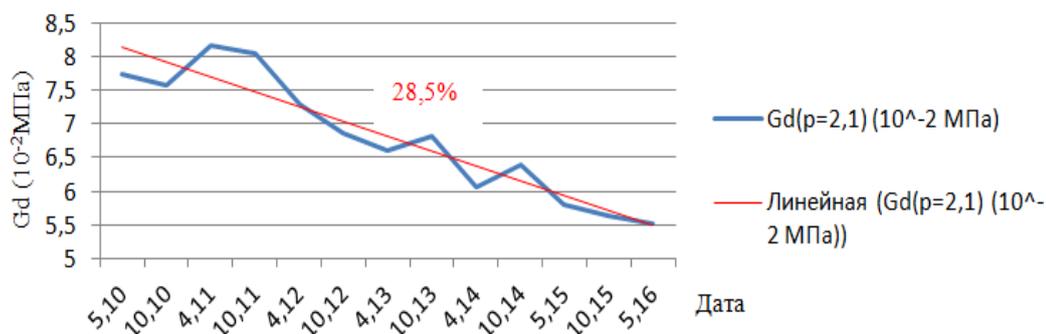


Рисунок 16 - График изменения модуля сдвига (G_d) для окна мониторинга 0-5 метров.

В результате экспериментальных исследований были сформулированы следующие выводы: в грунтах вокруг тоннеля, после ввода его в эксплуатацию, за счет вибрационных воздействий от проходящих поездов и фильтрации воды

вдоль тоннеля, происходит изменение физико-механических свойств, окружающих тоннель грунтов (слабые глины). С этим связано падение скоростных характеристик и значений модуля сдвига (G_d) в ближней зоне обделки тоннеля. Увеличение увлажнения глины приводит к ее разбуханию, с потерей прочностных свойств.

На основе обобщения данных экспериментальных исследований предложенного метода для оценки состояния массива и достаточно высокой взаимосвязи изменений скоростных характеристик поверхностных волн и НДС горной выработки можно сделать вывод о высокой надежности предложенного метода оценки состояния массива как при работе на поверхности, так и при работе внутри горной выработки.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований дано научно обоснованное техническое решение задачи оперативной идентификации геодинамических процессов во вмещающем массиве горных пород методом на основе дисперсионных параметров поверхностных волн, зарегистрированных как на поверхности, так и внутри горной выработки. Эта задача имеет важное экономико-технологическое значение для обеспечения проектно-изыскательских, строительных и эксплуатационных служб сведениями, необходимыми и достаточными для определения влияния как природных, так и техногенных факторов. Целью предоставления такой информации является определение выхода аномальных областей в предаварийное состояние для последующих детальных и обязательно комплексных геотехнических наблюдений.

Основные научные результаты и выводы работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Обоснована принципиальная возможность использования метода дисперсионного анализа поверхностных волн для контроля состояния устойчивости горного массива и обнаружения возрастания геодинамической активности, начиная со стадии упругого деформирования при проведении мониторинговых исследований.

2. Установлены количественные взаимосвязи изменений дисперсионных характеристик поверхностных волн, регистрируемых во вмещающем массиве и изменений значений НДС крепи горных выработок. Это подтверждает связь дисперсионных характеристик поверхностных волн и физического состояния вмещающего массива.

3. Разработана методика оперативной идентификации деформационных процессов в массиве еще на начальной стадии и оценке их развития по данным дисперсионного анализа поверхностных волн. Предложен эффективный способ анализа, позволяющий количественно определять изменения скоростных характеристик поверхностных волн и оценивать удаленность слоев, в которых произошли изменения. Для количественной оценки изменений физико-

механических свойств вмещающего массива предложено использовать динамический модуль сдвига (G_d), с помощью которого производится оценка относительных изменений состояния массива, а также по известным корреляционным зависимостям рассчитываются основные физико-механические характеристики массива.

Предложенный метод по идентификации и оценке развития деформационных процессов в массиве дает возможность производить оперативную экспресс оценку устойчивости как оползневых склонов, так и состояния заобделочного пространства горной выработки через железобетонную обделку, которая характеризуется высокими скоростными характеристиками, когда применение традиционных сейсмических методов регистрации объемных волн затруднено или совсем неосуществимо.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых изданиях

1. Дорохин К.А., Бойко О.В. «Геофизические исследования оползневых процессов на участках размещения железнодорожных тоннелей». Горный информационно-аналитический бюллетень №4/2013. с.247-252
УДК: 624.131.543
2. В.О.Михайлов, Е.А.Киселева, Е.И. Смольянинова, П.Н.Дмитриев, В.И. Голубев, Ю.С. Исаев, К.А. Дорохин, Е.П. Тимошкина, С.А.Хайретдинов «Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи». ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2014, №4, с. 120-130. УДК 551.217.3+532.5
3. Дорохин К.А. «Контроль состояния оползневого склона по изменениям скоростей сейсмических волн в массиве» научно технический журнал «Каротажник» № 1 (235) 2014. с. 3-12 УДК: 550.834
4. Дорохин К.А. «Оценка устойчивости горных массивов методом анализа дисперсии поверхностных волн". Журнал "инженерная геология" 4/2016 с.22-28
5. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., Голубев В.И. «Мониторинг оползневых процессов на участке Северо-Кавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя». Геофизические исследования. 2013 Т.14. №4. с. 5-22.

В других изданиях

6. V. Mikhailov (1), E. Kiseleva (1), E. Smolyaninova (1), V. Golubev(1), P. Dmitriev (1), Yu. Isaev (2), K. Dorokhin (2), A. Hooper (3), S. Esfahany(3), R. Hanssen (3) (1) Institute of physics of the Earth Russian Academy of sciences, Moscow, Russia (2) "Lenmetrogiprotrans", St. Petersburg, Russia (3) Delft University of chnology, Delft, the Netherland «PS-INSAR monitoring of landslides in the Great Caucasus,

Russia, using ENVISAT, ALOS and TerraSAR-X SAR images». ESA Living Planet Symposium 9 - 13 September, 2013 Edinburgh, United Kingdom

7. Дорохин К.А. «Контроль состояния оползневого склона по данным изменения скоростей сейсмических волн в массиве» Журнал «Науки о земле» №2-3 Изд. Геодозор. Москва. 2013г. с. 056-062. УДК: 622.83:551.2
8. Дорохин К.А. «Использование сейсморазведки для ранней оценки устойчивости горного массива» 12-я международная научная школа молодых ученых и специалистов – Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. г. Москва ИПКОН (РАН) 23-27 ноября 2015.
9. Дорохин К.А. «Оценка устойчивости массивов горных пород сейсмоакустическими методами» 2-я Международная научная школа Академика К.Н. Трубецкого - Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. г. Москва ИПКОН (РАН) 21-23 июня 2016.

Подписано в печать с оригинал-макета _____ 2017 г. Формат 60x84 1/16. Бумага «Mega Copy Office». Печать офсетная. Набор компьютерный. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Издание ИПКОН (РАН)
111020 г. Москва Крюковский тупик, д.4