

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР ИМ.  
АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПКОН РАН)

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»

Диссертация  
на соискание степени кандидата технических наук

Научный руководитель-  
чл.-корр. РАН, профессор,  
доктор технических наук  
Захаров Валерий Николаевич

Москва 2017

## Содержание

Введение.....	4
<b>Глава I.</b> Анализ современного состояния и проблем обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений...	11
1.1. Обобщенная характеристика аварий, возникающих на транспортных и инженерных объектах неглубокого подземного заложения.....	11
1.1.1. Влияние эндогенных процессов на состояние горной выработки.....	13
1.1.2. Влияние экзогенных процессов на состояние горной выработки.....	14
1.2. Взаимодействие системы "крепь (обделка) горной выработки-вмещающий массив".....	15
1.2.1. Основные виды воздействий на систему массив-крепь. Причины разнообразия реакции грунтов на изменения напряженного состояния.....	16
1.2.2. Геомеханическая модель горной выработки, рассматриваемая в работе.....	17
1.2.3. Оползневые процессы, как наиболее часто встречающаяся причина изменения напряженного состояния горной выработки неглубокого заложения.....	24
1.2.3.1. Изменение сейсмических характеристик, как индикатор изменений поля напряжений в массиве горных пород.....	25
1.3. Связь скоростных характеристик сейсмических волн с физико-механическими и реологическими свойствами нескальных грунтов.....	28
1.3.1. Связь скорости поперечной волны с модулем сдвига и пористостью.....	34
1.4. Волновые поля, регистрируемые при сейсмоакустических исследованиях.....	36
1.5. Поверхностные волны.....	40
1.5.1. Обзор предыдущих исследований.....	41
1.5.2. Особенности распространения поверхностных волн рэлеевского типа.....	48
1.5.3. Дисперсия поверхностных волн в многослойном массиве.....	51
1.6. Постановка задач исследований.....	53
<b>Глава II.</b> Методика дисперсионного анализа поверхностных волн и способы интерпретации данных.....	56
2.1. Анализ волнового поля, регистрируемого однокомпонентными вертикальными велосиметрами.....	56
2.2. Анализ волнового поля с помощью дисперсионного изображения.....	61
2.3. Регистрация поверхностных волн.....	65
2.4. Алгоритмы расчета фазовых дисперсионных кривых поверхностных волн.....	67
2.5. Оценка влияния параметров, входящих в дисперсионное уравнение на дисперсионную кривую поверхностных волн.....	76
2.6. Способ расчета параметров, характеризующих изменения реологических свойств грунтов по данным дисперсионных параметров	

поверхностных волн .....	86
2.7 Принципиальный алгоритм метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров поверхностных волн.....	88
<b>Глава III. Результаты расчетного математического и программного моделирования геологических процессов в массиве. Оценка уровня отклика дисперсионных кривых поверхностных волн на деформационные процессы в массиве.....</b>	<b>90</b>
3.1. Сейсмическая модель среды.....	90
3.2. Результаты математического расчетного моделирования.....	92
3.3. Результаты программного моделирования.....	100
3.3.1. Описание программы моделирования волнового поля.....	102
3.3.2. Результаты, полученные с помощью программы моделирования волнового поля.....	107
3.4. Основные выводы по результатам моделирования.....	117
<b>Глава IV. Контроль геомеханических процессов в массиве по данным дисперсионного анализа поверхностных волн .....</b>	<b>119</b>
4.1. Результаты мониторинговых экспериментов, полученные на реальных оползневых склонах.....	119
4.1.1. Оценка устойчивости оползневого массива на участке 8бис. пос. Хоста.....	119
4.1.2. Оценка устойчивости оползневого массива на участке 13бис. пос. Мамайка.....	138
4.1.3. Выводы по результатам, полученным при мониторинговых работах на поверхности при изучении оползневых процессов.....	156
4.2. Результаты мониторинговых наблюдений, полученные внутри горных выработок на примере участков Петербургского метрополитена.....	157
4.2.1. Результаты эксперимента на участке №1 (Пк181).....	158
4.2.2. Результаты эксперимента на участке №2 (Пк185).....	172
4.2.3. Основные выводы по результатам, полученным при мониторинговых работах внутри горных выработок.....	181
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>183</b>
 Литература.....	 185

## Введение

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 и 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 окружающий массив 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 является приоритетной задачей, связанная с прогнозом ее устойчивости.

Ослабление и разрыхление пород, связанное с изменением поля напряжений в массиве приводит к образованию вблизи выработки весьма неоднородной зоны неупругих деформаций.



Применяемые на практике статические геотехнические 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 точности их применения, при этом методы 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 изменения 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. При условии, что 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 на регистрируемых сейсмограммах присутствуют интенсивные поверхностные волны, которые занимают до 70% всего волнового поля. Существенная зависимость дисперсионного уравнения поверхностных волн рэлеевского типа от скоростей поперечных волн  $V_s$ , характеризующих массив, и 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 рэлеевского типа 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 весьма 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 уравнения потенциалов смещений, 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 зонах с неблагоприятными геологическими условиями.

3. Разработать метод оперативной идентификации деформационных процессов в массиве и способ количественной оценки изменений физико-механических свойств, слагающих грунтов 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  $\lambda$  (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: сейсморазведка 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 методом математической статистики в строящихся и эксплуатируемых автодорожных и железнодорожных тоннелях, тоннелях Санкт-Петербургского метрополитена, оползневых склонах 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**

Предложенная методика дисперсионного анализа поверхностных волн позволяет заблаговременно определить переход исследуемой области в опасное предаварийное состояние, оценить развитие деформационных процессов еще на этапах начального деформирования при слабых изменениях напряжений, 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**

Предложенная методика обработки сейсмических данных в составе комплекса прямых и косвенных методов применялась при мониторинговых работах ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» в перегонных тоннелях Санкт-Петербургского метрополитена, транспортных тоннелях, 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 целей 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. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» 2015г.; 3-я практическая конференция «Геотехнический мониторинг и мониторинг развития опасных геологических процессов» 2015г.; 1-я международная научно-практическая конференция и выставка ЕАГО «инженерная, угольная и рудная геофизика» 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. к.т.н. Басову А.Д., с.н.с. к.г.-м.н. Бойко О.В научно-исследовательского отдела ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс. за поддержку и содействие в проведении исследований.

## **Глава I. Анализ современного состояния и проблем обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации подземных сооружений**

### **1.1. Обобщенная характеристика аварий, возникающих на транспортных и инженерных объектах неглубокого подземного заложения**

Тоннели приобретают все большее значение в развитии транспортных магистралей. Сложные горные участки преодолеваются железными и автомобильными дорогами с помощью тоннельных сооружений, активно осваивается подземное пространство под плотно застроенными территориями современных городов, развиваются сети гидротехнических тоннельных сооружений, разрабатываются месторождения подземными способами. При проектировании строительстве и последующей эксплуатации последних необходимо обеспечить достаточную надежность всех подземных конструкций в условиях возможного деформирования массива, а если деформирование массива и конструкции тоннеля неизбежно, то вовремя обезопасить людей от катастрофы[1].

Разнообразные аварии, которые происходили в тоннелях во многих странах мира, дают основание характеризовать тоннели как «зоны повышенного риска[2].

Частота аварий в тоннелестроении и тяжесть несчастных случаев выше, чем в других отраслях строительства, это обусловлено спецификой подземного расположения. Характер аварийных ситуаций проявляется многочисленными факторами: длиной и размерами поперечного сечения тоннеля, местом расположения и глубиной заложения, инженерно-геологическими условиями и способами строительства[5].

Наиболее характерные при строительстве тоннелей аварии:

- обрушение породы в забое;
- разрушения и чрезмерные деформации временной и постоянной крепи;
- затопление выработки водой и плывуном;

Аварии в эксплуатируемых тоннелях во многом аналогичны тем, что происходят в процессе строительства, однако имеют свою специфику. Так, если

подавляющее большинство аварий на строящихся объектах происходит в основном в призабойной зоне и лишь затрагивают участок готового тоннеля, то в эксплуатируемых сооружениях авария может случиться в любом месте по всей протяженности горной выработки. Кроме того аварии в строящихся тоннелях происходят внезапно и неожиданно, а в эксплуатируемых они чаще всего являются следствием длительных процессов разрушения и деформирования конструкций обделки. Чаще всего происходят постепенные разрушения, повреждения и деформации конструкций тоннеля, вызванные длительно проявляющимися геотехническими и техногенными факторами, что в конечном итоге приводит к невозможности дальнейшей эксплуатации тоннеля и требует его незамедлительного ремонта или реконструкции[5].

Необходимый конструктивный ресурс тоннеля создается на стадии проектирования расчетными методами на различные сочетания нагрузок и воздействий. Современные нормативные требования, опыт и практика проектирования транспортных сооружений как в России, так и за рубежом, безусловно, учитывают особенности работы конструкций в сложных инженерно-геологических условиях. В связи с тяжелыми последствиями большое внимание при развитии нормативной документации в научно-практической литературе уделяется защите сооружений при сейсмических событиях. Нормами и практикой проектирования в России (СП 14.13330.2011) принято рассчитывать транспортные тоннели на сейсмические воздействия. Считается, что сооружения сложно защитить при катастрофических землетрясениях выше 9 баллов по шкале MSK-64, а сейсмические события меньше 7 баллов не опасны для подземных сооружений[3]. Однако, повреждения и трещины, проявляемые в транспортных тоннелях при их строительстве и эксплуатации даже в пределах нормативно учитываемых сейсмических параметров, показывают, что геодинамика горных массивов и ее влияние на работу транспортных тоннелей полностью не изучены. Землетрясения по-разному проявляются в однородных горных массивах и породах, раздробленных блоковой структурой в результате разломной тектоники. Скольжение по границам блоков может оказать внешнее воздействие на обделку тоннеля, не предусмотренное



при проектировании сооружения, и изменить сложившееся поле напряжений состояния обделок тоннеля[4].

Большинство аварийных ситуаций в системе горный массив-тоннель связаны с обрушением породы. Обрушение возникает из-за ослабления сил сцепления между отдельными частями массива, который из состояния покоя переходит в состояние движения и может быть вызвано принудительным воздействием. В зависимости от размера вывала обрушившаяся порода может целиком или частично заполнить участок тоннеля, образуя так называемый завал. Обрушения породы сопровождаются разрушениями обделки, внутренних конструкций и эксплуатационного оборудования, что приводит к остановке эксплуатации тоннеля и требует ремонтных и восстановительных работ.

Случаи обрушения обделок лишь в отдельных местах на ограниченных площадях указывают на то, что существенное увеличение горного давления в значительной степени связано с местными нарушениями в массиве грунта. Степень риска значительно повышается при пересечении трассой тоннеля зон с повышенной трещиноватостью, участков резкого изменения рельефа местности, зон тектонических разломов и неустойчивых склонов. Также довольно часто встречаются аварии несвязанные с тектоническими участками, а приуроченные к зонам стратиграфической границы, нарушениями технологии производства строительных работ (появление раздробленных грунтов вокруг выработки после буровзрывных работ, некачественное заполнение контакта и др.)[5].

### **1.1.1. Влияние эндогенных процессов на состояние горной выработки**

К эндогенным процессам можно отнести современные тектонические движения земной коры. Это движения, которые происходили в историческое время, а также происходят в настоящее время в результате глубинных процессов[6]. Очевидно, что на разломах, местах структурной неоднородности любые волны земной поверхности будут вызывать напряжения и перемещения. Образовавшиеся в результате геотектонических дислокаций различные формы строения участков

земной коры - тектонические структуры (складки, сбросы, выбросы, сдвиги, надвиги, разломы) представляют повышенную опасность для строящихся и эксплуатируемых тоннелей. Эти данные показывают, что при сейсмических воздействиях подземные конструкции повреждаются, при этом повреждения проявляются сильнее в относительно слабых породах, в местах сопряжений различных конструкций, на границах грунтовых пластов. Такие зоны вызывают наибольшие осложнения при тоннелестроении и сказываются на их дальнейшей эксплуатации несмотря на то, что их суммарная протяженность может составлять всего несколько процентов от всей протяженности трассы. Тектонические зоны и связанные с ними семейства оперяющих и сопряженных трещин нарушают целостность пород и обуславливают их механическую неоднородность, при этом модули деформации снижаются во много раз (до десятков и даже сотен)[5].

### **1.1.2. Влияние экзогенных процессов на состояние горной выработки**

К экзогенным геологическим процессам относятся процессы и явления, такие как: оползни разных типов заложения, обвалы, осыпи и камнепады, сели, просадки грунта, которые вызываются разнообразными причинами: суффозией, карстовыми процессами, замачиванием массовых грунтов, протаиванием грунта в областях развития многолетнемерзлых грунтов, отбором пластовых вод для различных промышленных нужд.

Экзогенные геологические процессы угрожают целостности тоннелей как глубокого, в случае наличия в массиве древнего глубокого зеркала скольжения оползня, так и мелкого заложения, где довольно часто встречаются деформации, связанные со смещениями горных пород под действием гравитационных процессов, а также нарушение целостности порталов тоннелей в результате инерционного воздействия масс грунта, теряющих устойчивость.

Среди наиболее опасных экзогенных геологических процессов и явлений одно из важных мест занимают оползни [6-9,16,21]. Известно, что оползни приносят значительно больший суммарный ущерб, чем наводнения, ураганы и землетрясения

[7]. Обращая внимание на особенности развития современных движущихся оползней, необходимо отметить, что одни из них образуются быстро, внезапно, имеют катастрофический характер, другие развиваются медленно (крип), с затухающей или прогрессирующей скоростью.

Если природные геологические условия неблагоприятны и создается ситуация для действия дестабилизирующих усилий, начинается подготовка к нарушению равновесия масс горных пород. В это время могут происходить различные явления, например, увеличение степени выветрелости пород, изменение их влажности и физического состояния, снижение прочности пород, изменение крутизны склона при подмыве, микроподвижки, пластические деформации (ползучесть)[9], которые в конечном итоге приводят к снижению устойчивости массива горных пород.

## **1.2. Взаимодействие системы "крепь (обделка) горной выработки - вмещающий массив"**

Оценка напряженно-деформированного состояния 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.

В механике подземных сооружений [10] крепь (обделка) горных выработок и окружающий массив представлены как находящиеся в контакте элементы единой деформируемой системы, взаимодействующие друг с другом под влиянием внешних нагрузок и воздействий. Отсюда действует основополагающий принцип механики подземных сооружений - принцип взаимодействия крепи (обделки) с окружающим массивом горных пород.

Крепь тоннеля обеспечивает сохранение заданных горной выработке размеров и формы для защиты от обрушений и чрезмерных смещений окружающих пород. Конструкция крепи должна воспринимать давление горных пород и другие виды воздействий без разрушения. Разрушение крепи происходит вследствие нарушения

равновесия системы при достижении закритических значений напряжений. При этом расчетная схема крепи (обделки) всегда представляет собой схему контактного взаимодействия крепи с деформируемым массивом.

### **1.2.1. Основные виды воздействий на систему "массив-крепь". Причины разнообразия реакции грунтов на изменения напряженного состояния**

К основным видам воздействий, которым может быть подвергнута система "массив-крепь", можно отнести: горное давление (собственный вес пород); тектоническое поле начальных напряжений; внешнее гидростатическое давление подземных вод; внутренний напор (для напорных тоннелей и шахт); сейсмические воздействия землетрясений склоновые деформации и др. В настоящее время под горным давлением понимается давление вышележащей толщи, и оно рассматривается как основная причина деформаций и разрушений горных пород и крепи. Это содержание вложено и в определение, предложенное Международным бюро по механике горных пород: "Горное давление - собирательное понятие для всех процессов (явлений), происходящих в результате нарушения равновесия массива горных пород"[10]. При этом характер проявления горного давления и его интенсивность могут быть связаны с различными причинами: литологическим составом вмещающих пород; соотношением мощностей, прочностными и деформационными параметрами; литологическими разностями и др.

Разнообразие поведения горных пород под нагрузкой заключается в различии внутренних связей между частицами и структурными элементами, слагающими породу и задающими ограничения возможности смещения их относительно друг друга. Под увеличением действия напряжений растяжения или касательных напряжений происходит разрыв внутренних связей. Пиковая нагрузка, достигаемая при простейших видах испытаний (одноосное сжатие или растяжение или др.), определяет соответствующий предел прочности материала, при этом в процессе достижения пика нагрузки испытываемый образец проходит через ряд стадий и состояний, которые определяют его дальнейшее поведение[11,12].

### 1.2.2. Геомеханическая модель горной выработки, рассматриваемая в работе

Горные выработки, в которых в рамках данной диссертационной работы проводились исследования, являлись транспортными тоннелями, которые были возведены различными способами проходки [13,14](рис.1.1).

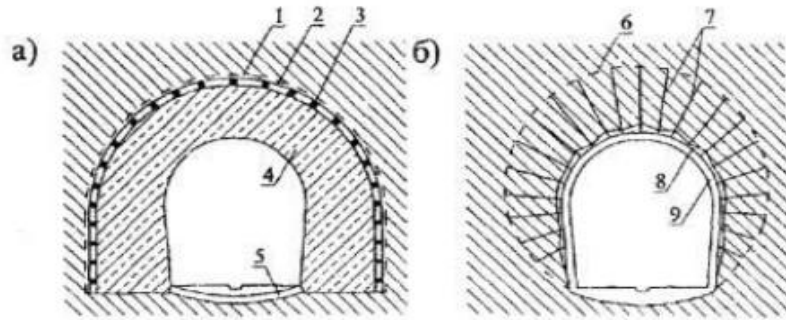


Рисунок 1.1 – Сравнение конструкций обделок, выполняемых горным способом и новоавстрийским методом[14]

а) горный способ: 1- деревянная затяжка; 2- стальная арка; 3- рошпаны; (1,2,3 – составляют временную крепь, расположенную вне постоянной обделки); 4- бетонная или железобетонная постоянная обделка; 5- обратный свод;

б) новоавстрийский метод: 6- несущий породно-анкерный свод; 7 – анкеры; 8- наружный слой обделки из набрызг-бетона толщиной 5-15 см (вместе с анкерами служит временной крепью); 9- внутренний слой постоянной обделки из набрызг-бетона или бетона толщиной 15-35 см.

Напряженно-деформированное состояние крепи в таких подземных выработках оценивается по показателям струйных датчиков, которые жестко устанавливаются на крепи (обделке). Впоследствии регистрируемые показатели пересчитываются в нормальные и тангенциальные напряжения, действующие в крепи. Схема установки датчиков представлена в разделе 4.2. При этом напряжения, регистрируемые датчиками пропорциональны напряжениям, которые действуют в окружающем выработку массиве.

В работе Н.С. Булычева «Механика подземных сооружений» рассматривается классическая задача теории упругости о напряженно-деформированном состоянии упругого кругового кольца (рис. 1.2).

Напряжения на внешнем и внутреннем контурах кольца заданы и описываются выражениями:

$$P_{(i)} = P_{0(i)} + P_{0(i)} \cos \Theta; \quad (1.1)$$

$$q_{(i)} = q_{2(i)} \sin 2\Theta, \quad (1.2)$$

где  $i$  - индекс, принимающий значения 0 и 1, для обозначения соответственно внутреннего  $L_0$  и внешнего  $L_1$  контура;  $P(i)$  – нормальные (радиальные) напряжения;  $q(i)$  – касательные напряжения.

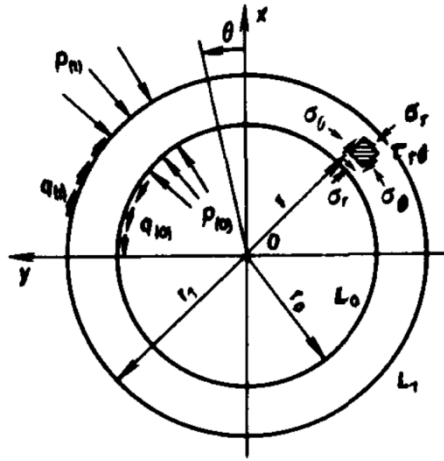


Рисунок 1.2 – Схема к расчету упругого кольца.

Нормальные напряжения на внутреннем и внешнем контурах кольца определяются выражениями[10]:

$$\delta_{\Theta in} = P_{0(1)} m_1 - P_{0(0)} M_2 - (P_{2(1)} n_1 - q_{2(1)} n_2 - p_{2(0)} n_3 + q_{2(0)} n_4) \cos 2\Theta; \quad (1.3)$$

$$\delta_{\Theta ex} = P_{0(1)} m_1' - P_{0(0)} m_2' - (P_{2(1)} n_1' - q_{2(1)} n_2' - p_{2(0)} n_3' + q_{2(0)} n_4') \cos 2\Theta, \quad (1.4)$$

$$\text{где } m_1 = \frac{2c^2}{c^2 - 1}; \quad m_2 = m_1 - 1; \quad m_1 = m_2;$$

$$m_2 = m_1 - 2; \quad n_1 = 2m_1 m_2; \quad n_1 = m_1 m_2;$$

$$n_3 = \frac{c^4 + 6c^2 + 1}{(c^2 - 1)^2}; \quad n_4 = 2 \frac{c^4 + 2c^2 - 1}{(c^2 - 1)^2}; \quad n_1 = n_3;$$

$$n_2 = 2 \frac{-c^4 + 2c^2 + 1}{(c^2 - 1)^2}; \quad n_3 = 2m_2 m_2; \quad n_4 = n_2; \quad c = \frac{r_1}{r_0}.$$

Под действием напряжений, выраженных формулами 1.1 и 1.2, кольцо деформируется, при этом точки внешнего и внутреннего контура испытывают перемещения, которые можно описать формулами[10]:

$$U_{(i)}=U_{0(i)}+U_{2(i)}\cos 2\Theta; \quad (1.5)$$

$$V_{(i)}=V_{2(i)}\sin 2\Theta,$$

где  $U(i)$  – радиальные перемещения;  $V(i)$ - тангенциальные (окружные) перемещения. Значения индекса  $(i)$  тоже что и (1.1 и 1.2). При этом параметры, входящие в выражения (1.5) можно выразить формулами:

$$u_{0in} = \frac{r_0}{4G(c^2 - 1)} (P_{0(1)}d_1 - p_{0(0)}d_2); \quad u_{ex} = \frac{r_1}{4G(c^2 - 1)} (P_{0(1)}d_1' - p_{0(0)}d_2');$$

$$(u_2 + v_2)_{in} = \frac{r_0}{6GD} (p_{2(1)}a_1 - q_{2(1)}a_2 - p_{2(0)}a_3 + q_{2(0)}a_4);$$

$$(u_2 - v_2)_{in} = \frac{r_0}{2GD} (p_{2(1)}a_1' - q_{2(1)}a_2' - p_{2(0)}a_3' + q_{2(0)}a_4');$$

$$(u_2 + v_2)_{ex} = \frac{r_1}{6GD} (p_{2(1)}b_1 - q_{2(1)}b_2 - p_{2(0)}b_3 + q_{2(0)}b_4);$$

$$(u_2 - v_2)_{in} = \frac{r_1}{2GD} (p_{2(1)}b_1' - q_{2(1)}b_2' - p_{2(0)}b_3' + q_{2(0)}b_4');$$

где  $d_1 = c^2(\aleph + 1)$ ;  $d_2 = 2c^2 + \aleph - 1$ ;  $d_1' = c^2(\aleph - 1) + 2$ ;  $d_2' = \aleph + 1$

$\chi$  – коэффициент вида напряженного состояния, который принимает значения при плоском напряженном состоянии:

$$\aleph = \frac{3 - \nu}{1 + \nu}$$

для плоской деформации:

$$\aleph = 3 - 4\nu; \quad a_1 = c^2(3 + c^2); \quad a_2 = c^2(3 - c^2); \quad a_3 = 3c^2 + 1 + D;$$

$$a_1' = c^2(2c^4 + c^2 + 1); \quad a_2' = c^2(c^2 + 1); \quad a_3' = c^2(c^4 + c^2 + 2) - D;$$

$$a_4' = c^4(c^2 + 1) - D; \quad b_1 = c^4(c^2 + 3) - D; \quad b_2 = c^4(3 - c^2) + D;$$

$$b_3 = c^2(3c^2 + 1); \quad b_4 = c^2(3c^2 - 1); \quad b_1' = 2c^4 + c^2 + 1 + D;$$

$$b_2' = c^2 + 1 + D; \quad b_3' = c^2(c^2 + 1) + 2; \quad b_4' = c^2(c^2 + 1); \quad D = \frac{(c^2 - 1)^3}{\aleph + 1}$$

Для выработки неглубокого заложения (рис. 1.3а) глубина  $H$  соизмерима с радиусом  $r_0$ , поэтому на напряженно деформированное состояние массива в окрестности выработки существенное влияние оказывает близость земной поверхности  $L_1$  (рис. 13б). В этом случае геометрической моделью массива служит полуплоскость [10].

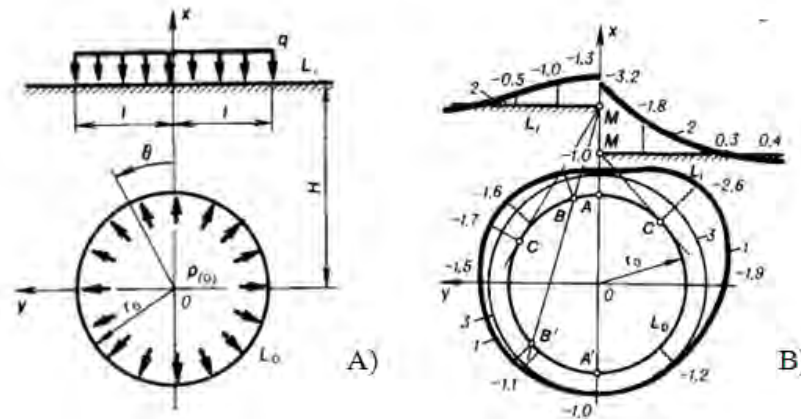


Рисунок 1.3 - а) Схема к определению напряженно-деформированного состояния выработки неглубокого заложения; б) Эпюры напряжений в напорном тоннеле при глубине заложения  $H=2r_0$  а) и  $H=1.5r_0$  б): 1- тангенциальные напряжения  $\sigma_\theta/P_0$  на контуре  $L_0$ ; 2- напряжения  $\sigma_y/P_0$  на земной поверхности  $L_1$ ; 3 - напряжения  $\sigma_\theta/P_0 = 1$ , характерные для заглубленной выработки.

Алгоритм расчета напряжений в массиве пород в окрестности выработок некруглого сечения разработан проф. Н.Н. Фотиевой [10]. Среди некруглых сечений выработок наиболее простым является эллиптическое сечение (рис.1.4).

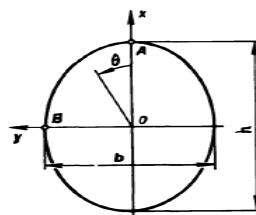


Рисунок 1.4 – Эллиптическое сечение выработки

Нормальные тангенциальные напряжения на контуре эллиптического сечения можно описать выражением [10]:

$$\sigma_\theta = \gamma H \frac{(1+\lambda)(1-m^2) - 2(1-\lambda)(\cos 2\theta - m)}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2} \quad (1.6)$$

где,  $m = \frac{h-b}{h+b}$ ;  $h$  и  $b$  – высота и пролет выработки.



На рисунке 1.5(А) показаны эпюры тангенциальных напряжений на контуре сечения сводчатой выработки (с пологим лотком) При различных коэффициентах бокового давления в массиве[10].

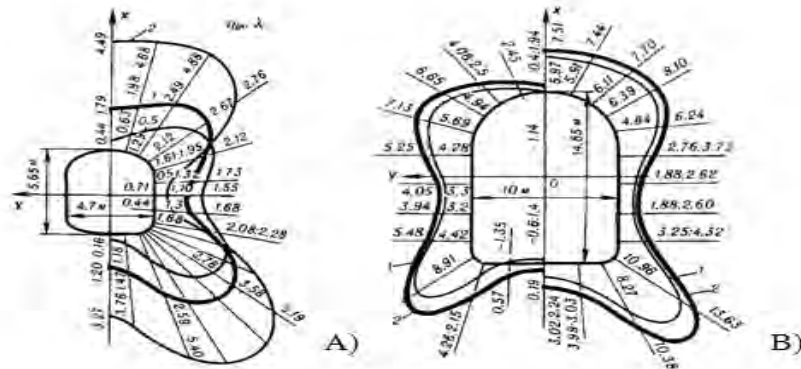


Рисунок 1.5 - 1) Эпюры нормальных тангенциальных напряжений  $\sigma_0/\gamma H$  на контуре сечения выработки при различных значениях коэффициента бокового давления в массиве  $\lambda$ ; 2) Эпюры напряжений  $\sigma_0$  (МПа) на контуре сечения выработки от гравитационного поля начальных напряжений и сейсмических воздействий землетрясений при коэффициенте бокового давления  $\lambda = 1/3$  а) и  $\lambda = 1$  б). 1- гравитационное напряжение; 2- суммарная эпюра напряжений с учетом сейсмических воздействий.

Экстремальные напряжения, например, от сейсмических воздействий складываются с напряжениями, вызываемыми полем начальных напряжений в массиве. Как видно на рисунке 1.5(Б), сейсмические воздействия могут вызвать существенное увеличение сжимающих напряжений в своде. Кроме того при  $\lambda = 1/3$  в своде могут появиться растягивающие напряжения, которые от начального поля напряжений здесь не возникают. Более чем в 2 раза могут увеличиться растягивающие напряжения в лотке.

Это доказывает, что поле напряжений в массиве может меняться вследствие различных причин, причем все влияющие факторы суммируются, и в результате получается довольно сложное поле напряжений, которое может достигнуть критических значений и привести к разрушению горной выработки.

Наиболее подходящая модель, описывающая склоновые, оползневые процессы имеет вид жестко - пластической модели массива. Модель имеет две области, соответствующие участкам 1 и 2 диаграммы напряжений (рис.1.6):

жесткую область, где деформации отсутствуют, и пластическую область. Пластическая область 2 находится в пределах свода обрушения в кровле выработки (рис. 1.6а). Нагрузка на крепь обуславливается весом пород в объеме свода и составляет (МН на 1 м. выработки):

$$P = \frac{4}{3} \gamma \frac{b^2}{f} \quad (1.7)$$

,где  $b$ - полупролет выработки.

Среднее сопротивление крепи, необходимое для обеспечения равновесия,

$$P = \frac{2 \gamma b}{3 f} \quad (1.8)$$

В случае несвязанной сыпучей среды ( $C=0$ ) это выражение приобретает вид

$$P = \frac{2 \gamma b}{3 \operatorname{tg} \varphi} \quad (1.9)$$

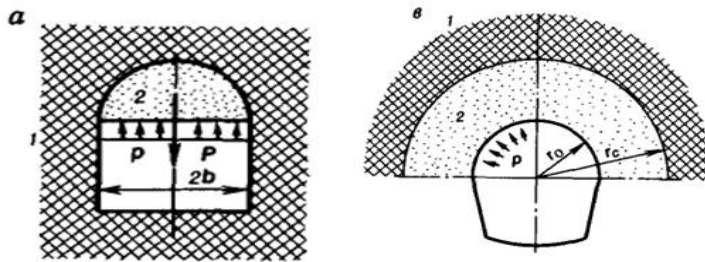


Рисунок 1.6 - Расчетная схема к определению давления на крепь в соответствии с жестко -пластической моделью: а)- М.М. Протодьяконова; в)- зоны разрушения пород: 1- жесткая область; 2- пластическая область.[10]

Модель зоны нарушенных пород над выработкой не рассматривает механизма и причин образования зоны нарушенных пород. Радиус зоны  $r_c$  задается как исходная предпосылка к расчету (рис.1.6в). Давление на крепь, обусловленное весом пород в зоне нарушения определяется выражением[10]:

$$P = \frac{\gamma r_0}{\alpha - 1} \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r_c} \right)^{\alpha - 1} \right] - C \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r_c} \right)^{\alpha} \right] \operatorname{ctg} \varphi, \quad (1.10)$$

где  $\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\alpha - 1}$

При радиусе зоны нарушенных пород, стремящихся к бесконечности,  $r_c \rightarrow \infty$  имеем:

$$P = \frac{\gamma r_0}{\alpha - 1} - C \operatorname{ctg} \varphi \quad (1.11)$$

Для несвязанной сыпучей среды ( $C=0$ ) эта формула приобретает следующий вид:

$$P = \frac{\gamma r_0}{\alpha - 1} \quad (1.12)$$

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

Если в скальных породах горное давление проявляется только в местах нарушений массива, характеризующихся сильной трещиноватостью, то в пластичных породах (глинах, мергелях, сланцах) горное давление может достигать значительной величины, при этом оно может проявляться сверху, с боков выработки, а в некоторых случаях и снизу. Для такого вида пород особенно характерно нарастание горного давления с течением времени. В процессе разработки забоя они могут быть устойчивы, но спустя некоторое время, под влиянием выветривания или насыщения влагой и набухания, теряют прочность и развивают сильное давление на крепь. В сыпучих породах горное давление проявляется сверху и с боков выработки. Даже при самых незначительных выпусках крепи происходит быстрое нарастание давления с распространением зоны нарушения на большие расстояния от выработки. В местах проявления течи грунтовых вод в выработку, происходит местное вымывание частиц сыпучих пород, что может стать причиной вывалов и обрушений. Особенно большое горное давление развивается в плывунах, которые не образуют свода естественного равновесия, а давят всей толщей[15].

Также отмечено, горное давление существенно возрастает при промедлении с креплением выработки или неплотном прилегании элементов крепи к породе, к похожему результату приводит не заполнение зазоров между обделкой тоннеля и контуром выработки. Чем быстрее крепь вступает в совместную работу с прилегающей породой, тем меньшим будет распространение зоны пониженных напряжений и, следовательно, разрушенных пород[15]. Дальше устойчивость горной выработки зависит от происходящих в массиве геодинамических процессов, влияние которых способно изменить напряженное состояние крепи (обделки) горной выработки до критического уровня, что может стать причиной аварии.

### 1.2.3. Оползневые процессы как наиболее часто встречающаяся причина изменения напряженного состояния горной выработки неглубокого заложения

Как уже было показано выше, изменение поля напряжений в массиве в конечном счете отражаются на НДС крепи (обделки) горной выработки. Наиболее частой причиной деформации обделок тоннелей неглубокого заложения являются оползневые (склоновые) деформации (рис.1.7). Известно, что при активизации оползневых деформаций в массиве происходит изменение как напряженного состояния массива, так и значительное изменение физико-механических характеристик, слагающих массив грунтов. Особенно ощутимо это происходит в районе области поверхности смещения оползневого тела и так называемой резервной зоны[16].

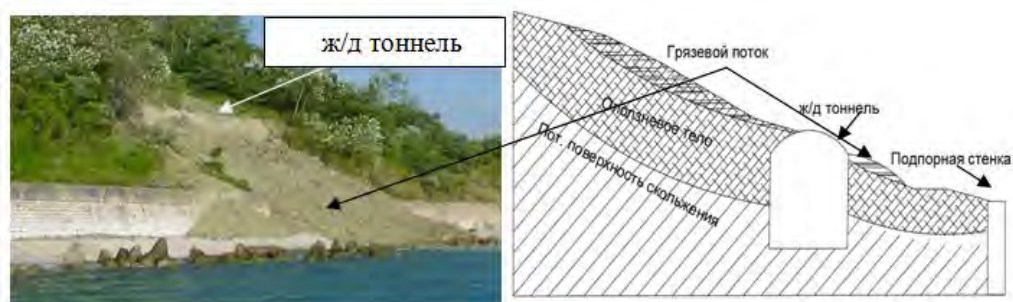


Рисунок 1.7 – Пример реального расположения ж/д тоннеля в массиве с активными оползневыми процессами.

Под действием гравитационных сил в этих областях формируются значительные растягивающие напряжения, которые являются причиной формирования вторичной структуры пород с выраженной трещиноватостью. С другой стороны, процесс образования оползня может быть связан с изменением физических характеристик грунтов в результате суффозионных, абразионных и других процессов. Наиболее критично, если изменения происходят в зоне поверхности скольжения, например, в результате увлажнения глинистых грунтов, при котором значительно снижается сцепление, что в свою очередь, приводит к смещению баланса удерживающих и сдвигающих сил в сторону сдвигающих. В

итоге движение оползня, даже если не произошло одномоментное разрушение горной выработки, в случае если выработка находится глубже поверхности смещения оползневого тела, приводит к существенным изменениям поля напряжений во вмещающем массиве, что в свою очередь может стать причиной последующего деформирования обделки горной выработки.

### **1.2.3.1. Изменение сейсмических характеристик как индикатор изменения поля напряжений в массиве горных пород**

Возможность использования сейсмических методов для изучения изменений напряженного состояния массива горных пород основана на связи сейсмических характеристик с показателями состояния свойств пород, отображающими и реагирующими на любые изменения напряженного состояния во вмещающем массиве.

Большое количество проведенных экспериментальных модельных исследований институтом ВСЕГИНГЕО в 1977 году[17] показали тесные связи сейсмических характеристик и параметров напряжений в массиве. Исследователями были произведены опытные ультразвуковые работы на моделях с учетом соблюдения известных условий подобия.

По итогам масштабных испытаний было отмечено, что причина изменения скорости сейсмических волн внутри модели заключается в изменении действующих напряжений, которые измерялись в ходе всех экспериментов. Испытания показали практически полную идентичность в характере изменения скоростей сейсмических волн и напряжений[8].

Анализ результатов проведенных экспериментов позволил выделить один основной момент: характер изменений напряжений ( $\sigma$ ) в исследуемых частях модели практически полностью идентичен характеру изменений параметров поля упругих колебаний на протяжении всего периода испытаний. Незначительные несоответствия могут быть связаны с несовершенством самих индикаторов. При подготовке смещений параметры поля упругих колебаний изменяются во всех

частях модели. Наибольший диапазон изменений наблюдается вблизи образующихся при дальнейшем развитии процесса зон и границ нарушения сплошности среды. Моменту начала смещения (моменту нарушения сплошности среды) соответствует выход ультразвуковых характеристик на некоторые экстремальные значения.

Следует подчеркнуть, что почти во всех проведенных экспериментах чувствительность ультразвуковых измерений на начальной стадии нарушения устойчивости модели при имитации подрезки оказалась гораздо выше чувствительности определения действующих напряжений с помощью индикатора напряжений.

Смещениям всегда предшествовало изменение параметров поля упругих колебаний, связанное с изменением устойчивости модели. Интервал времени между изменением ультразвуковых характеристик и началом смещений обычно составлял 6-8 часов, что соответствует, с учетом масштаба построения модели[17], 8-25 суток в реальном масштабе времени.

Эксперимент, проведенный ВСЕГИНГЕО в 1977 году, показал, что использование сейсмических методов целесообразно прежде всего на стадии подготовки оползневых смещений, когда деформации либо очень малы, либо отсутствуют вовсе, и большинство инженерно-геологических методов не позволяют получать надежную информацию об устойчивости склона и ее изменении. Сейсмические методы именно на этой стадии развития оползневого процесса обладают максимальной чувствительностью.

Эксперименты на реальных оползневых массивах показали, что в результатах, полученных в сейсмическом диапазоне частот, также четко проявляется одна из основных закономерностей изменения поля упругих колебаний при развитии склоновых процессов, выявленных при ультразвуковом моделировании[20]. Полученные результаты (рис.1.8) показали, что сразу же после подрезки склона скорости заметно уменьшаются, в то время как по геодезическим реперам признаки смещения отмечены лишь через 240 часов после искусственной активизации

оползня. Таким образом, можно констатировать, что смещение задолго предваряется падением сейсмических скоростей [16].

Результаты экспериментов прошлых лет показали большое преимущество сейсмических методов по раннему определению деформационных процессов в массиве, когда еще нет прямых признаков смещения, это позволяет повысить оперативность и достоверность прогнозов оползневой устойчивости. А совместный контроль НДС крепи поможет правильно оценить происходящие в массиве процессы по взаимной работе системы «обделка горной выработки – вмещающий массив», тем самым повысив объективность контроля и последующего прогноза.

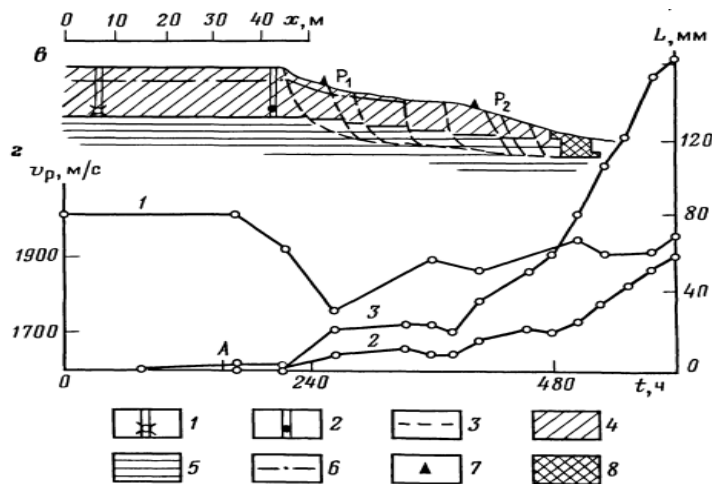


Рисунок 1.8 – Схема проведения (сверху) и результаты (внизу) натурального изучения динамики оползня сейсмическими методами [16]

1-Положение пункта возбуждения во взрывной скважине; 2 – положение приемника в наблюдательной скважине; 3- поверхности смещения; 4- суглинки; 5- глины; 6- геодезические реперы; 7- участок подрезки; графики: а - изменения скорости продольных волн в массиве между взрывной и наблюдательной скважинами; б, в – горизонтальные смещения геодезических реперов; г- изменения напряжений по данным медозы №3; А – момент начала подрезки; Б- момент начала интенсивных смещений, вызванных подрезкой.

На основании рекомендации по устойчивости оползневых склонов [125], разработанной ООО Геопроект, под руководством С.И. Маций в 2010-м году, физико-механические свойства грунтов играют существенную роль в расчетах коэффициента устойчивости оползневого тела. Такие параметры как сцепление (С),

угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) присутствуют в уравнении расчетов  $K_u$  (коэффициент устойчивости)(1.13-1.14).

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n N_i \sin \alpha_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^n D_i \sin \beta_i} \quad (1.13)$$

- коэффициент устойчивости из условия равновесия сил.

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \operatorname{tg} \varphi_i] R_i}{\sum_{i=1}^n N_i f_i + \sum_{i=1}^n W_i x_i + \mu_h \sum_{i=1}^n W_i e_i + \sum_{i=1}^n D_i d_i} \quad (1.14)$$

- коэффициент устойчивости из условия равновесия моментов сил.

, где  $c$  - удельное сцепление в грунте в основании расчетного отсека, кПа;

$\varphi$  – угол внутреннего трения грунта в основании отсека, град.

При этом динамические параметры физико-механических свойств грунтов определяются при помощи известных данных о скоростях распространения волн продольного и поперечного типа.

### **1.3. Связь скоростных характеристик сейсмических волн с физико-механическими и реологическими свойствами нескальных грунтов**

Известно, что наиболее простым механизмом передачи сейсмических колебаний является идеальная упругость. Ему соответствует получившая широкое распространение в практической сейсморазведке идеально упругая модель. Такая модель применима вследствие малой величины деформаций в сейсмических волнах. Их связь с напряжением достаточно хорошо отображается законом Гука. В действительности в реальных средах не может происходить передачи колебаний от точки к точке без потери сейсмической энергии[21].

Можно утверждать, что для того или иного типа породы, характеризующейся постоянным минеральным составом, типом и качеством цемента, каждому конкретному состоянию соответствует свой, совершенно определенный ряд значений физико-механических характеристик и сейсмических параметров.

Аналогично показатели инженерно-геологических свойств и сейсмические параметры реагируют на изменения любого из факторов, описывающих состояние породы. Таким образом, вытекают два важных вывода:



*-Во-первых*, основной причиной, вызывающей как изменение показателей инженерно-геологических свойств горных пород, так и сейсмических параметров упругих волн, распространяющихся в массиве породы, является состояние горной породы.

*-Во-вторых*, невозможно изменить какую-либо одну характеристику, одновременно не изменив при этом и всех других.

Это обозначает, что все характеристики, описывающие свойства породы, также как и сейсмические параметры распространяющихся в массиве пород упругих волн, взаимозависимы[22].

На первых порах использование сейсмического метода в инженерной геологии основывалось на эмпирических (корреляционных) связях, выявленных для тех или иных типов грунтов, встречающихся в конкретных геологических условиях. Первые корреляционные зависимости между сейсмическими и физико-механическими свойствами нескальных (неупругих) грунтов, которые нашли широкое применение в практике инженерно-строительных изысканий, были получены экспериментально независимо друг от друга Бондаревым В.И. и Минделем И.Г.[23,24]. В последующем круг таких зависимостей был значительно расширен, и на этой основе начато широкое применение сейсморазведки при инженерно-строительных изысканиях. Несмотря на успехи такого подхода уже в первых последующих работах этого направления[25,26] были намечены пути поисков функциональных соотношений между сейсмическими и физико-механическими свойствами нескальных грунтов. Основные трудности на этом пути заключались в том, что не существует строгой теоретической модели среды, удовлетворительно описывающей свойства реальных грунтов и позволяющей одновременно теоретически предсказывать ее сейсмические и физико-механические свойства[16].

Для преодоления этой трудности Бондаревым В.И. совместно с Н.И. Теряевым, В.Б. Писецким, С.М. Крылатковым и др. была разработана новая сейсмическая модель зернистой среды, физико-механические свойства которой близки к свойствам реальных грунтов. При этом количественные характеристики физико-механических свойств таких грунтов удалось поставить в определенное

соответствие с нормативными значениями свойств грунтов, регламентируемых действующими, на тот момент времени, официальными документами[27].

В вышеуказанных работах в качестве связующего звена между сейсмическими и физико-механическими свойствами при создании модели грунта выступает коэффициент пористости и, в некоторых случаях, другие физические свойства среды. На этой основе была сформирована расчетная матрица связей между сейсмическими характеристиками и физико-механическими свойствами грунтов и тем самым, построена функциональная зависимость между ними.

Нескальные горные породы в естественном залегании принято считать зернистыми дифференциально упругими средами, находящимися под естественным давлением. При этом обычно считают, что между твердой, жидкой и газообразной фазами существует либо несовершенная связь (для большинства глинистых грунтов), либо эта связь практически отсутствует полностью (песчаные грунты). Для описания особенностей распространения упругих волн в таких средах предложен целый ряд моделей[28].

В последующем Ф.М. Ляховицким, Е.А. Козловым был внесен ряд дополнений, которые давали возможность использования предложенных формул для расчетов при любом значении пористости среды. Г.Н. Назаровым предложен кардинально новый подход к изучению особенностей распространения упругих волн в песчано-глинистых породах, но все же это не позволило с достаточной точностью рассчитывать скорости распространения упругих волн в нескальных грунтах, залегающих в самой верхней части разреза. Модель песчано-глинистого грунта, предложенная В.И. Бондаревым принципиально отличалась от моделей других авторов внутренним строением кварцевых ядер, что позволило теоретически находить значения скорости распространения сейсмических волн для песчано-глинистых грунтов существенно точнее и объективнее [29-33].

Начиная с 1968 года Бондаревым В.И. был проведен ряд экспериментальных сейсмических исследований на реальных грунтах с целью оценки их физико-механических свойств. При выполнении работ было замечено, что истинные скорости распространения продольных и поперечных волн и некоторые

характеристики (модуль Юнга, модуль сдвига, сцепление, и др.), вычисленные на их основе, хорошо коррелируются с целым рядом важнейших физико-механических характеристик.

Полученные на основе взаимного сопоставления сейсмических и инженерно-геологических данных первые корреляционные зависимости[34] нуждались в проверке их эффективности в разнообразных инженерно-геологических условиях. Это заставило исследователей существенно расширить географию исследований, что, конечно же, заставило еще совершенствовать методику интерпретации результатов сейсмических наблюдений. Все это привело к созданию сейсмического способа оценки важнейших физико-механических характеристик нескальных грунтов[34,35]. В результате систематизации данных в 1971 году была получена целая серия корреляционных уравнений, связывающих сейсмические и физико-механические характеристики песчано-глинистых грунтов. А уже в 1974 году они были опубликованы в методических рекомендациях[36].

Большинство полученных корреляционных зависимостей неоднократно проверялись различными организациями в различных регионах страны и все эти проверки, за редкими исключениями, давали вполне удовлетворительные результаты.

Как отмечали Ф.М. Ляховицкий и Н.Н. Горяйнов (1992)[37], эффективность сейсмоакустических методов сильно зависит от связи сейсмических свойств пород с их объективными характеристиками, которые определяют инженерно-геологические особенности изучаемого объекта. Основными характеристиками пород тут являются: вещественный и фазовый состав, характер связей между отдельными элементами твердой фазы и величина действующих напряжений. При этом для грунтов верхней части разреза главную роль играют прочность структурных связей и то, в каком состоянии находится грунт [38].

Многочисленными исследованиями установлено[118-123], что с повышением давления скорость упругих волн в горных породах возрастает, затухание уменьшается, а максимум частотного спектра сигнала смещается в высокочастотную область. Увеличение значений скорости сигналов при одних и тех

же давлениях колеблется для различных типов пород от нескольких процентов до 30-40% (причем, чем крепче порода, тем меньше прирост скорости). Основными факторами, влияющими на возрастание скоростей в горных породах, при возрастании напряжений являются: закрытие пор и микротрещин, рост числа упругих контактов между отдельными зернами и увеличение площади их соприкосновения. По мере уплотнения пород быстро возрастает модуль Юнга, в результате происходит увеличение скорости. Особенно отчетливо это проявляется в самой верхней части разреза. Степень уплотнения пород в большей мере зависит от испытываемой породами нагрузки. При этом скорости распространения поперечных волн ( $V_s$ ) изменяются еще больше, чем скорости продольных волн ( $V_p$ ), в относительном диапазоне. В большинстве горных пород отношение

$$n = \frac{V_p}{V_s} \quad (1.15)$$

где,  $V_p$  и  $V_s$  - Скорости объемных волн (продольные и поперечные соответственно) составляет приблизительно 1.7-2. В глинистых водонасыщенных породах и пльвунах это соотношение может значительно возрастет, достигая значений 7-10, вследствие резкого уменьшения скорости  $V_s$  в таких породах. Коэффициент затухания упругих колебаний более чувствителен к изменению напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств горных пород, так как он теснее связан с пористостью, трещиноватостью и минеральным составом. Декременты поглощения продольных  $\theta_p$  и поперечных волн  $\theta_s$  волн имеют одинаковые по порядку величин значения. В крепких консолидированных породах декремент поглощения имеет величину менее 0,01, в поверхностных частях разреза - возрастает до 0,1 и более[39].

Прямо противоположный эффект влияния на акустические параметры вызывает увеличение пористости и трещиноватости горных пород.

Лабораторные и полевые эксперименты, связывающие скорости продольных и поперечных волн с величиной напряжений, свидетельствуют о возрастании скоростей волн при увеличении давления в породах. При этом отмечается, что наибольшее возрастание как  $V_p$  так и  $V_s$  происходит в диапазоне изменения

нагрузок от нуля до  $0.5-1 \text{ н/м}^2$ , т.е. именно в том диапазоне, который представляет интерес при инженерно-геологических исследованиях в верхней части разреза. Также немногочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что напряжение (давление) оказывает существенное влияние не только на скорости, но и на коэффициенты поглощения продольных и поперечных волн, причем  $\alpha_p$  и  $\alpha_s$  более чувствительны к изменению напряжений, чем  $V_p$  и  $V_s$ .

В естественных условиях напряжения могут изменяться не только по глубине, но и по площади. Такие изменения бывают связаны с тектоническими нарушениями, влиянием склоновых деформаций и т.д. Как установлено в последнее время, горизонтальные напряжения по своей величине могут значительно превышать вертикальные[20].

К основным показателям прочностных свойств пород можно отнести предел прочности на сжатие  $\sigma_{сж0}$  и растяжение  $\sigma_{p0}$ , а также сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и  $G$  модуль сдвига.

Между  $\sigma_{сж0}$  и скоростями упругих волн наблюдается достаточно тесные связи. Для рыхлых песчано-глинистых пород на основании модели упруго-вязко-пластической среды связь между  $\sigma_{сж0}$  и скоростями  $V_p$  и  $V_s$  имеет следующий вид[40]:

$$\sigma_{сж0} = AV_{p,s}^2 + B, \quad (1.16)$$

где  $A$  и  $B$  - показатели, зависящие от типа породы и значения  $\mu_d$ .

Если росту сжимающих напряжений  $\sigma_{сж}$  соответствует увеличение  $V_p$  и  $V_s$ , то росту растягивающих напряжений - их уменьшение, причем уменьшение сжимающих можно рассматривать как увеличение растягивающих и наоборот.

Таким образом, очевидно, что с увеличением  $\sigma_{сж0}$ ,  $\sigma_{p0}$ ,  $\sigma_{сж}$ ,  $C$ ,  $G_d$ , скорости упругих волн возрастают, а с уменьшением этих параметров - уменьшаются.

Также установлены достаточно тесные связи между сцеплением ( $C$ ) в песчано-глинистых породах и динамическим модулем сдвига ( $G_d$ ), характеризующим степень сопротивляемости среды изменению формы[41].

Общий вид связи между  $C$  и  $G_d$  выражается как:

$$C = aG_d + b \quad (1.17)$$

где, а и b - параметры, зависящие от типа породы и условий ее залегания.

### 1.3.1. Связь скорости поперечной волны с модулем сдвига и пористостью

Из теории упругости известна зависимость динамического модуля сдвига и скорости поперечной волны:

$$G_d = V_s^2 \cdot \rho \quad (1.18)$$

Отметим, что формула (1.18) соответствует скорости распространения волны в идеально упругой среде. Скорость в анизотропной - поглощающей среде пропорциональна скорости в идеально упругой среде, а коэффициент поглощения  $\alpha_s$  обратно пропорционален, что хорошо согласуется с экспериментальным представлением о том, что породам с меньшей скоростью распространения колебаний соответствует большее поглощение и наоборот. В тоже время эффективный упругий параметр  $G_d$ , он же ( $\mu$ ) – постоянная Ламе, которая определяется величинами пористости и трещиноватости горных пород, а также величиной напряжения.

Дисперсия скоростей поперечных волн в реальных породах невелика и достигает нескольких процентов. Другими словами, параметр  $V_s$  в анизотропной, неупругой среде определяется в основном величиной  $\sqrt{\mu/\rho}$ , а так как пределы изменения  $\bar{\rho}$  в ненарушенных породах малы, то  $V_s$  зависит, главным образом, от эффективной упругой константы среды  $\mu$ , которая, как показали многочисленные эксперименты и теоретические расчеты, имеет тесную и нелинейную связь с пористостью, коэффициентом Пуассона и действующими напряжениями[117].

Результаты исследований В.Н. Захарова показали, что, исходя из физических представлений об упругом воздействии на пористую насыщенную флюидом среду, увеличение коэффициента пористости с 10% до 30%, вызывает рост декремента затухания в 7,3 раза. Эти данные подтверждается практикой. Экспериментально измеренные параметры  $\alpha_s, V_s$  и  $\omega$  в зоне трещиноватости изменяются следующим образом:  $\alpha_s$  возрастает в 2-3 раза,  $V_s$  падает на 20-25%, а  $\omega$  уменьшается на 40-50%.

Исходя из этих величин, декремент затухания должен увеличиться в 2,5-4,8 раза[117].

На рисунке 1.9 показаны графические зависимости от коэффициента пористости некоторых параметров: модуля сдвига  $\mu$  (Gd), коэффициента поглощения  $\alpha_s$ , декремента затухания  $\vartheta$ , относительной безразмерной плотности твердой фазы  $\gamma$ , а также ее релаксационных параметров  $\tau_s^o$  и  $\theta_s^o$ , характеризующих вязкоупругие свойства[117].

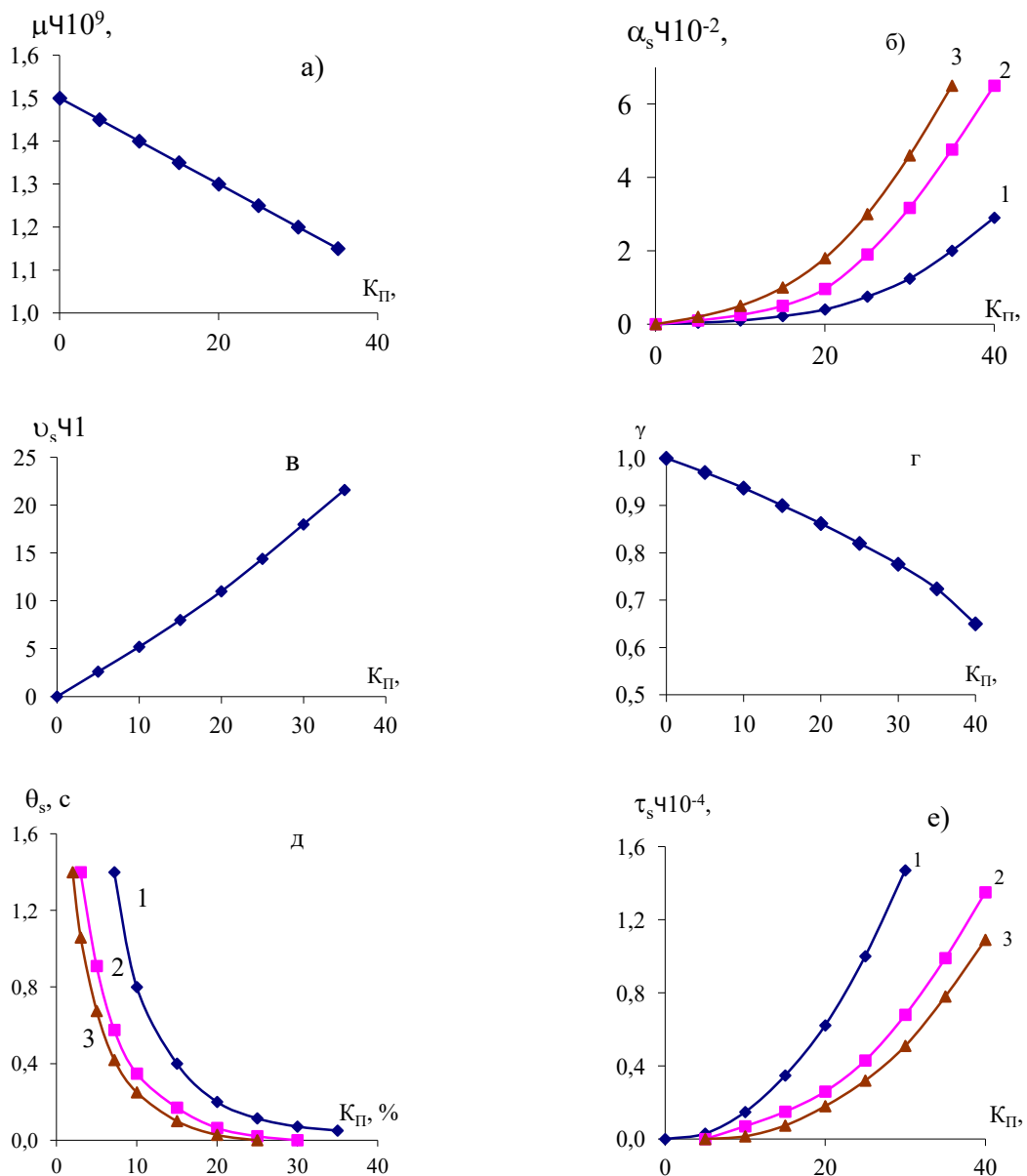


Рисунок 1.9 - Влияние коэффициента пористости на:

а) модуль сдвига  $\mu$ , б) коэффициент поглощения  $\alpha_s$ , в) декремент затухания  $\mathcal{D}$ , г) относительную безразмерную плотность твердой фазы среды  $\gamma$ , д, е) релаксационные параметры  $\tau_s^o$  и  $\theta_s^o$ , характеризующих вязкоупругие свойства

При этом скорости поперечных волн мало реагируют на изменение флюидного состава, что имеет очень существенное практическое значение при мониторинговых исследованиях, когда необходимо исключить (понизить) влияние параметра увлажнения, который заметно сказывается на скорости продольной волны и может стать причиной неверной интерпретации происходящих в массиве процессов.

#### **1.4. Волновые поля, регистрируемые при сейсмоакустических исследованиях**

Программные и аппаратурные возможности позволяют в полном объеме регистрировать волновое поле на поверхности наблюдений, но по целому ряду причин, как правило, используется лишь некоторый упрощенный образ волнового процесса. Возбуждая волну в сложно устроенной реальной среде, мы получаем сложное по своему характеру волновое поле из-за многоуровневой схемы преобразования волн разных типов на каждой сейсмической границе и их последующей суперпозиции. Упрощение волнового поля некоторой простой моделью необходимо, как и упрощение структуры строения среды. На более ранней стадии представлений о среде как о толсто-слоистой, оперировали с отдельными сейсмическими волнами. Для более сложного класса моделей с  $d$  (неоднородность)  $< \lambda$  (длина волны) характерной чертой становится непрерывная интерпретация большого числа неразрешенных волн, и здесь приходится оперировать со сложными суммарными волнами либо волновыми пакетами. Аналогично тому, что модели класса  $d < \lambda$  более точно описывают реальные среды, суммарные сейсмические волны полнее отображают суть реальных волновых процессов. Однако многие



представления, которые были получены для простых сейсмических волн, могут быть обобщены и перенесены на сложные суммарные волны[21].

Считается, что при возбуждении упругих колебаний источником, расположенном вблизи поверхности образуются два основных типа сейсмических волн, объемные и плоские - поверхностные. В упругих твердых средах объемные волны распространяются в виде двух типов колебаний – продольных и поперечных, которые различаются направлением смещения частиц.

Тут необходимо отметить важную особенность, к которой автор вернется в следующих главах: характер зависимости скорости объемных волн от частоты определить сложно вследствие малости изменений скорости даже при существенном изменении частоты. Имеются данные, которые позволяют говорить об аномальной дисперсии скоростей, т.е. об их увеличении при уменьшении периода колебаний. Наиболее надежно дисперсия проявляется в сухих, рыхлых ЗМС (зоне малых скоростей), где Л.В. Молотовой отмечено изменение  $V_p$  от 325 до 350 м/с при изменении частот от 20 до 90 Гц. В нормальном разрезе осадочных пород дисперсия скорости в сейсмическом диапазоне не превышает первых единиц процентов, в кристаллических породах она, по-видимому, еще меньше. К сожалению, на этот счет получено мало экспериментальных данных. При этом плоские поверхностные волны достаточно заметно диспергируют в многослойной среде и это свойство будет использовано автором для идентификации природы волн.

Основным источником сведений о скоростях распространения продольных волн в изучаемом разрезе являются объемные продольные волны, которые сравнительно легко регистрируются (рис. 1.10) даже при несложных методических приемах ведения полевых работ. При этом в практике работ наибольшее распространение получили методики использования головных и рефрагированных волн.

Сложнее обстоят дела с изучением строения среды по скорости распространения поперечных волн.

Существует 2 варианта получения информации распределения поперечных волн в массиве горных пород.

Первый, наиболее эффективный путь изучения распределений скорости поперечных волн, состоит непосредственно в регистрации объемных поперечных волн (рис. 1.11). Но этот метод не всегда возможен.

К сожалению, в некоторых условиях даже по усложненной методике работ с использованием горизонтальных сейсмоприемников и горизонтального способа возбуждения сейсмической волны, не всегда удастся выделить на сейсмограммах полезные волны поперечного типа. В этом случае необходимо применять дополнительные методики возбуждения и приема, что значительно увеличивает время выполнения работ и их стоимость.

Если же работы ведутся через высокоскоростную обделку тоннеля, возбуждение поперечных волн вообще затруднительно. В случае тонкой высокоскоростной обделки горной выработки импульс возбуждаемый источником передается в среду по нормали к поверхности, в следствии чего обменные волны (в частности PSP) вообще не возникают[42].

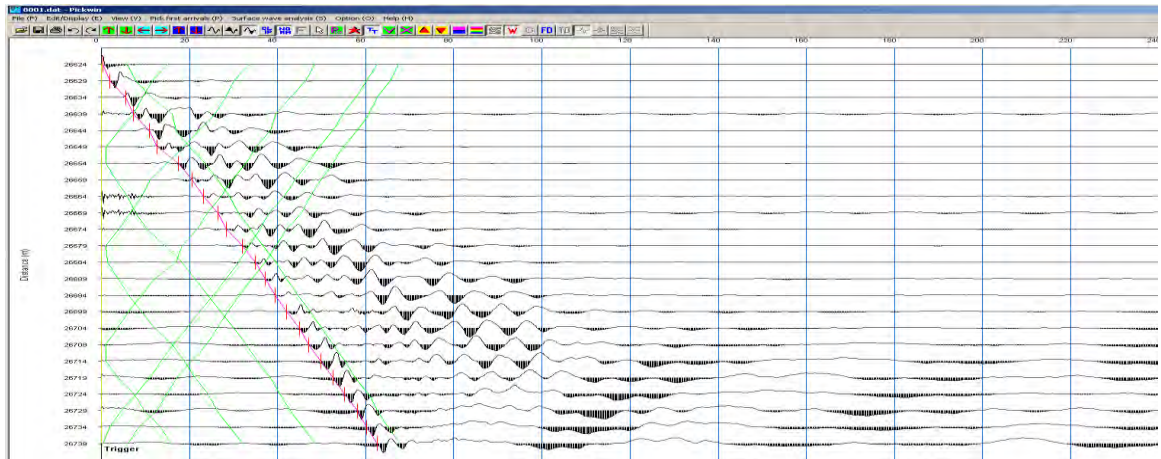


Рисунок 1.10 - Пример выделения первых вступлений прихода объемной продольной волны (окно программы Pickwin).

Второй способ является косвенным путем определения строения среды по скорости распространения поперечных волн и основывается на использовании поверхностных сейсмических волн.

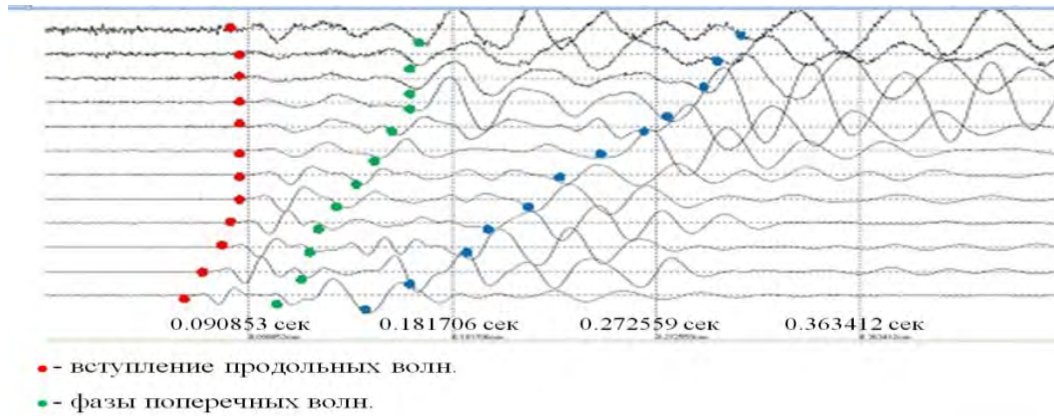


Рисунок 1.11 – Пример выделения фазы зарегистрированной поперечной волны (окно программы Seismo2010).

Технология их получения в полевых условиях обычно сравнительно проста (рис. 1.12), но требует определенной методики анализа регистрируемого волнового поля и последующих специальных технологий расчета, описываемых в главе II.

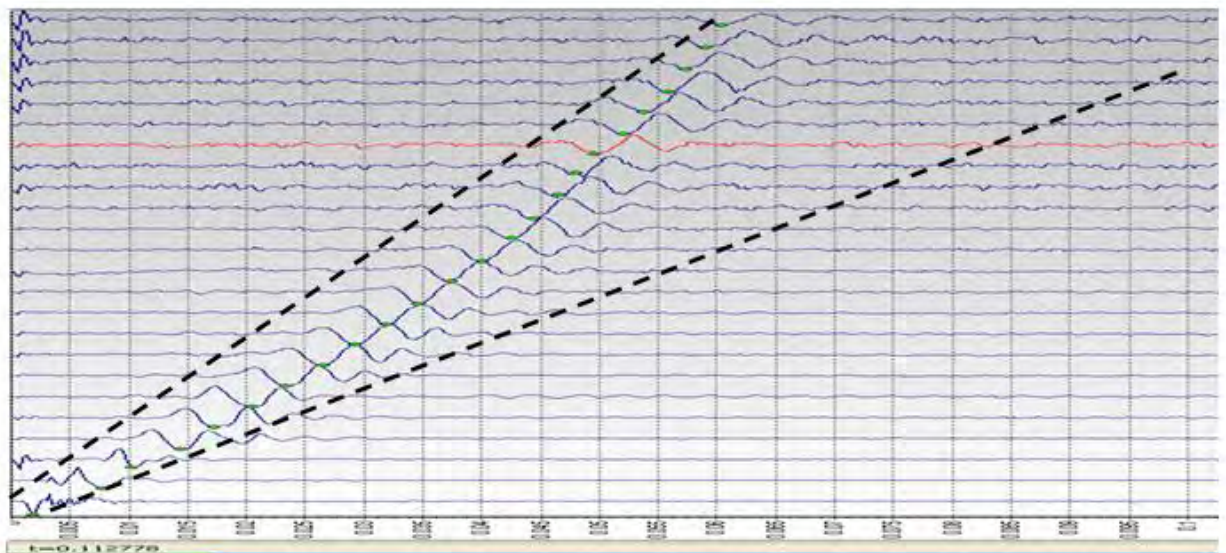


Рисунок 1.12 – Пример выделения фазы поверхностной волны (зеленые маркеры) и пакета диспергированных поверхностных волн (окно программы Pickwin). Зелеными точками и стрелками показаны фазы волны рэлеевского типа. На сейсмограмме заметно характерное изменение частоты волн, вместе с изменением фазовой скорости (явление дисперсии).

На сейсмограммах почти всегда выделяются достаточно интенсивные поверхностные волны (рис.1.13), которые занимают до 70% всего волнового поля.

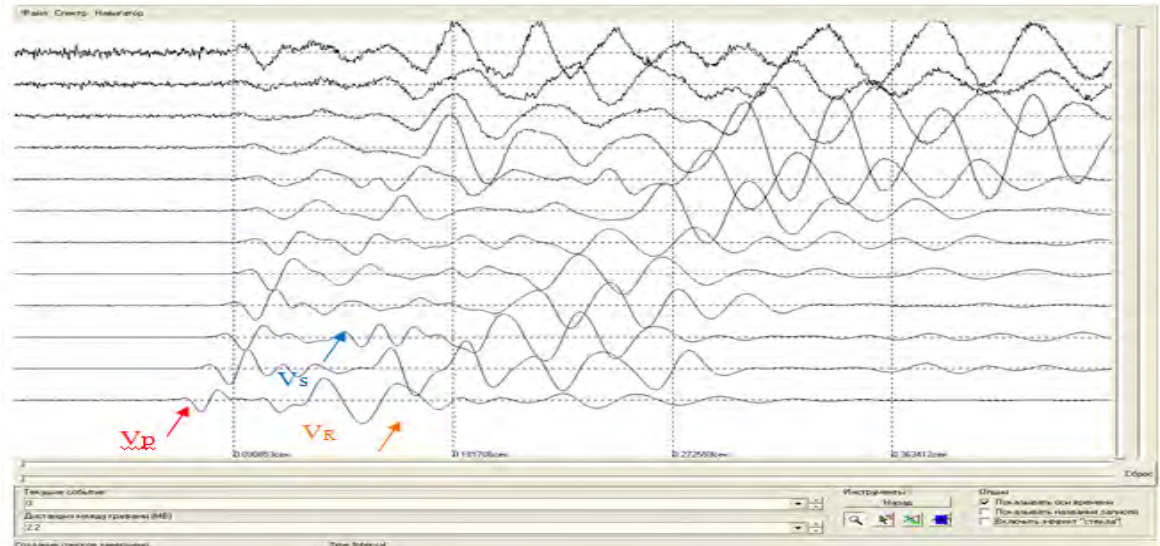


Рисунок 1.13 – Сейсмограмма с прослеженными фазами продольных, поперечных волн и поверхностных волн рэлеевского типа (окно программы Seismo 2010).

Определение природы той или иной волны всегда было достаточно сложной процедурой, и даже опытного геофизика-интерпретатора заставляет проводить весьма трудоемкий волновой анализ. В настоящее время программные продукты позволяют осуществлять идентификацию природы волн с помощью дисперсионного анализа всего регистрируемого волнового поля (см. главу 2).

## 1.5. Поверхностные волны

Поверхностные волны принадлежат к числу наиболее интенсивных сейсмических волн, возникающих от различных источников возбуждения, действующих на поверхности земли. Это создает с одной стороны весьма благоприятные условия для возбуждения сейсмических волн даже слабыми воздействиями, а с другой - приводит к необходимости принятия мер борьбы с ними в случаях, если основной интерес представляют объемные сейсмические волны. Раньше в сейсморазведке поверхностные волны воспринимались как волны - помехи, но в настоящее время они стали незаменимым инструментом в сейсмоакустических исследованиях.

### 1.5.1. Обзор предыдущих исследований

Информация о поверхностных волнах использовалась еще в 1920-х годах для получения характеристик глубинного строения Земли. Расширенное исследование поверхностных волн началось в 1950-х и 1960-х годах благодаря продвижениям в области численного анализа и развитию аппаратуры для регистрации сейсмических событий. Основные результаты, полученные в теории поверхностных волн в сейсмологии, наиболее подробно изложены в работах А.Л. Левшина[43-46] в которых подробно рассмотрен метод численного расчета кинематических и динамических характеристик поверхностных волн, для случая вертикально-неоднородных сред. В работе Левшина А.Л. рассмотрен более совершенный, нежели используемый за рубежом, способ Томсона - Хаскеля[47]. На основе которого, впоследствии, были разработаны приемы определения строения среды и параметров источников по данным поверхностных волн, с применением матричных методов[47-49]. Thomson и Haskell ввели  $4 \times 4$  и  $2 \times 2$  слойные матрицы " для P-SV волн и SH – волн, чтобы связать волновое поле в соседних слоях. Уравнение дисперсии для слоистого полупространства тогда получается из матрицы элементов произведением всех слоев матриц. Метод Thomson-Haskell был обобщен Gilbert и Backus для произвольной горизонтально-слоистой области. Они вводят общий вид ' матрица функции распространения", которая включает в себя матрицу Haskell как частный случай для однородных слоев. Для оптимизации метода Thomson-Haskell, который страдает в своей первоначальной формулировке проблемой внутренней потери точности при вычислении дисперсии волны Рэлея.

Поверхностные волны с целью инженерных исследований, изучение которых началось с 50-х годов XX века, на начальном этапе, изучались прямым определением ее скорости. Для этого возбуждалась бегущая монохроматическая волна, строго гармоническая, например, синусоидальная волна с постоянными во времени частотой, амплитудой и начальной фазой, и измерялось время пробега между двумя точками. Так как частота этой волны была известна, то длина волны



определялась непосредственным делением на частоту. Первая новаторская работа, которая использовала такой подход, относится к 1950-ым годам [50].

О возможности использования поверхностных волн в качестве полезных при решении задач инженерной геологии впервые в СССР было указано А.Л. Левшиным в 70-х годах. Особый интерес к ним возник, когда была доказана принципиальная возможность их применения для оценки важнейших физико-механических свойств грунтов. Дело в том, что оценка физико-механических свойств грунтов практически затруднена без одновременного знания истинных значений скоростей распространения продольных и поперечных волн. Определение истинных значений скоростей распространения поперечных волн наиболее достоверно определяется с помощью SH и SV волн. Тем не менее, как уже отмечалось, во многих случаях получение уверенных и качественных записей поперечных волн затруднительно по различным причинам. Потому возникла необходимость резервного способа для определения истинных скоростей распространения поперечных волн в среде. Таким резервным способом, и оказался способ, основанный на использовании поверхностных сейсмических волн. Способ интерпретации поверхностных волн Рэлея и Лява, предложенный в 1973 году А.Л. Левшиным[43], заключался в построении и анализе дисперсионных кривых фазовых и групповых скоростей.

По результатам способа предложенного Левшиным, определяются положения границ и скорости поперечных волн в слоях верхней части разреза. В случае отсутствия заметной дисперсии интерпретация поверхностных волн Рэлея ведется способом, который предложил В.И. Бондарев в 1974 году. Данный способ заключается в определении мощности слоя, вовлеченного в колебательный процесс, и скорости поперечных волн с отнесением ее к середине этого слоя. Для расчетов по методу Бондарева предложено пользоваться номограммой Кнопова-Коптева предложенной 1969 г.

В ряде работ представителей другой научной школы, таких как: Бабич В.М., Бабич Г.Н., Фомина Н.А. например, «О расчете волн Лява с использованием асимптотических формул» 1968г.[51]; Аленицин А.Г. в работе «Волны Рэлея в однородном упругом полупространстве, неоднородном по двум координатам»

1963г.[52]; Мухина И.В., Молотков И.А. в работе «О распространении волн Рэлея в упругом полупространстве»1975г.[53], развиваются иные подходы по изучению поверхностных волн, основанные на использовании асимптотических методов теории решения дифференциальных уравнений. Но как оказалось, практическая неопределенность условий применимости этих методов создает трудности при прямом использовании этих методов на практике.

В общем, до 80-х годов исследования были направлены на дисперсию фазовой скорости волн рэлеевского типа при наличии слоя на полупространстве. Более сложные модели не рассчитывались из-за сложности расчетов, а компьютерные технологии не были еще развиты на должном уровне. В многочисленных публикациях приводятся аналитические зависимости, которые учитывают изменение скорости наблюдаемой волны рэлеевского типа в зависимости от скоростей слоя и полупространства, характеризующей их плотности и мощности слоя перекрывающего полупространство[54-58].

В публикациях перечисленных авторов показано, что поверхностные псевдорэлеевские волны являются незатухающими, для идеальной модели, нормальными волнами. При наличии слоя на полупространстве фазовая скорость волн рэлеевского типа, изменяется от значений равных скорости в полупространстве при низком диапазоне частот и скорости в покрывающем слое при высоком диапазоне частот. Толстым И.[54] был предложен приближенный способ построения дисперсионных кривых волн рэлеевского типа в двухслойной среде по коэффициентам полного внутреннего отражения нормальных волн[55,59]. Идеология способа соответствует теории распространения волн, например скорости волн Лэмба при  $2\pi h \gg \lambda$  стремятся к скорости рэлеевских волн.

В 1974 году Воронковым О.К. и Маровым В.И.[57-60], был предложен способ, который был основан на решении задачи о распространении поперечных волн в слое, имеющем мощность  $h$  на полупространстве, известной из теории упругости Ландау[61].

$$tg(x_1 h) = \frac{G_2 x_2}{G_1 x_1}; \quad (1.19)$$

$$\text{где, } x_1 = \omega \sqrt{\frac{1}{V_{s1}^2} - \frac{1}{V_s^2}}; \quad x_2 = \omega \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \frac{1}{V_{s2}^2}};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} - \text{круговая частота; } T - \text{период; } G_1, G_2 - \text{модули сдвига; } V_{s1}, V_{s2} -$$

скорости поперечных волн в слое на полупространстве.

Уравнение (1.18) определяет в неявном виде зависимость  $V_s$  от частоты и имеет решение только в случае  $V_{s2} > V_{s1}$ .

Предложенные авторами способы являются аналитическими, и не требуют полного построения дисперсионной кривой фазовой скорости поверхностных волн для расчета скоростей поперечных волн.

В методических рекомендациях по изучению статических и динамических характеристик деформируемости горных пород сейсмическими методами, разработанных в 1985 году во ВНИИГ им. Веденеева были представлены специальные палетки дисперсионных кривых для определения скоростей волн поперечного типа по скоростям поверхностных волн рэлеевского типа [54,57,59,60,62]. Использование аналитических способов расчета, носит значительное неудобство, связанное с необходимостью применять для расчетов параметры, которые изначально неизвестны. К этим параметрам можно отнести скорости поверхностных волн, как в покрывающем слое, так и в полупространстве, а также их плотности. Это предопределяет использование дисперсионных кривых только методом подбора, что в свою очередь существенно снижает достоверность расчетов характеристик пород.

Благодаря появлению более мощных компьютеров существенно усовершенствовались методы анализа данных поверхностных волн, позволяющие с большей точностью оценивать их спектральные дисперсионные и поляризационные характеристики. Развивались методы количественной интерпретации этих измерений, позволяющие эффективно находить скоростные и плотностные модели среды, согласующиеся с наблюдениями, и оценивать неоднозначность и разрешающую способность данных. Все эти результаты базировались на существенно продвинутой теории и развитых эффективных методах расчета



спектральных характеристик и волновых полей поверхностных волн в вертикально- и радиально неоднородных средах.

В СССР и за рубежом был выполнен ряд теоретических и экспериментальных (модельных и полевых) исследований эффектов, вызываемых такого рода латеральными неоднородностями в характеристиках поверхностных волн. Эти результаты имели прикладное значение: были найдены подходы, позволяющие в определенных условиях интерпретировать наблюдения в рамках горизонтально-неоднородных моделей и получать содержательные сведения о характере неоднородностей достаточно обоснованными (с физической точки зрения) методами.

С целью создания сравнительно простой и достаточно эффективной технологии использования поверхностных волн в практике инженерной сейсморазведки, Бондаревым В.И. была осуществлена корректировка выводов, полученных асимптотическими методами на базе их сравнения с результатами, получаемыми на основе классической теории поверхностных волн. Для этого была решена прямая динамическая задача теории распространения поверхностных волн вдоль поверхности градиентного полупространства: скорости распространения упругих волн в котором увеличивались с глубиной по линейному или близкому к нему законам. Сравнение конечных результатов, полученных на основе названных подходов, позволило внести определенные эмпирические коррективы в формулы асимптотической теории и на этой основе создать методику определения строения среды по скорости распространения поперечных волн в разрезе, нашедшую в свое время широкое применение в инженерных работах.

В работах Коптева В.И. «Ультразвуковой многоканальный каротаж с прижимным зондом при инженерно-геологических изысканиях» 1966г; Савича А.И., Коптева В.И., Никитина В.Н., Яценко З.Г. «Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород» 1969г] упоминается, что при исследованиях в горных выработках регистрируется интенсивная поперечно-поверхностная волна, которая характеризуется фазовой скоростью, меняющейся от  $V_r$  до  $V_s$ , в зависимости от величины  $\lambda/2\pi r$ , где  $r$  - радиус горной выработки. Это позволяет полагать, что при

возбуждении сейсмического импульса внутри горной выработки, возникают поверхностные волны, которые распространяются вдоль горной выработки[63,64].

Начиная с середины 80-х годов, с развитием возможностей персональных компьютеров и совершенствования программных продуктов, появились и исследования направленные на более подробное изучение скоростей волн поперечного типа, используя фазовые скорости волн рэлеевского типа[65-74].

Авторами Е.Торнтон и Р.Т.Гуза в статье «Трансформация распределения подъема волн» в 1983 году исследовали функцию плотности вероятности проникновения непрерывных и разрывных поверхностных волн на определенную глубину. Соотношения, приведенные авторами, связывают длину волны с глубиной проникновения и диаметром ее рассеивания в случае разрыва[65-66].

В этот период появляются способы, которые теоретически могут производить расчеты и в случае нетрадиционных разрезов, когда скорости с глубиной увеличиваются, но и в случае инверсного распределения скоростей. Конечно, эти способы основаны на расчетах различными методами приближений.

В 1998-2002 годах в работах Park C.B., Xia J., Miller R.D., Miura, H., были предложены современные методы, основанные на наблюдениях поверхностных волн, которые были настроены на определении инверсии волн таким образом, чтобы данные позволяли выделять отдельную бегущую поверхностную волну, имеющую компоненты определенной частоты. Это является важнейшим свойством поверхностных волн - зависимость скорости распространения волны от частоты, которое называется дисперсией[76-77].

В способе, который предложили Stokoe K.H., Rix G.J. и Назарян С., в расчетах используются дисперсионные кривые фазовых скоростей волн рэлеевского типа[72,78-79]. Предложенный способ основан на спектральном анализе поверхностных волн, который сокращенно известен как SASW (Spectral Analysis Surface Waves). При анализе, в спектральной области, с помощью преобразования Фурье, рассчитываются фазовые сдвиги между сигналами, зарегистрированными двумя каналами. При этом геометрия расположения источника и приемников известны. Следовательно, для каждой частоты, воспользовавшись методом

наименьших квадратов, можно рассчитать фазовую скорость. Метод SASW подразумевает разносы сейсмоприемников на различные расстояния как друг относительно друга, так и относительно пункта источника (удара). При этом фазовую скорость рассчитывают из соотношения:

$$V_{ph} = \frac{2\pi f}{\Delta_{ph}}, \quad (1.20)$$

где  $V_{ph}$ - фазовая скорость;  $f$ - частота;  $\Delta_{ph}$  – разность фаз.

Главным недостатком предложенного авторами способа является тот факт, что в процесс преобразования Фурье могут попадать как высшие волновые моды, так и многочисленные волны помехи[80].

В 2004 году Массарш К.Р. в своей работе предложил оценку деформационных характеристик грунтов (модуль сдвига-  $G$ ) при больших и малых деформациях. По результатам было показано, что основываясь на комплексном анализе результатов сейсмических и лабораторных исследований, можно определить модуль деформации при ее небольшом уровне и спрогнозировать изменение этого показателя при увеличении деформации сдвига. В работе предлагается зависимость, которая может быть использована для прогноза изменения нормализованного модуля сдвига как функции сдвиговой деформации. Также показано, что скорость деформации при сейсмическом тестировании при небольшой величине деформации невысока и сравнима с показателями, полученными в обычных геотехнических лабораторных тестах. По результатам исследования, автор заключает, что модуль сдвига при малых деформациях может быть точно определен в ходе как полевых, так и лабораторных исследований, При полевых исследованиях автор рекомендует применять метод SASW- (Spectral Analysis Surface Waves)[81].

В последнее время большее развитие при анализе поверхностных волн получает, предложенный в 1999 году, многоканальный подход MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – метод многоканального анализа поверхностных волн) – метод, основан на использовании в качестве полезных волн поверхностные волны, в основном, волны Рэлея[71].

Использование MASW стало возможным только в эпоху значительного скачка возможностей компьютерных технологий, ввиду необходимости расчета дисперсионных изображений. Способ также подразумевает вычисление дисперсионных кривых фазовых скоростей волн рэлеевского типа, что и метод SASW, но у метода есть одно большое преимущество, которое дает возможность идентифицировать различные моды волн, а также значительно ослаблять влияние помех. Способы MASW на данный момент реализованы в обрабатывающих программных комплексах, таких как RadexPro Professional, Zond ST, Seisimager/SW и пр.

### 1.5.2. Особенности распространения поверхностных волн рэлеевского типа

В настоящее время теория поверхностных волн рэлеевского типа основана на том, что поверхностные волны представляют собой неоднородные волны, которые распространяются вдоль свободной поверхности. Фазовая скорость поверхностных волн направлена параллельно поверхности. Частицы, вовлеченные в колебания поверхностных волн, совершают движение по эллипсу в плоскости, в которой лежит вектор скорости и вектор нормали к поверхности. Амплитуды колебаний затухают с глубиной по экспоненциальным законам, а энергия волны сосредоточена в области порядка длины волны от поверхности (рис. 1.14). Поверхностная волна несет информацию о скоростных характеристиках разреза соизмеримого с длиной волны.

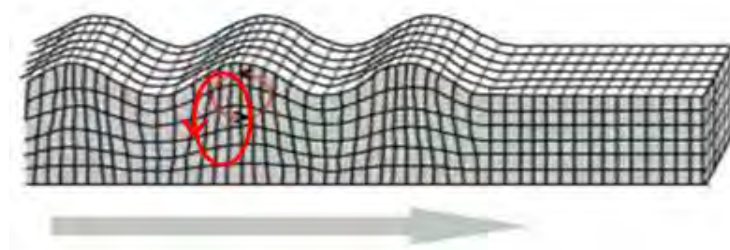


Рисунок 1.14 – Схема распространения Рэлеевской волны.

Понятие неоднородности поверхностных волн связано с затуханием волн с глубиной. При случае распространения однородной волны (рис. 1.5а)

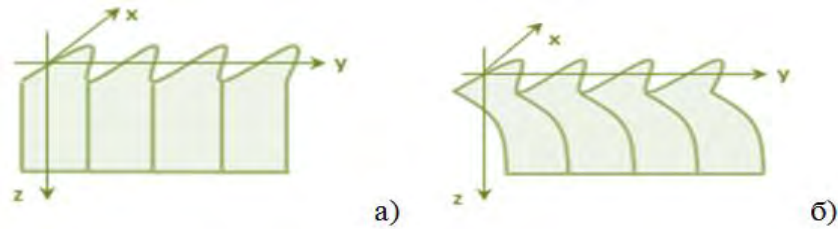


Рисунок 1.15 – а) Схема движения частиц однородной волны; б) Схема движения частиц неоднородной волны[82].

Волна распространяется вдоль оси  $Y$ , колебание частиц происходит вдоль оси  $X$  по гармоническому закону одинаково на всех глубинах. Волновой фронт - плоскость, амплитуда вдоль которой постоянна.

Распространяющаяся подобным же образом плоская неоднородная волна имеет плоский волновой фронт, однако амплитуда колебаний вдоль него меняется по экспоненциальному закону: затухает с увеличением  $Z$ -координаты. Глубина проникновения волны порядка  $\lambda$ , т.е. большие длины волн проникают на большие глубины (рис. 1.15б).

Как уже отмечалось выше, поверхностные волны представляют собой результат интерференции неоднородных волн. Процесс формирования поверхностных волн наглядно продемонстрирован на рисунке 1.16, который является примером условий формирования псевдорэлеевских волн. На схеме "упругое полупространство, перекрытое свободной поверхностью"[82] главным критерием возникновения поверхностной волны является падение  $SV$  волны на свободную поверхность под углами, которые превосходят критический угол.

$$i_{кр} = \arcsin V_s / V_p \quad (1.21)$$

где,  $V_s$ - скорость поперечной волны,  $V_p$ - скорость продольной волны.

Для случая «А» падение плоской  $SV$  волны под углами меньшими критического. Тогда на свободной поверхности возникает две отраженные волны: обменная  $P$ -волна и  $SV$ . Угол отражения волны  $SV$  –  $i$  меньше угла отражения волны

-  $j$  т.к. скорость волны  $P$  в среде больше. Стрелочками показано направление колебаний частиц.

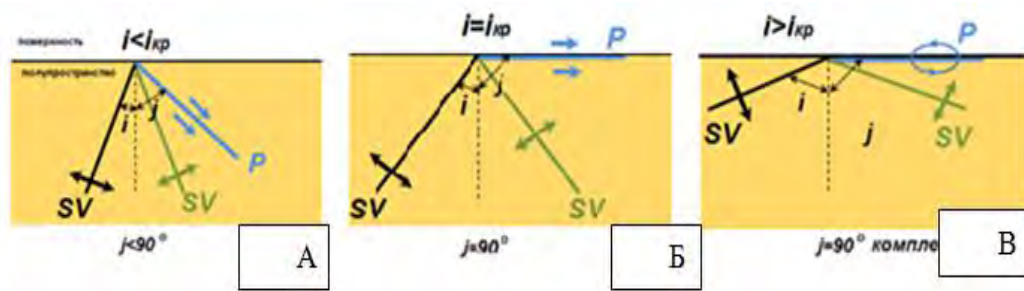


Рисунок 1.16 – Условие возникновения поверхностной волны Рэлея (Ашмарина Ю.Б. 2013г.).

Случай «Б», когда угол падения увеличивается до угла равного  $i$  критического, при этом естественно углы отражения также увеличиваются. При этом наступает момент, когда продольная волна отражается под углом  $j = 90^\circ$ , после чего начинает распространяться вдоль поверхности.

Случай «В», когда угол падения еще больше увеличивается до угла больше  $i$  критического. В этом случае продольная волна продолжает распространяться вдоль поверхности, а угол отражения становится комплексным, при этом продольная волна становится неоднородной, а отраженная волна  $SV$ - однородной.

В данном случае можно отметить, что при падении волны на свободную поверхность, расположенную на полупространстве под углами выше критических, образуется отраженная неоднородная (затухающая с глубиной) продольная волна, которая распространяется вдоль поверхности контакта двух сред и интерферирует с отраженной однородной и фазово-сдвинутой  $SV$  - волной. При этом интерференция двух этих волн и образует волну Рэлея[82].

Направление движения частиц в волне рэлеевского типа происходит в вертикальной плоскости по эллипсу (эллиптическая поляризация). Направление движения частиц на самой поверхности происходит против часовой стрелки, если направление распространения – направо (рис. 1.17).

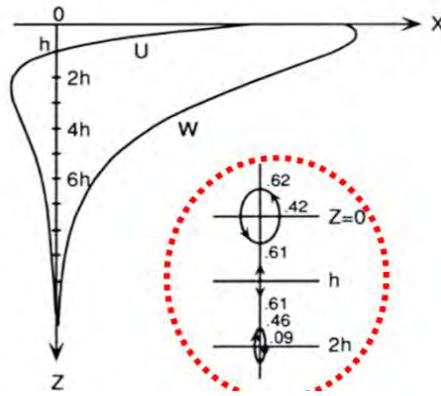


Рисунок 1.17 – Зависимость вертикальной ( $W$ ) и горизонтальной ( $U$ ) компонент волны Рэлея от глубины.

Как показано на рисунке 1.17, с глубиной поляризация и направление движения частиц меняется. Горизонтальная  $U$  и вертикальная  $W$  компоненты смещения затухают с глубиной. На поверхности  $Z=0$  преобладает вертикальная компонента  $W$ , поэтому вертикальная ось эллипса больше горизонтальной. На некоторой глубине  $h$  горизонтальная компонента становится равной 0, а поляризация становится линейной и вертикальной. Ниже глубины  $h$  вертикальная компонента становится отрицательной – частицы меняют направление колебаний против часовой стрелки. С глубиной размер эллипса уменьшается до 0, при этом волна затухает. Волны рэлеевского типа регистрируются на вертикальной ( $Z$  компоненте - вертикальные геофоны).

### 1.5.3. Дисперсия поверхностных волн в многослойном массиве

Основополагающим свойством поверхностных волн, в настоящей работе, является дисперсия – зависимость скорости распространения волны от частоты, обозначается  $V(f)$ .

Свойство дисперсии поверхностных волн обозначает зависимость, которую можно выразить в следующих соотношениях: для геологических разрезов с нормальным распределением скоростей - чем больше частота (меньше длина волны), тем скорость распространения волны меньше. Это происходит по той причине, что меньшие частоты (большие длины волн) проникают глубже, а значит

проходят в более высокоскоростных породах; в случае разрезов с инверсным распределением скоростей (например, при работах через высокоскоростную обделку тоннеля) все наоборот - чем больше частота (меньше длина волны), тем скорость распространения волны выше. Это происходит по причине влияния высокоскоростной обделки тоннеля.

Известно, что дисперсия отсутствует только в одном случае: если волна распространяется в однородном пространстве. При этом скорость для всех частот одинакова и приблизительно равна  $0,9V_s$ . Следовательно, первоначальный импульс от источника не расплывается по оси времени (рис. 1.18а).

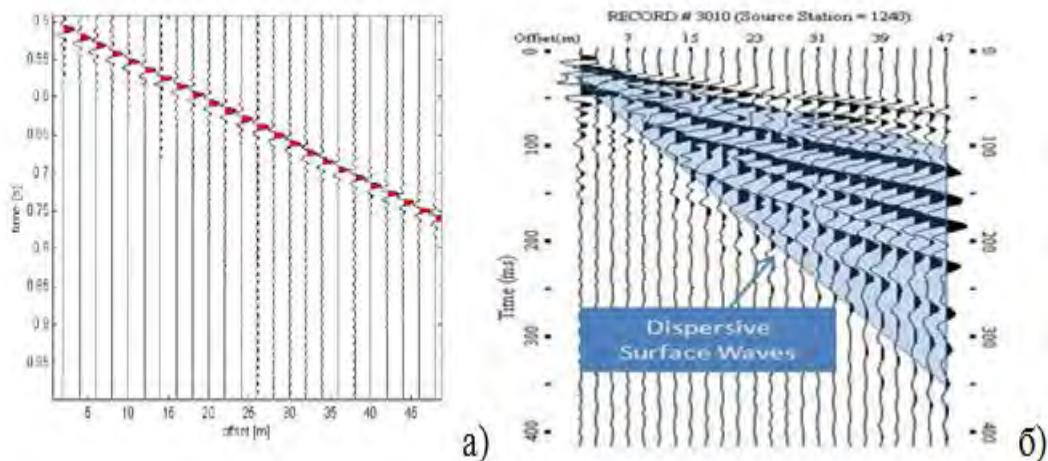


Рисунок 1.18 – а) Отсутствие дисперсии в однослойной среде; б) Дисперсия поверхностных волн в многослойной среде [86].

В слоистых же средах, а в реальных условиях, как правило, мы имеем дело со слоистыми средами, скорость волны рэлеевского типа зависит от длины волны или от частоты (рис. 1.18б).

На рисунке 1.18б можно увидеть, что первоначальный кратковременный импульс от источника, распространяясь в среде, как бы расплывается (рассеивается) - становится более длительным во времени и его форма меняется. Это происходит в связи с тем, что низкие частоты обгоняют более высокие, захватывают более высокоскоростную породу, это называется, что волна диспергирует. Так на представленной выше сейсмограмме область прихода поверхностных волн занимает целую область (обозначенную синим цветом).



## 1.6. Постановка задач исследований

Оценка напряженно-деформированного состояния массива вблизи горной выработки – приоритетная задача, связанная с прогнозом ее устойчивости. Ослабление горных пород, связанное с изменением поля напряжений в массиве, приводит к образованию вблизи выработки весьма неоднородной зоны неупругих деформаций. При оценке устойчивости и потенциальной надежности подземных сооружений, контактирующих с вмещающим массивом, необходимо производить комплексный контроль за различными составляющими: НДС (напряженно деформированное состояние) крепи горной выработки; изменениями физико-механических свойств вмещающего массива, геофизическими методами.

Проведенные предшественниками исследования позволили получить корреляционные зависимости между сейсмическими характеристиками и физико-механическими свойствами пород. Динамические параметры физико-механических свойств грунтов рассчитываются по данным скоростей продольных и поперечных волн. Регистрация продольных волн не вызывает трудностей, при этом регистрация поперечных волн зачастую затруднена или совсем неосуществима. При этом волны сдвига несут существенную информацию о структурных связях горных пород.

Основываясь на известном положении о том, что скорость поверхностной волны несет в себе, в большей степени, скоростные характеристики поперечной волны, было принято решение использовать поверхностные волны для оценки состояния массива.

Стоит отметить, что все последние исследования поверхностных волн, проведенные предшественниками, были направлены на изучение строения массива горных пород. Метод MASW разрабатывался, главным образом, для определения распределения значений скорости поперечной волны в разрезе[86]. В процессе многочисленных исследований замечено, что в имеющихся на рынке программах, процесс инверсии (построения) глубинных разрезов скоростей поперечных волн ( $V_s$ ) нестабилен. Это не сильно отражается на качестве изыскательских работ, когда рассматривается весь массив в целом, например, для расчета усредненных физико-

механических параметров грунтов. При этом 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 дисперсионные характеристики поверхностных волн. При этом, когда в массиве фиксируются значительные изменения дисперсионных характеристик, существует возможность пересчета в относительные единицы параметров, характеризующих реологические свойства.

На данный момент времени неизвестно об исследованиях в области оценки устойчивости массива методом дисперсионного анализа поверхностных волн, а соответственно нет информации о качественных и количественных взаимосвязях между изменениями параметров НДС характеризующих фактическое состояние массива и дисперсионных параметров поверхностных волн, характеризующих массив.

Выбранное автором направление исследований предусматривает оценку зависимостей изменения НДС крепи горных выработок, реального состояния вмещающего массива на различных этапах деформирования и изменения дисперсионных параметров поверхностных волн характеризующих вмещающий массив.

Работа предусматривает разработку метода, который позволяет идентифицировать количественное изменение физико-механических свойств вмещающих массив пород и локализовать участки, на которых эти изменения происходят. При этом регистрацию поверхностных волн можно осуществлять как на поверхности, так и внутри горной выработки. Оперативное выявление процессов деформирования на ранней стадии предложенным методом позволит заблаговременно выполнить дополнительный комплекс макшейдерских, геомеханических, геофизических обследовательских работ и своевременно предпринять обоснованные инженерные мероприятия.

Таким образом, основными задачами исследований данной работы являются:

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 зонах с неблагоприятными геологическими условиями.

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

Говоря другими словами, практика выступила заказчиком исследований для разработки метода 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 цели.

## **Глава II. Метод дисперсионного анализа поверхностных волн и способы интерпретации данных**

### **2.1. Анализ волнового поля, регистрируемого однокомпонентными вертикальными велосиметрами**

При проведении инженерно-геологических исследований, как правило, в целях экономии времени и средств используются однокомпонентные вертикальные сейсмоприемники, что позволяет достаточно оперативно производить измерения, но при этом часто возникают существенные сложности по идентификации волнового поля.

При работе через высокоскоростную обделку горной выработки регистрируемое волновое поле особенно сложное. Уверенно можно определить только первые вступления продольных волн по бетону, и то на небольшом удалении от источника возбуждений в связи с быстрым затуханием высокочастотного сигнала по бетону[83]. Для выделения последующих пакетов волн, присутствующих на записи, необходим серьезный анализ для идентификации природы волн (их тип и генезис, например: продольные по бетону, в случае работы в горной выработке с железобетонной обделкой, продольные волны по грунту, поперечные волны по бетону, поперечные волны по грунтам, поверхностные волны. Для снижения доли сомнений и неоднозначности в определении природы регистрируемых волн, как правило, производятся дополнительные эксперименты с применением трехкомпонентных сейсмоприемников и дальнейшей идентификацией полученной информации.

В рамках работы был проведен специальный эксперимент в условиях горной выработки. Участком для исследований стал участок перегонного тоннеля Петербургского метрополитена. В рамках эксперимента проводилась регистрация традиционно возбуждаемых сейсмоакустических волн однокомпонентными велосиметрами и с последующей частичной (выборочный П.П. - пункт приема) их заменой трехкомпонентными сейсмоприемниками. Линия регистрации

располагалась с четко закрепленными точками приема с шагом между сейсмоприемниками 2 метра. Возбуждения осуществлялись по методике типичного МПВ посредством серии ударов кувалды для накопления сигнала.

Оценка природы волн осуществлялась путем анализа волновой картины, которой являлась все регистрируемое волновое поле, зарегистрированное как однокомпонентными сейсмоприемниками, так и трехкомпонентными сейсмоприемниками.

При эксперименте №1 два трехкомпонентных сейсмоприемника марки Houston, TX, USA (рис. 2.1а) устанавливались на места установки однокомпонентных сейсмоприемников марки Geospase DX-20 (рис. 2.1б) в пунктах 6 и 7. Проанализировав регистрируемое трехкомпонентными сейсмоприемниками волновое поле, была оценена природа волн (рис. 2.2).



Рисунок 2.1. – Сейсмоприемники Houston, TX, USA (слева) и Geospase DX-20 (справа).

Далее оценивались характеристики выделенных волн: их скорость и частота. После чего была проведена работа по идентификации выделенных волн на сейсмограмме однокомпонентных вертикальных велосиметров [84] (рис. 2.3).



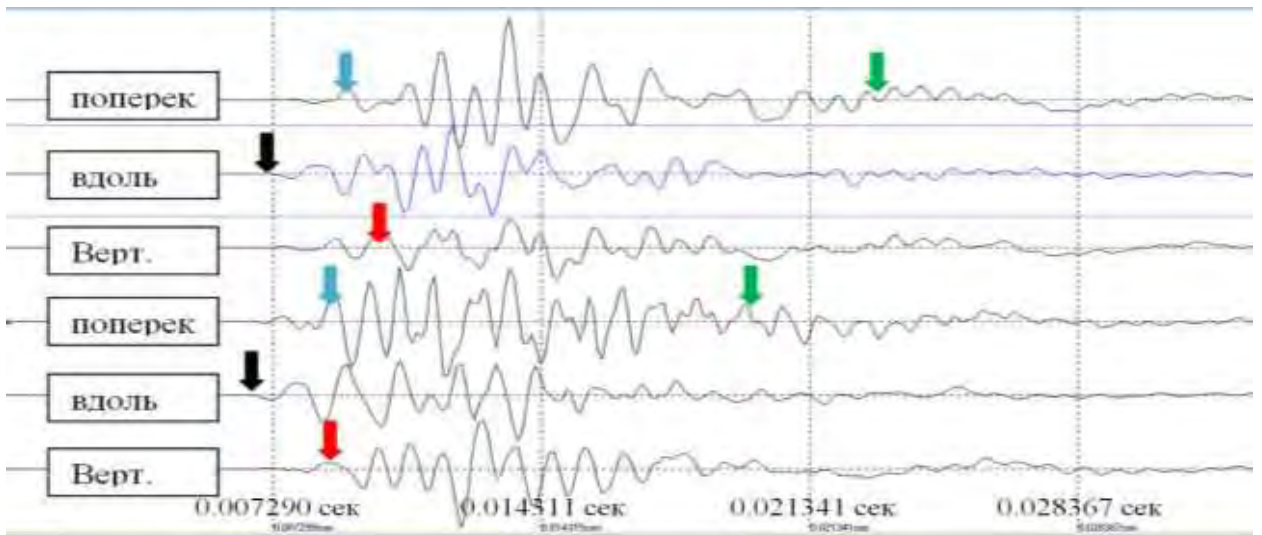


Рисунок 2.2 - Определение природы волновых пакетов с помощью сейсмограмм, полученных трехкомпонентными сейсмоприемниками на участке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена (установка 3-х комп. с.п. на 6-7 пункте приемной расстановки).

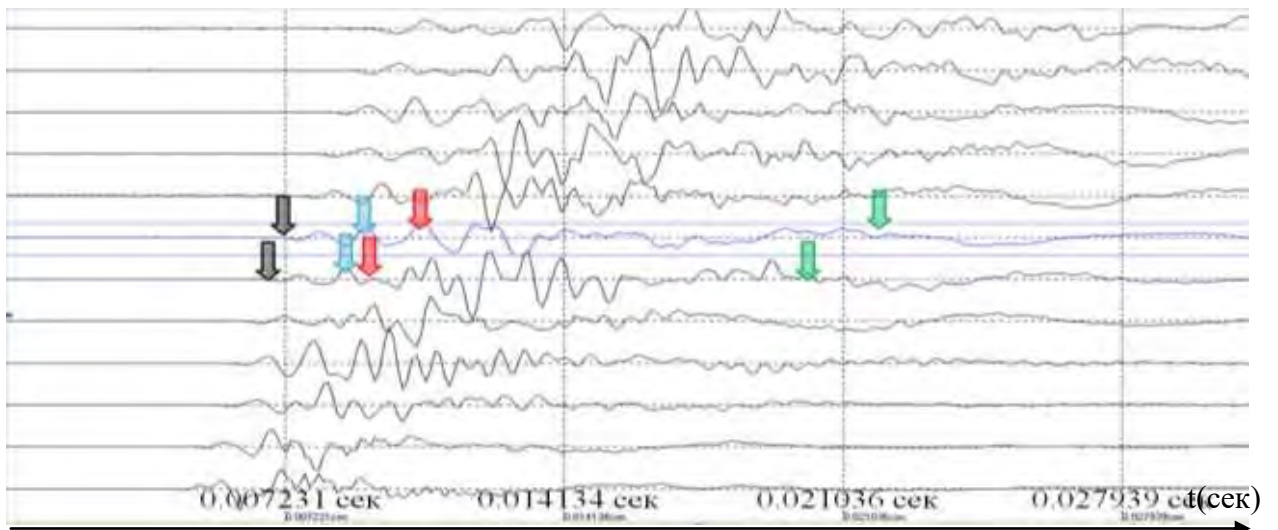


Рисунок 2.3 - Определение природы волновых пакетов на сейсмограммах, полученных однокомпонентными вертикальными велосиметрами на участке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена (шаг между каналами 2м).

Для увязки получаемых данных была проведена аналогичная регистрация волн на встречном направлении от противоположного источника возбуждений (рис. 2.4-2.5).

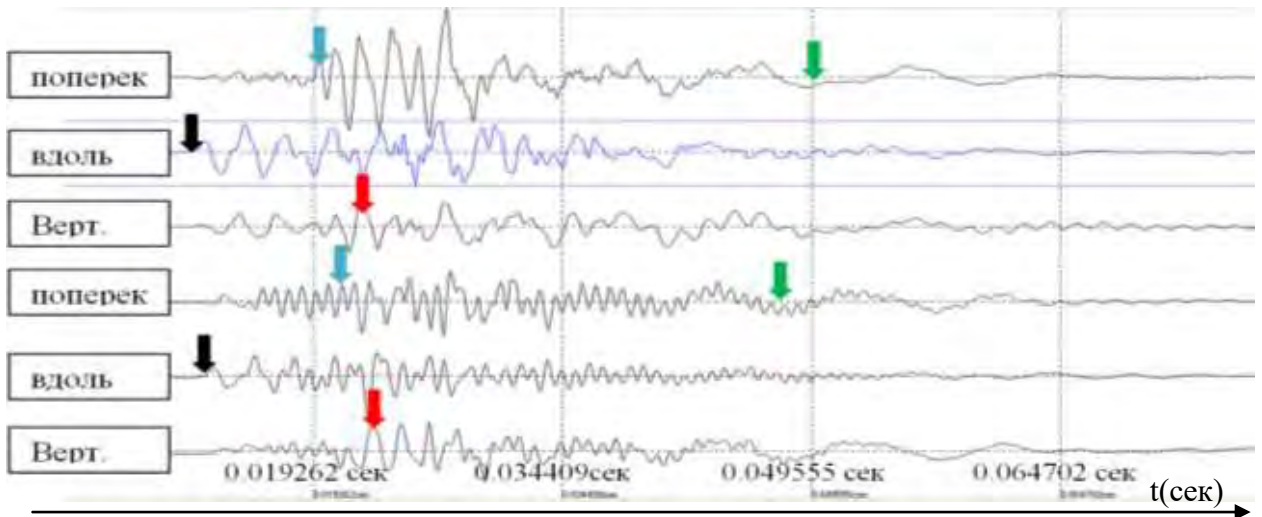


Рисунок 2.4 - Определение природы волновых пакетов с помощью сейсмограмм, полученных трехкомпонентными сейсмоприемниками на участке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена (установка 3-х комп. с.п. на 6-7 пункте приемной расстановки).

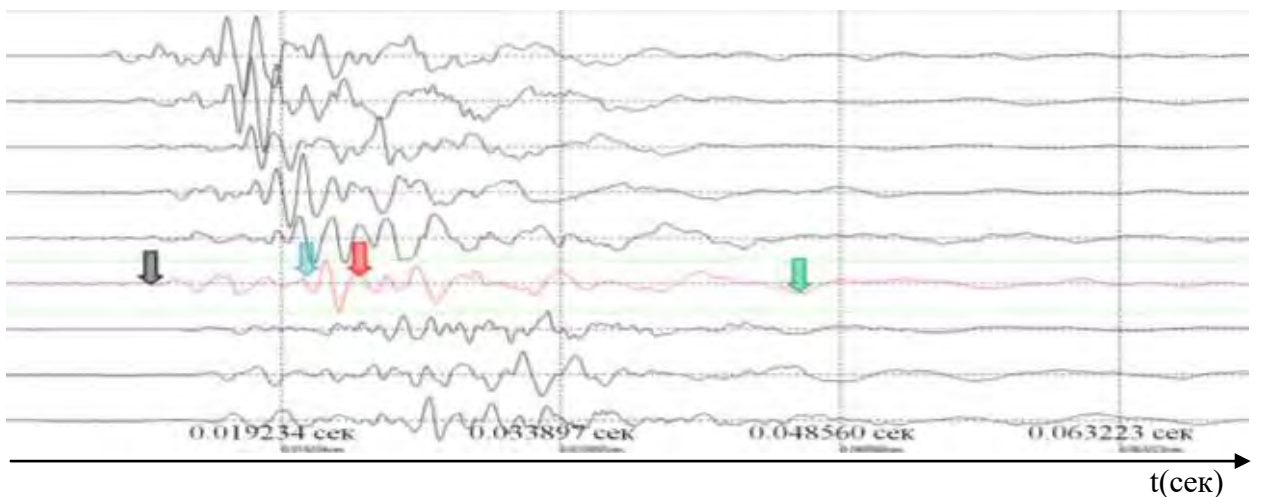


Рисунок 2.5 - Определение природы волновых пакетов на сейсмограммах, полученных однокомпонентными вертикальными велосиметрами на участке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена (шаг между каналами 2м).

Для выделения полезных волн различной природы были применены частотные фильтры с различными характеристиками. На открытом канале сигнал имел достаточно широкий спектр (рис. 2.6).

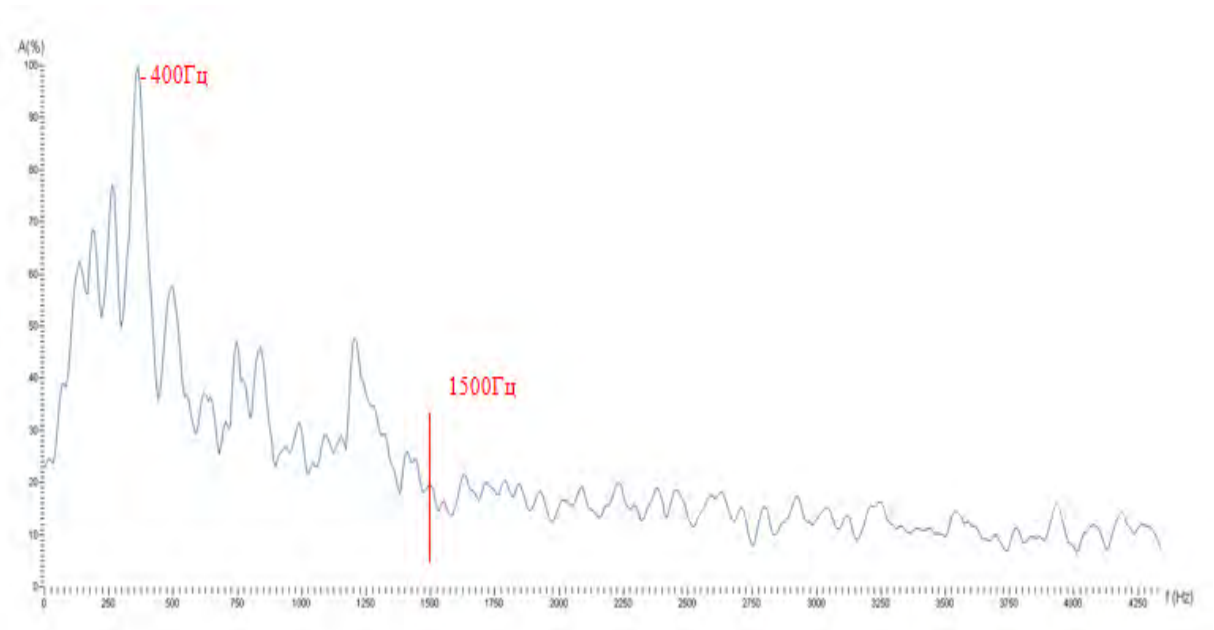


Рисунок 2.6 – Частотный спектр регистрируемого волнового поля на участке перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена (шаг между каналами 2м).

При помощи процедуры фильтрации были выделены: продольные волны по бетонной обделке (с активным высокочастотным фильтром) и продольные волны по вмещающим грунтам, слагающим заобделочное пространство горной выработки. Поперечные волны по бетонной обделке стали более отчетливыми после применения низкочастотного фильтра. Также с помощью низкочастотной фильтрации были выделены поверхностные волны рэлеевского типа, характеризующие массив, в который входят как слой высокоскоростной обделки тоннеля, так и слои вмещающих тоннель грунтов.

В результате эксперимента удалось идентифицировать природу регистрируемых однокомпонентными велосиметрами волн и доказать возможность регистрации поверхностных волн рэлеевского типа вертикальными сейсмоприемниками (рис. 2.7).



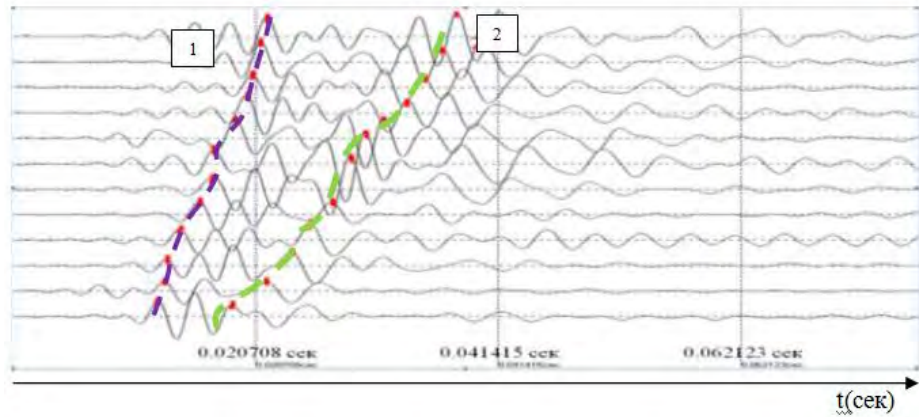


Рисунок 2.7 – Сейсмограмма после процедуры фильтрации (низкочастотный фильтр 0-500Гц). 1- фаза продольных волн по вмещающим грунтам; 2- фаза поверхностных волн рэлеевского типа. участок перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена. (шаг между каналами 2м).

Как можно отметить, определение природы волн при работе однокомпонентными вертикальными сейсмоприемниками всегда было достаточно трудоемкой и не имеющей однозначного решения задачей, требующей обязательной заверки регистрируемого сигнала трехкомпонентными сейсмоприемниками.

## 2.2. Анализ волнового поля с помощью дисперсионного изображения

С появлением программных продуктов с модулями MASW, способными рассчитывать полное дисперсионное изображение зарегистрированного волнового пакета, проблема выделения волн поверхностного типа существенно упростилась.

Как ранее упоминалось, скорости волн в идеально упругой однородной среде не зависят от частоты колебаний  $f$ . Однако в породах, не обладающих идеальной упругостью и являющихся неоднородными по упругим свойствам, наблюдается очень слабая зависимость  $V_s$  и  $V_p$  от  $f$  (частоты), которая не превышает первых процентов[85]. При этом поверхностные волны в многослойной среде обладают яркой дисперсией, которую всегда достаточно легко можно выделить на дисперсионном изображении.

В виде примера можно привести дисперсионное изображение, опубликованное на сайте «masw.com»[86]. На изображении представлены

результаты анализа природы волн на сейсмограмме и их отображение на рассчитанном дисперсионном изображении (рис. 2.8).

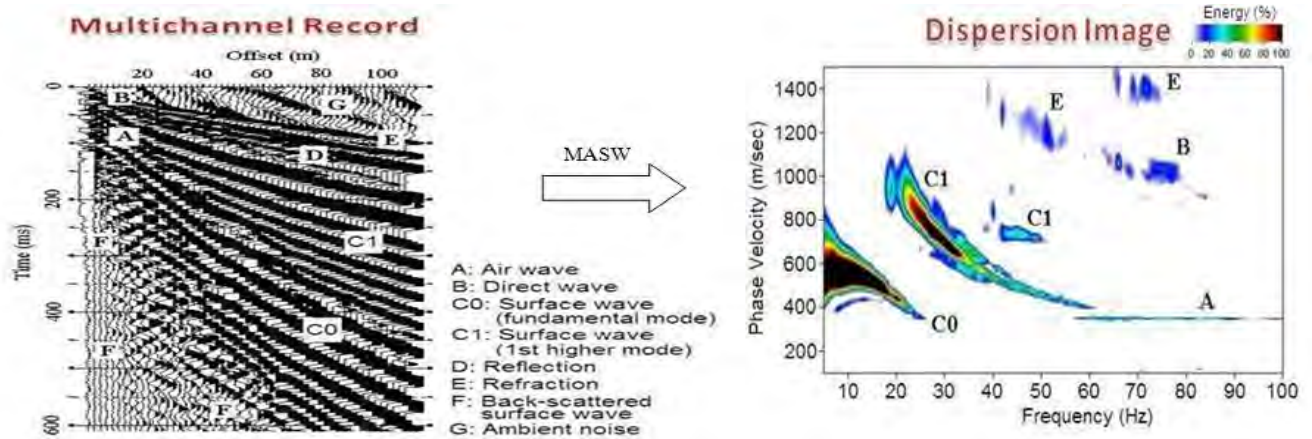


Рисунок 2.8 – Дисперсионное изображение всего зарегистрированного волнового пакета с идентифицированными волнами, присутствующими на сейсмограмме.

На дисперсионных изображениях, которые были получены автором на реальных объектах, также достаточно ярко выражена дисперсионная кривая, относящаяся к поверхностным волнам. Например, на дисперсионном изображении, рассчитанном для участка строящегося перегонного тоннеля Петербургского метрополитена, можно выделить как поверхностные волны, так и продольные волны в обделке тоннеля (рис. 2.9-2.10).

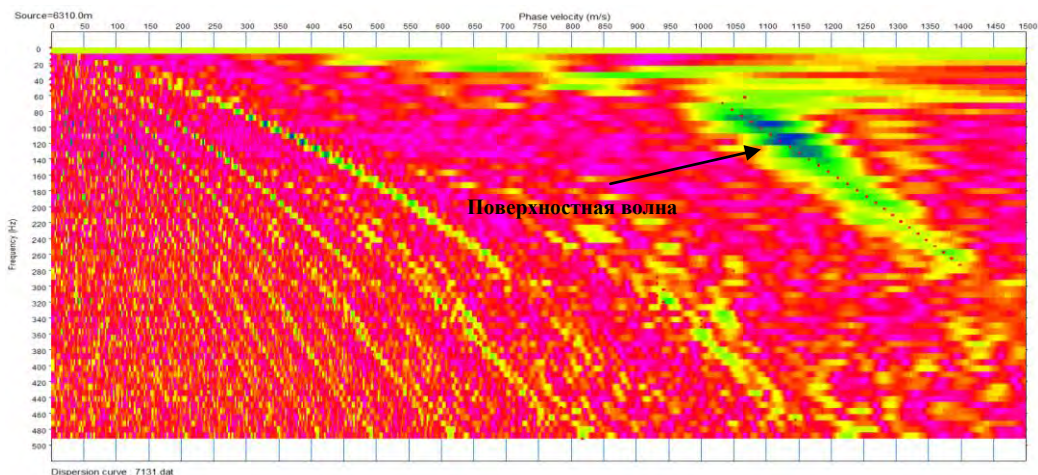


Рисунок 2.9 – Дисперсионное изображение зарегистрированного волнового пакета, полученное на участке строительства перегонного двухпутного тоннеля от ст. «Беговая» до ст. «Новокрестовская» Петербургского метро (программа обработки Pickwin. США).

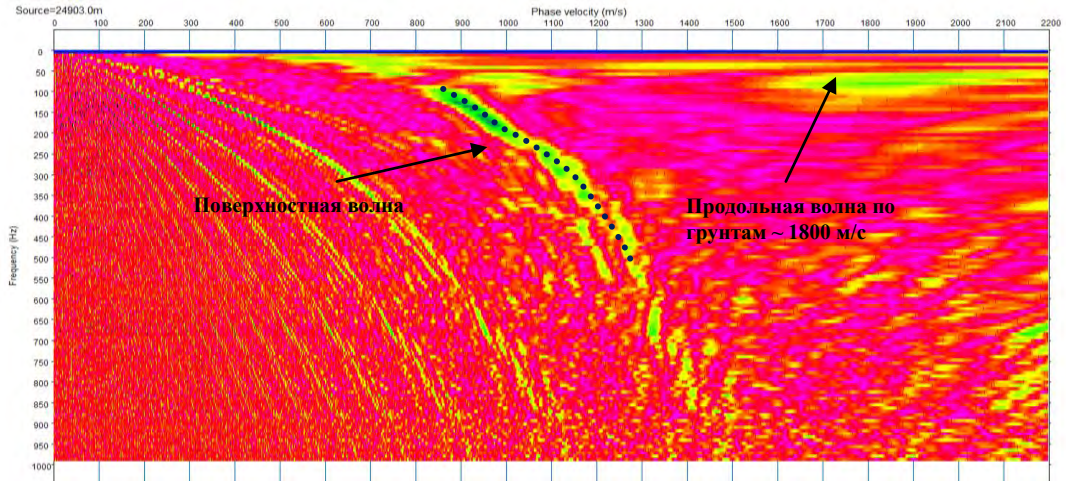


Рисунок 2.10 – Дисперсионное изображение зарегистрированного волнового пакета, полученное на участке строительства перегонного двухпутного тоннеля от ст. «Беговая» до ст. «Новокрестовская» Петербургского метро (программа обработки Pickwin.США).

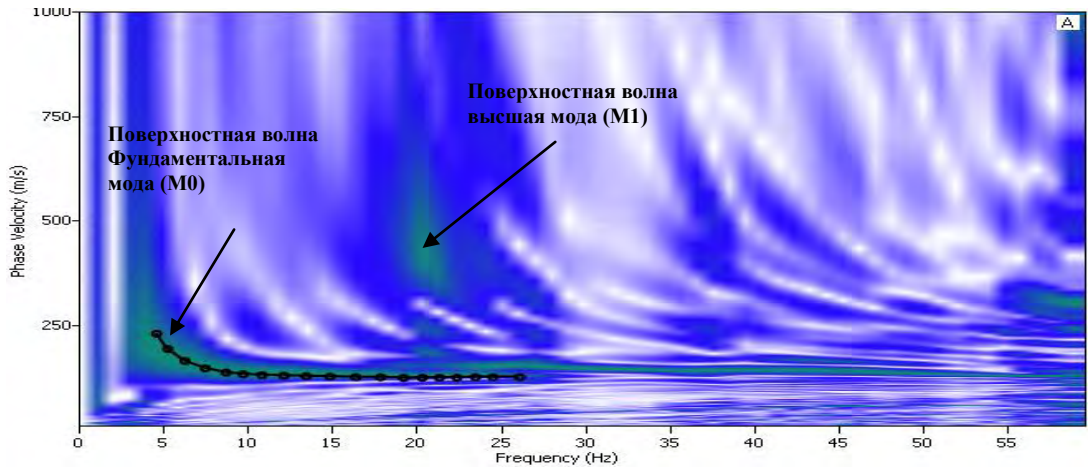


Рисунок 2.11 – Дисперсионное изображение зарегистрированного волнового пакета, полученное на дневной поверхности вблизи участка строительства демонтажной камеры Петербургского метро (программа обработки RadexPro. Россия).

Процедура идентификации природы волн состоит из аналитического определения граничных условий для тех или иных волн, присутствующих на сейсмограмме и отображенных на рассчитанном дисперсионном изображении. Так на дисперсионных изображениях (рис. 2.9-2.11) помимо поверхностной волны можно выделить продольную волну по вмещающим породам. При этом спутать ее, например, с продольной волной по бетону тяжело по двум факторам: сравнительно низкий частотный диапазон волн; низкие скоростные характеристики (рис.2.12).



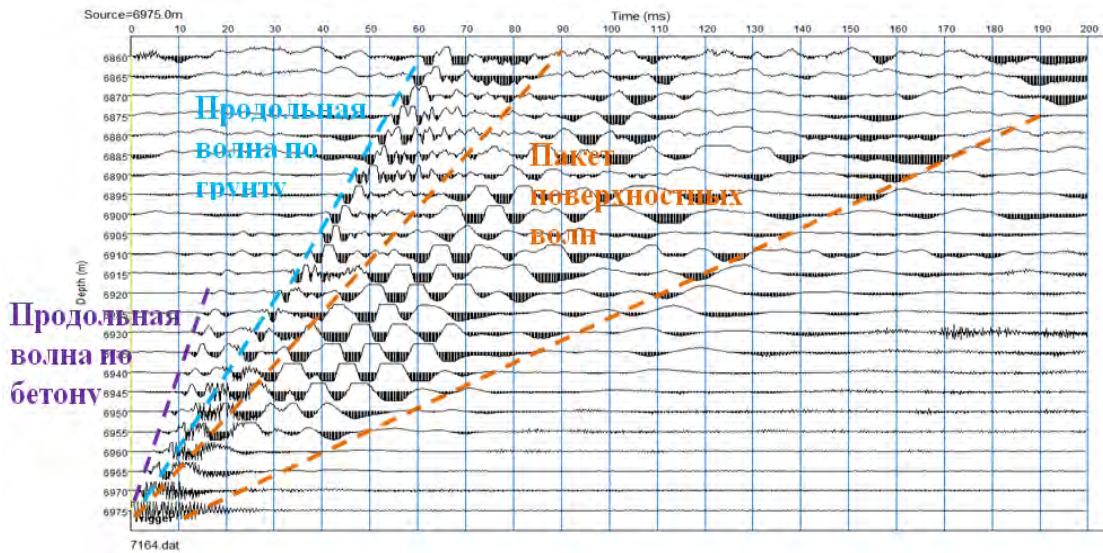


Рисунок 2.12 – Сейсмограмма, зарегистрированная на участке строительства строительства перегонного двухпутного тоннеля от ст. «Беговая» до ст. «Новокрестовская» Петербургского метро (программа обработки Pickwin. США).

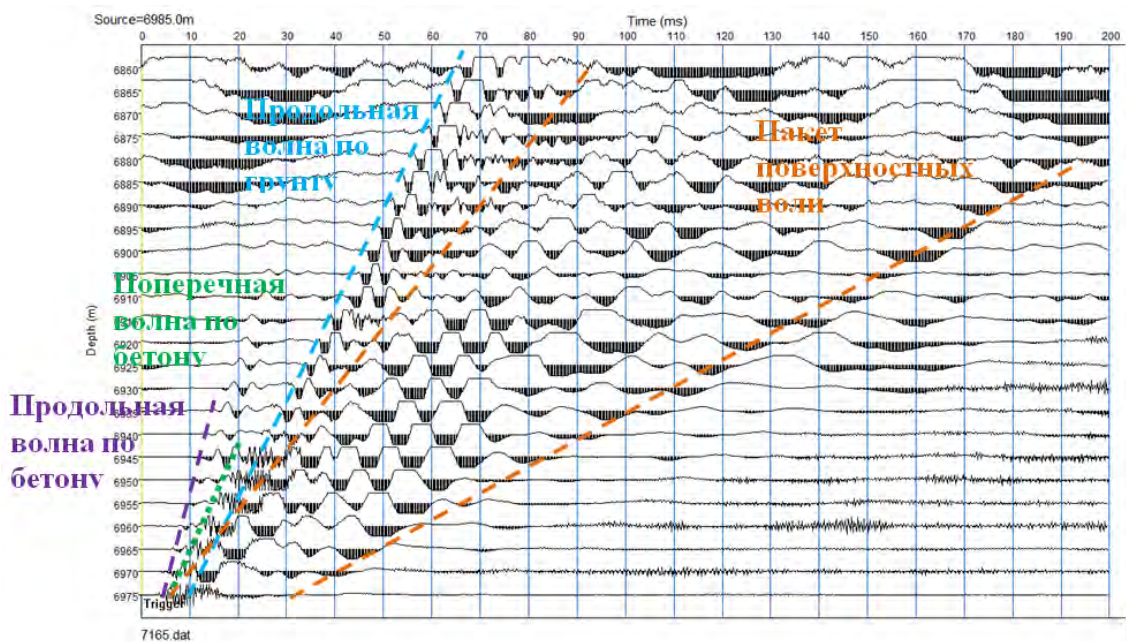


Рисунок 2.13 – Сейсмограмма, зарегистрированная на участке строительства строительства перегонного двухпутного тоннеля от ст. «Беговая» до ст. «Новокрестовская» Петербургского метро (программа обработки Pickwin. США).

С волной поперечного типа спутать ее также невозможно (рис. 2.13): скорости поперечной волны в бетоне значительно выше  $\sim 2400$  м/с., а скорость поперечной волны в грунте ниже.

Таким образом, анализ дисперсионного изображения по идентификации поверхностных волн основан на аналитическом подходе с использованием априорных данных о скоростном разрезе (граничных условиях), а также проектных данных обделки тоннеля, которые включают сведения о скоростях продольного и поперечного типа в бетоне. Результаты многочисленных экспериментов показали, что на дисперсионных изображениях достаточно эффективно выделяются поверхностные волны. В первую очередь это связано со свойством дисперсии, которым обладают поверхностные волны в многослойной среде, при этом волны другой природы, как уже было отмечено, обладают свойством дисперсии совсем ничтожным.

### 2.3. Регистрация поверхностных волн

Традиционно регистрация поверхностных волн осуществляется методом профилирования сейсмической 12 канальной (и более) расстановкой с фланговой системой возбуждения колебаний (рис. 2.14).

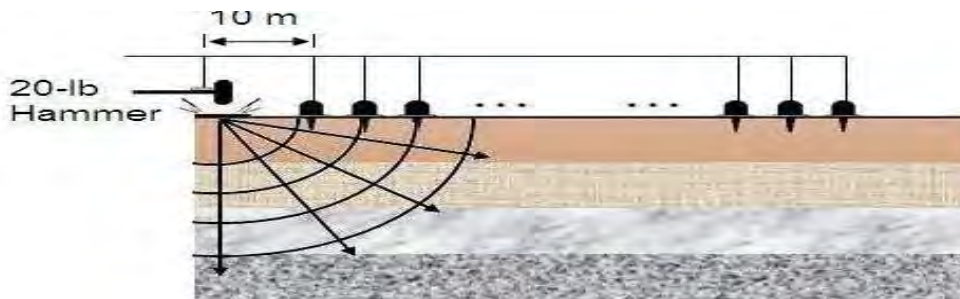


Рисунок 2.14 – Схема сейсмического профилирования методикой MASW (masw.com).

Вся система, состоящая из точки возбуждения и линии приема, перемещается на постоянный шаг, размеры которого выбираются из необходимой разрешающей способности (рис. 2.15). Длина приемной линии ( $D$ ) определяется исходя из глубинности исследований и связана с максимальной длиной волны  $\lambda(\max)$ :  $D \sim \lambda(\max)$ , при этом максимальная глубина, для которой можно восстановить скорость поперечной волны является половиной от максимальной длины волны. Расстояние между сейсмоприемниками ( $dx$ ) выбирается исходя из требуемой минимальной

длиной волны  $\lambda(\text{min})$ :  $Z_{\text{min}} \sim \lambda(\text{min})$ . На практике глубинность исследования определяется как частотными характеристиками сейсмоприемников, так и характеристиками источника. Как правило, вполне уверенно исследуются первые десятки метров. Расстояние между сейсмическими приемниками обычно варьируется от 1 до 5 метров. Положение точки возбуждения (удара), как правило, изменяется в пределах 1-4 ( $dx$ -шаг между сейсмоприемниками)[87].

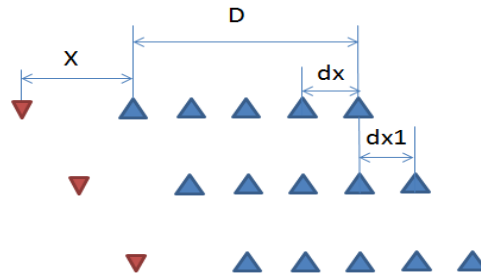


Рисунок 2.15 - Система наблюдений методом MASW (winmasw.com).

Для регистрации сигнала, в качестве приёмников, рекомендуется использовать низкочастотные (4.5Гц) вертикальные приёмники. Использование низкочастотных приёмников позволяет добиться регистрации волн с большей длиной волны, что соответственно увеличивает глубинность исследований. Использование более высокочастотных приёмников также допустимо (рис. 2.16).

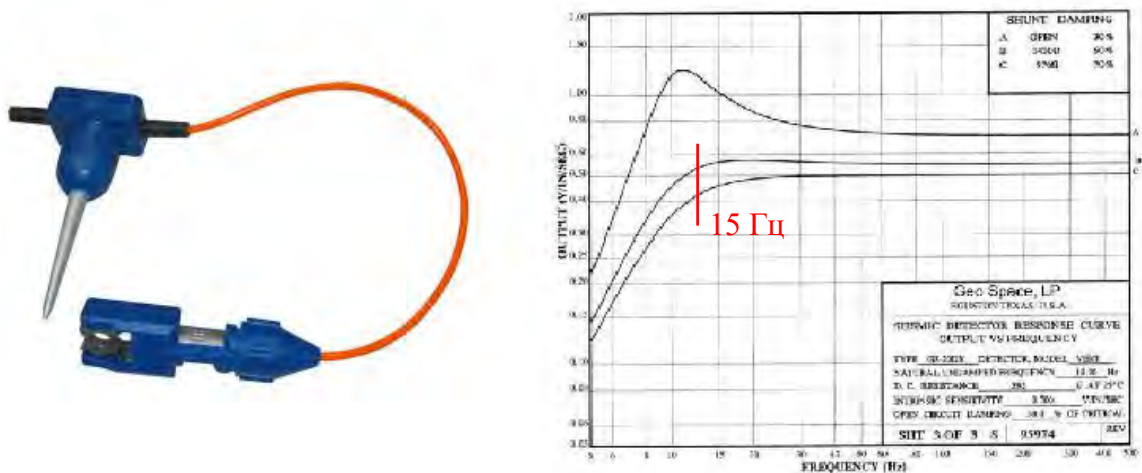


Рисунок 2.16 – Вертикальный сейсмоприемник GS-20Dx для регистрации поверхностных волн (частотная характеристика сейсмоприемника).

Частотная характеристика вертикальных сейсмоприемников марки GS-20DX позволяет регистрировать без частотных искажений сейсмические сигналы от 15 Гц



и выше (в случае шунтированного велосиметра). От данного частотного порога зависит глубинность исследований, при этом стоит отметить, что для решения задач, поставленных в рамках данной диссертационной работы, сейсмоприемники GS-20DX были пригодны для использования.

Практика работ показала, что для дисперсионного анализа подходит и альтернативная схема регистрации, которая основана на проведении работ в виде традиционной пяти-семи точечной системой наблюдений, используемой при стандартном МПВ профилировании. Это позволяет оперативно производить сейсмические исследования с классическим построением увязанных встречных и нагоняющих годографов, характеризующих скорости продольных волн, а также производить дисперсионный анализ поверхностных волн для различных точек положения источника[88].

## 2.4. Алгоритмы расчета фазовых дисперсионных кривых поверхностных волн

Как уже упоминалось, регистрируемое волновое поле включает целый набор волн различной природы (рис. 2.17). Как правило, на сейсмограммах достаточно уверенно прослеживаются первые вступления, относящиеся к продольным волнам и целый волновой пакет (цуг) поверхностных волн, которые в разной степени диспергируют в зависимости от свойств массива, в котором они образовались.

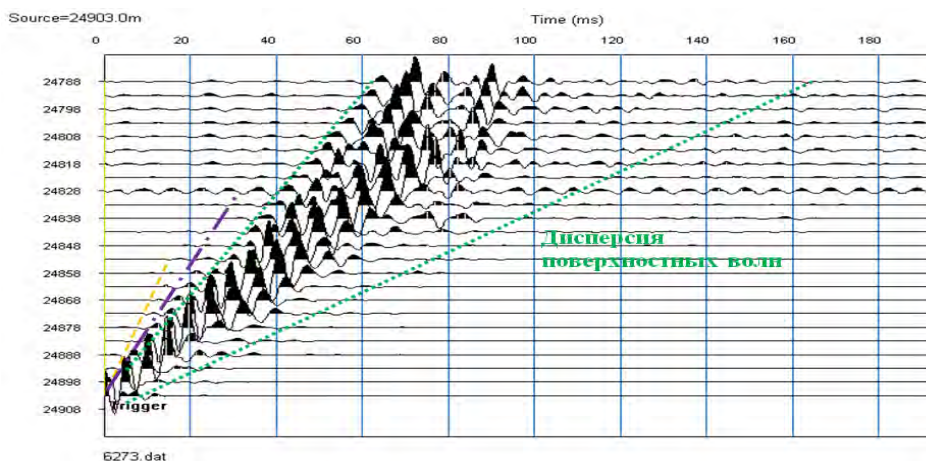


Рисунок 2.17 – Сейсмограмма, зарегистрированная в строящемся тоннеле линии Ф2 Петербургского метрополитена.

Регистрируемую на поверхности поверхностную волну можно разложить на серию плоских волн (плоская волна самый простой тип волны), т.е. представить поверхностную волну как сумму плоских волн с разными частотами и соответствующими им фазовыми скоростями.

$$A(x,t) = \sum_i A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot (t - \frac{x}{c(\omega_i)})) \quad (2.1)$$

Представленное выражением (2.1) сложное колебание называется волновым пакетом. Волновой пакет имеет две характеристики: фазовую и групповую скорости. Фазовая скорость – это скорость распространения отдельно взятой фазы. Групповая скорость - это скорость распространения энергии волнового пакета (цуга волн) или скорость перемещения максимума амплитудной огибающей. На рисунке 2.18 показано распространение волнового пакета при разных соотношениях между фазовой и групповой скоростями. Фазовая скорость поверхностных волн в реальных сейсмических средах всегда больше групповой [89].

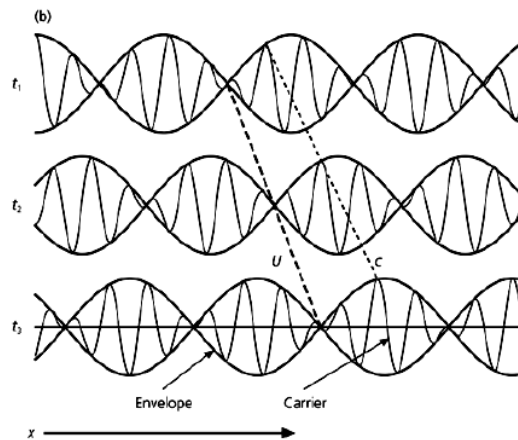


Рисунок 2.18 – Распространение волнового пакета. Фазовые и групповые скорости.

Если рассматривать поверхностную волну как квазимонохроматический волновой пакет, состоящий всего из двух колебаний с близкими частотами, то сейсмограмма будет выглядеть, как представлено на рисунке 2.19. Тут можно отметить, что наклон осей синфазности значительно больше, чем наклон линии, соединяющей максимумы волновых пакетов, именно поэтому фазовая скорость больше групповой [82].



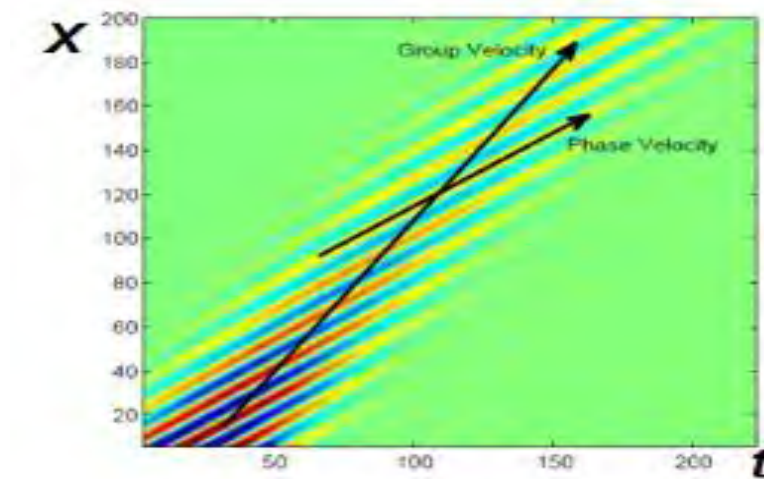


Рисунок 2.19 –Квазимонохроматический волновой пакет[82].

В реальных условиях характеристики поверхностной волны намного сложнее. Волновые пакеты состоят из нескольких мод. По зарегистрированной сейсмограмме измеряются фазовые скорости по наклонам осей синфазности поверхностных волн каждой моды, т.е. определяются их кажущиеся и групповые скорости. На рисунке 2.20 в качестве примера представлена сейсмограмма с одной модой поверхностной волны, где оси синфазности обозначены синим цветом, а красной линией обозначена линия, соединяющая максимумы волновых пакетов.

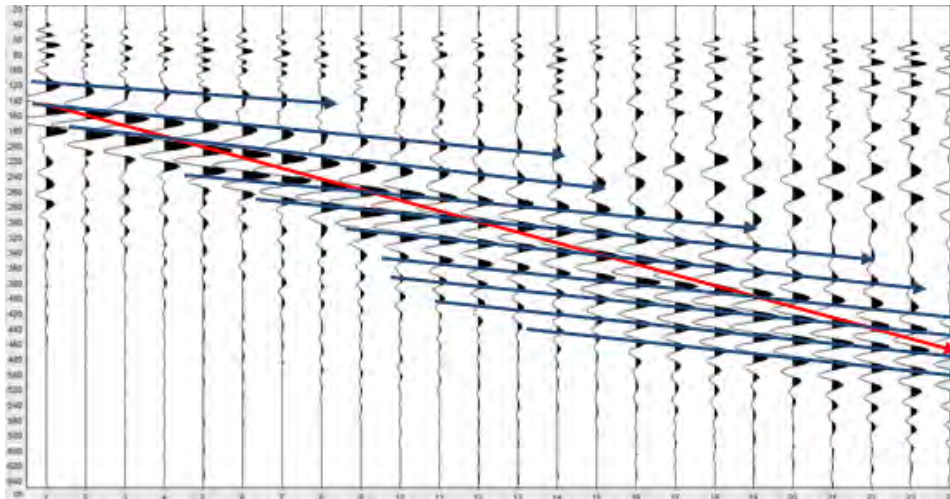


Рисунок 2.20 – Сейсмограмма с обозначенными осями синфазности и максимумами волновых пакетов.

Алгоритм расчета фазовых дисперсионных кривых базируется на использовании оконного преобразования Фурье, которое определяется следующим образом [90,91]:

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)W(\tau - t)e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (2.2),$$

где  $W(\tau-t)$  – некоторая оконная функция. В случае дискретного преобразования оконная функция используется аналогично:

$$F(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n]w[n - m]e^{-j\omega n} \quad (2.3)$$

В большинстве задач цифровой обработки нет возможности исследовать сигнал на бесконечном интервале. Нет возможности узнать, какой был сигнал до включения устройства и какой он будет в будущем. Также ограничение интервала исследования может быть обусловлено нестационарностью исследуемого сигнала.

Ограничение интервала анализа равносильно произведению исходного сигнала на оконную функцию. Таким образом, результатом оконного преобразования Фурье является не спектр исходного сигнала, а спектр произведения сигнала и оконной функции. Спектр, полученный при помощи оконного преобразования Фурье, является оценкой спектра исходного сигнала и принципиально допускает искажения[91].

Для улучшения визуализации частотного спектра на разрыве границ окна существует множество математических формул. Для этого применяются преобразования: прямоугольное, треугольное, сужающийся косинус, фрагмент синусоиды, синус в кубе, синус в 4-й степени, преобразование Парзена, Велша, Гаусса, Хеннинга, Хэмминга, Чебышёва, с пульсациями, Розенфилда, Блэкмана-Харриса, горизонтальное и с плоской вершиной[92].

В программах построения дисперсионной кривой алгоритм расчета реализован следующим образом: сначала задается диапазон исследуемых скоростей  $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$ , а также шаг  $\Delta V$  для каждой сейсмотрассы; далее, зная координаты источника и приемника, выделяется скоростное окно заданной ширины с центром, соответствующим текущему значению  $V=n\Delta V$ ; затем в этом скоростном окне производится расчет спектра. Спектры всех сейсмических трасс суммируются. Получаемый суммарный спектр для заданного значения  $V=n\Delta V$ . Таким образом,

рассчитываются спектры для всех значений  $n$  в заданном диапазоне скоростей от  $V_{\min}$ , до  $V_{\max}$  (рис. 2.21).

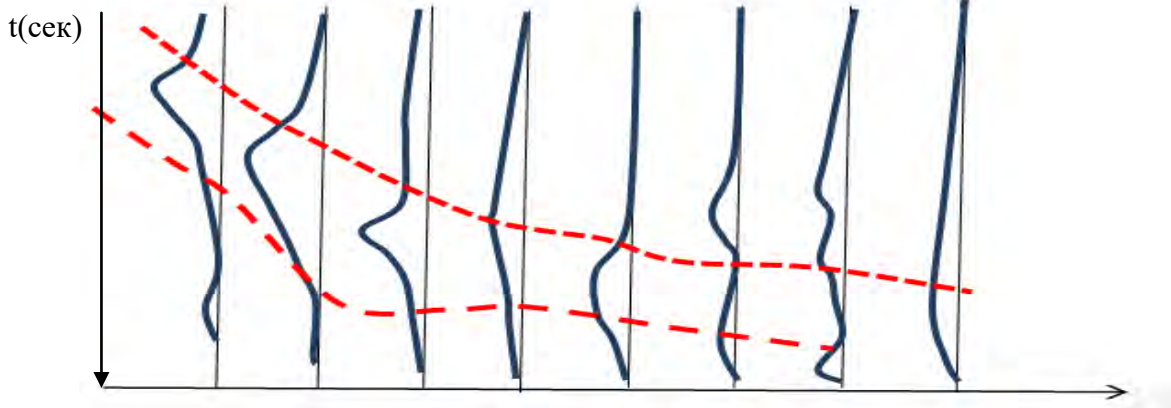


Рисунок 2.21 – Способ отображения наборов спектров.

Самый простой способ отображения таких наборов спектров – полосой для каждого значения скорости. Участки полосы передают различным цветом в зависимости от интенсивности. Достаточно важный момент заключается в выборе оконной функции. Например, в программе расчета дисперсионной кривой, разработанной Глуховым А.А., реализована возможность выбора окон по списку (рис. 2.22, 2.23).

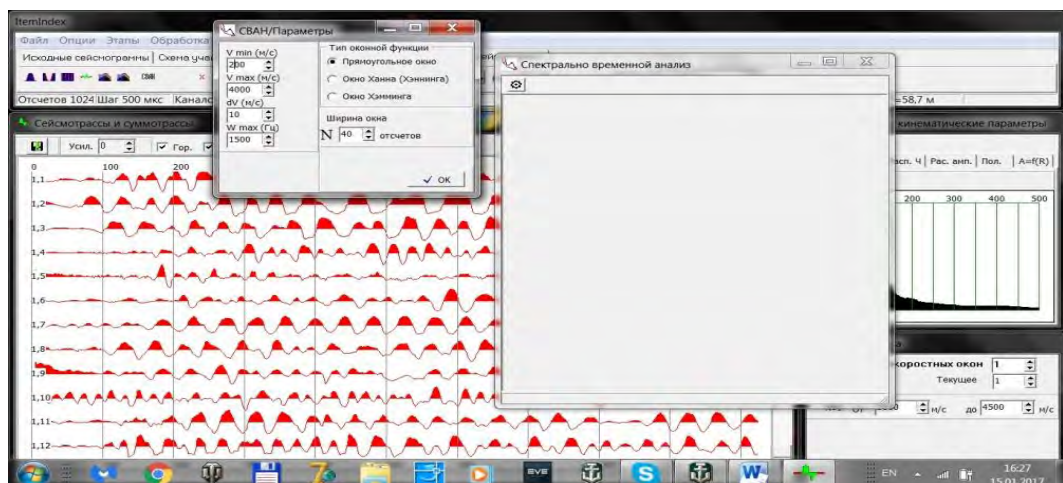


Рисунок 2.22 - Окно программы дисперсионного анализа. Выбор параметров расчета. (Глухов А.А.)

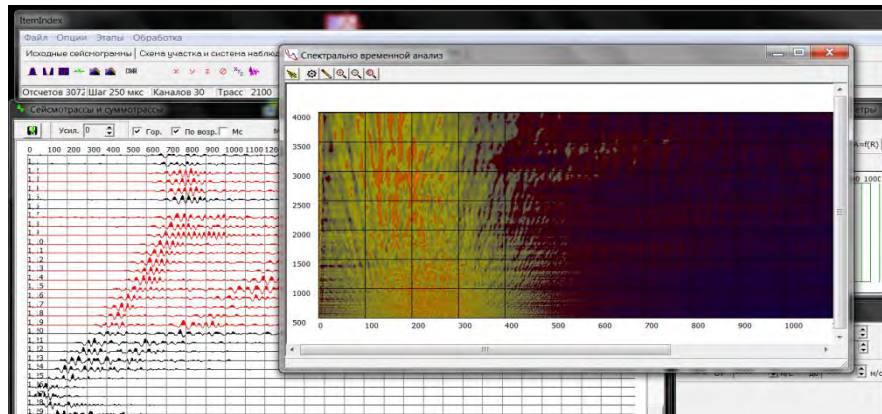


Рисунок 2.23 - Окно спектрально временного анализа. (Глухов А.А.)

Алгоритм построения дисперсионной кривой в инструменте MASW осуществляется посредством решения дисперсионного уравнения (2.4).

$$V(f) = F(V_s, V_p, \rho, h) \quad (2.4),$$

где  $V_s$  - Скорость поперечной волны;  $V_p$  - скорость продольной волны;  $\rho$  - плотность;  $h$  - мощность слоя.

Решением этого уравнения является многозначная функция частоты. То есть при решении уравнения получается не одна кривая  $V(f)$ , а их множество, расположенных как показано на рисунке 2.24. Эти кривые называются модами.

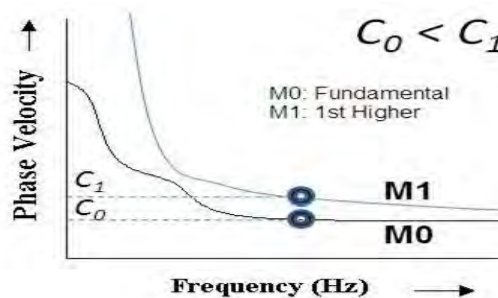


Рисунок 2.24 – Фундаментальная и первая мода (masw.com).

Мода - это каждая независимая ветвь функции  $V(f)$ . Фундаментальная мода распространяется с наименьшей скоростью. Она находится ниже всех остальных мод и обозначается  $M_0$ . Следующая за ней мода называется первой ( $M_1$ ), за ней могут следовать вторая и последующие. На практике, как правило, видно одну фундаментальную или две: фундаментальную и первую моду. Стоит отметить, что мода это – функция, как правило, убывающая с частотой (если скорость возрастает с

глубиной), но функция может и возрасть, если разрез инверсный (например, при работе через железобетонную обделку горной выработки). Низкочастотная часть фундаментальной моды несет информацию о глубинных частях разреза, высокочастотная область несет информацию о верхних частях разреза.

Построение дисперсионной кривой в методе MASW осуществляется по принципу наклонного суммирования. Так как запись многоканальная, то строить дисперсионную кривую для каждой трассы неразумно. Поэтому строится дисперсионное изображение, которое является спектром фазовых скоростей. Механизм построения осуществляется следующим образом: зарегистрированная сейсмограмма (рис.2.25а), на которой присутствуют поверхностные волны, пропускается через систему узкополосных селективных фильтров. Например, на рисунке 2.25б представлена сейсмограмма, пропущенная через селективный узкополосный фильтр 20Гц, в итоге, на сейсмограмме остается только одна частота - 20Гц частотный срез все остальные вырезаны.

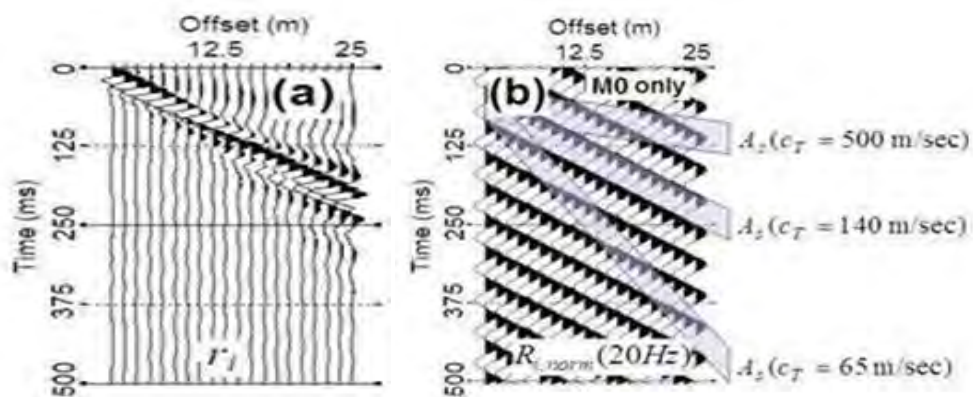


Рисунок 2.25 – а) Зарегистрированная сейсмограмма с поверхностными волнами; б) частотный срез, выполненный по частоте 20Гц (masw.com).

Далее производится процедура наклонного суммирования, при котором суммируются трассы вдоль всевозможных наклонов (вычисленных для каждого частотного среза), при этом разным наклонам соответствуют разные кажущиеся скорости поверхностных волн. В данном случае кажущиеся скорости поверхностных волн соответствуют фазовым скоростям вдоль поверхности. В качестве примера, на рисунке 2.25(а, б) показано: первое суммирование производится по наклону, который соответствует скорости 500 м/с; второе по



наклону, который соответствует скорости 140 м/с; третье по наклону, который соответствует скорости 65 м/с.

Максимум амплитуды будет приходиться на наклон суммирования, который совпадает с осью синфазности (рис.2.25б) и соответствует скорости 140м/с. Таким образом, фазовая скорость ( $V_f$ ) будет равна 140 м/с при частоте 20 Гц [82].

Таким образом, дисперсионное изображение (рис. 2.26) есть результат процедуры наклонного суммирования для всех частот, определенных частотным срезом, и является зависимостью амплитуды наклонного суммирования от частоты и скорости. При этом уровень амплитуды суммирования отображается яркостью цвета на дисперсионном изображении (чем выше амплитуда, тем ярче цвет заливки, также в программном модуле отображается численное значение амплитуды в любой точке под курсором, что позволяет с большой точностью находить абсолютные максимумы амплитуды).



Принцип пикирования дисперсионной кривой по максимумам амплитуды

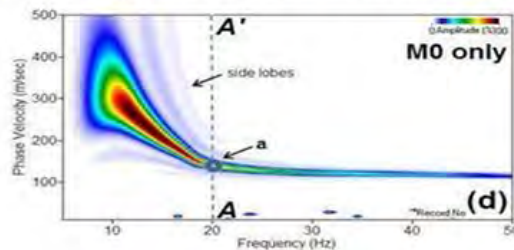


Рисунок 2.26 – Дисперсионное изображение (masw.com).

На дисперсионном изображении точкой «а» обозначена максимальная амплитуда для частоты 20Гц при скорости 140м/с.

Дальнейшее изучение дисперсионной кривой производится путем пикирования дисперсионного изображения по точкам с максимальной амплитудой (рис. 2.26). Для того чтобы отчистить дисперсионное изображение от ненужных для анализа волн можно на сейсмограмме ОПВ произвести процедуру мьютинга (см.

рисунок 2.27), т.е. срезать первые вступления продольных волн, отраженные волны, волны поперечного типа, если они имеются на сейсмограмме.

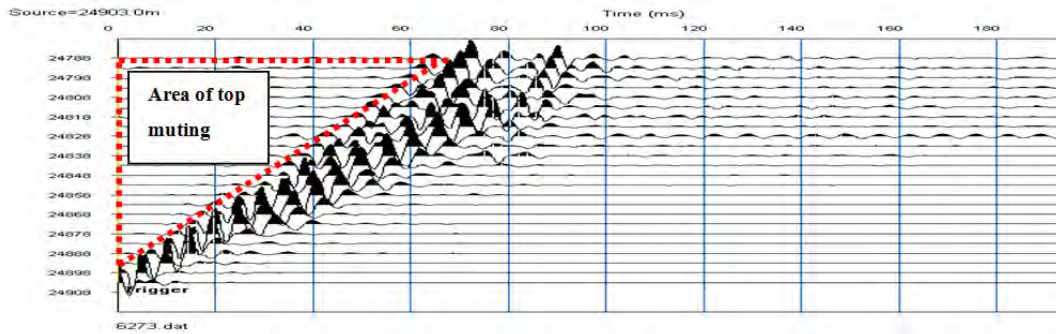


Рисунок 2.27– Процедура «top muting». Выделение волнового пакета поверхностных волн.

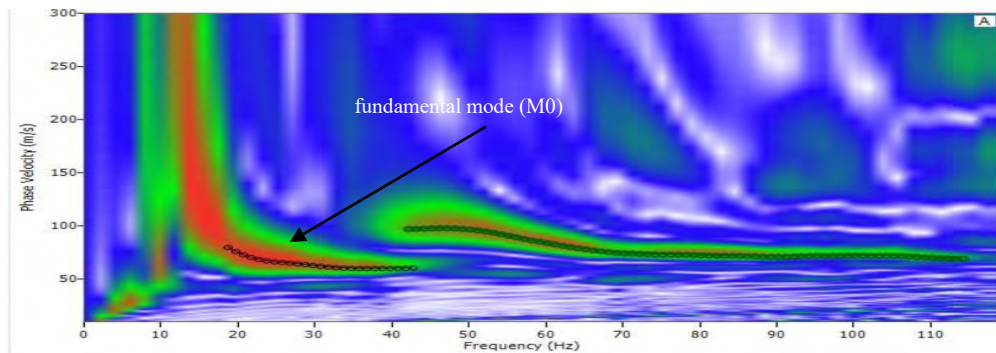


Рисунок 2.28 - Пример дисперсионного изображения с пропикированными дисперсионными кривыми фундаментальной моды и высшей моды (окно MASW) (winmasw.com).

Важным вопросом, который возникает при работах методикой MASW, является соотношение характеристик дисперсионной кривой к точке на профиле приема. Некоторые разработчики программного обеспечения привязывают эти характеристики к центру приемной линии (например, RadexPro). Есть разработчики, которые соотносят эти характеристики к среднему расстоянию между всеми источниками и приемниками (например, Zond), в этом случае точка привязки приближена к вынесенному источнику. В литературе этот вопрос все еще не решен. В целом считается, что дисперсионная кривая строится по всем парам источник-приемник, которые присутствуют при регистрации, и по этой причине характеристика дисперсионной кривой является интегральной для всей косы в целом.

У автора на этот счет имеется своя точка зрения: низкочастотная область кривой, в большей степени, характеризует дальнюю от источника часть профиля, в этой части профиля высокочастотные волны уже сильно ослабевают и затухают, при этом до дальней части профиля доходят низкочастотные волны с большими длинами, и соответственно, характеризующие более глубокие горизонты. Схематично принцип распределения волн представлен на рисунке 2.29.

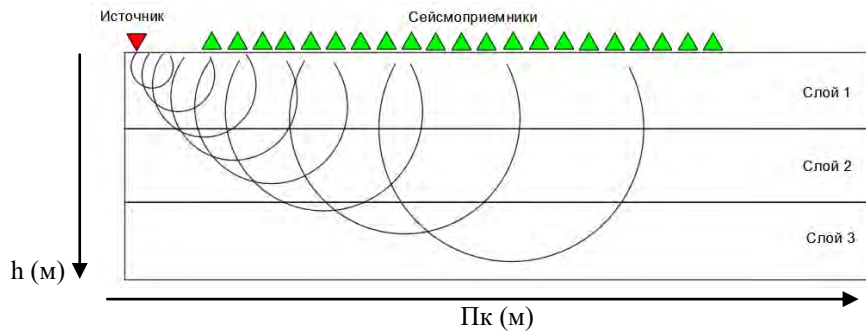


Рисунок 2.29 – Принципиальная схема распространения поверхностных волн и их регистрация.

В высокочастотной области кривой преобладают высокочастотные волны, обладающие малыми длинами волн и характеризующие близкие к поверхности горизонты. Эти волны быстро затухают и на большие расстояния не распространяются.

## 2.5. Оценка влияния параметров, входящих в дисперсионное уравнение на дисперсионную кривую поверхностных волн

Дисперсионное уравнение 2.4 (пункт 2.4) есть функция четырех параметров для каждого слоя: скорости продольных ( $V_p$ ), скорости поперечных волн ( $V_s$ ), плотности ( $\rho$ ), мощности слоев ( $h$ ).

Для того чтобы оценить уровень влияния параметров, входящих в дисперсионное уравнение на кривую дисперсии поверхностных волн в рамках диссертационных исследований, было проведено математическое моделирование.

В 2003 году уже были опубликованы результаты похожих экспериментов, которые были проведены китайскими учеными[93]. В работе был исследован



механизм возникновения зигзагообразных кривых дисперсии. Результатами экспериментов было показано, что по зигзагообразным дисперсионным кривым можно определить не только возможное расположение низкоскоростных слоев, но и получить информацию о структуре слоев (трещины и т.д.). Авторами также была предпринята попытка по оценке влияния скорости волн сжатия, волн сдвига и плотности слоев на зигзагообразные кривые дисперсии, и были получены вполне показательные результаты.

В настоящей диссертационной работе автором были проведены расчеты с помощью программы, разработанной в научно-исследовательском отделе ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс" [84,88,109]. В используемой программе заложен аналитический способ расчета скоростей поперечных волн по фазовым скоростям поверхностных волн рэлеевского типа, при этом при расчетах используется потенциал их смещения для двухслойной и трехслойной модели исходя из известных параметров слоев, участвующих в ее формировании. В программе используются следующие параметры:  $\lambda_R$  – длина поверхностной волны рэлеевского типа;  $V_{p1}$ ,  $V_{p2}$ ,  $V_{p3}$  – скорости волн продольного типа в слоях, представленных в модели в зависимости от количества рассчитываемых слоев;  $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s3}$  – скорости волн поперечного типа, характеризующие соответствующие слои заложенной модели;  $V_{R1}$ ,  $V_{R2}$ ,  $V_{R3}$  – скорости поверхностных волн, характеризующие каждый слой в отдельности;  $V_R$  – скорость наблюдаемой волны рэлеевского типа, которая характеризует все вовлекаемые в колебательный процесс слои модели для определенных значениях длин волн;  $h_1$ ,  $h_2$  – мощности слоев заданных в модели.

Аналитическая зависимость, предложенная в программе, позволяет 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 с известной информацией об их мощностях. Другими словами, программа позволяет решать как прямые задачи геофизики, так и обратные [84].

В основе зависимости между упругими параметрами и свойствами поверхностной волны использовано известное уравнение потенциалов смещений для плоских рэлеевских волн [94,95]:

$$\phi = A_e^{(-m\aleph h)} e^{|j\aleph(x-V_R t)|} - \text{потенциал горизонтального смещения}; \quad (2.5)$$

$$\chi = B_e^{(-n\aleph h)} e^{|j\aleph(x-V_R t)|} - \text{потенциал вертикального смещения}; \quad (2.6),$$

где А, В - коэффициенты, которые зависят от начальной величины сигнала;

$$m^2 = \left(1 - \frac{V_R^2}{V_p^2}\right); \quad (2.7)$$

$$n^2 = \left(1 - \frac{V_R^2}{V_s^2}\right); \quad (2.8)$$

$$\aleph = 2\pi/\lambda; \quad (2.9),$$

где X- расстояние от источника волн;  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_R$  – скорости волн продольного, поперечного типа и волн рэлеевского типа; t- время распространения волны;  $\lambda$ - длина волны; h- глубина распространения волны.

Уравнения, отражающие изменения потенциала в зависимости от удаления от источника, имеют вид:

$$\Delta\phi = e^{(-m\chi h)}; \quad (2.10)$$

$$\Delta\chi = e^{(-n\chi h)}; \quad (2.11)$$

При этом глубина проникновения поверхностной волны определяется величинами  $m\chi$  и  $n\chi$  и характеризуется экспоненциальным спадом.

Общий приведенный потенциал волны рэлеевского типа рассчитывается по соотношению теории упругости для плоских волн:

$$d\xi = \frac{(\Delta\phi + \Delta\chi)}{2}; \quad (2.12)$$

Считается, что скорость волны рэлеевского типа может быть определена как сумма вклада каждого слоя пропорционально его потенциалу.

В итоге для расчетов общего  $V_R$  для модели, содержащей 2 слоя, в программе используется уравнение:

$$V_R = \frac{V_{R1}V_{R2}}{V_{R2}(1-d\xi) + V_{R1}d\xi}; \quad (2.13)$$

Для случая, когда в расчетах используется модель с тремя слоями и более, зависимость выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta_n}{V_R} = \frac{\Delta_1 - d\xi_1}{V_{R1}} + \frac{(\Delta_2 - d\xi_2) - (\Delta_1 - d\xi_1)}{V_{R2}} + \dots + \frac{(\Delta_n - d\xi_n) - (\Delta_{n-1} - d\xi_{n-1})}{V_{Rn}} + \frac{d\xi_n}{V_{Rn+1}} \quad (2.14),$$

где n- количество слоев.

Результаты расчетов, полученных с помощью используемой программы, сравнивались с дисперсионными кривыми, полученными в исследованиях Л.В. Бреховских, И. Толстого, О.К. Воронкова, что являлось критерием для оценки правильности расчетов данной программы. Сравнения показали очень высокую степень сходимости результатов [84,109].

В первую очередь были проведены расчеты для оценки влияния изменений скорости продольной волны ( $V_p$ ) на дисперсионную кривую.

За основу была создана сейсмо-геотехническая модель №1, которая состояла из 2-х слоев. Верхний слой имел характеристики:  $V_{p1}=300$  м/с;  $V_{s1}=150$  м/с;  $h_1=3$  м. Нижний слой имел характеристики:  $V_{p1}=800$  м/с;  $V_{s1}=400$  м/с;  $h_1$ =полупространство, для которой была рассчитана дисперсионная кривая (исходная). Далее рассчитывалась дисперсионная кривая для модели с уменьшенной скоростью продольных волн в первом слое на 10% (модель №2) (рис. 2.30). После этого дисперсионные кривые сравнивались, и рассчитывался отклик дисперсионной кривой в процентном соотношении (рис. 2.31).

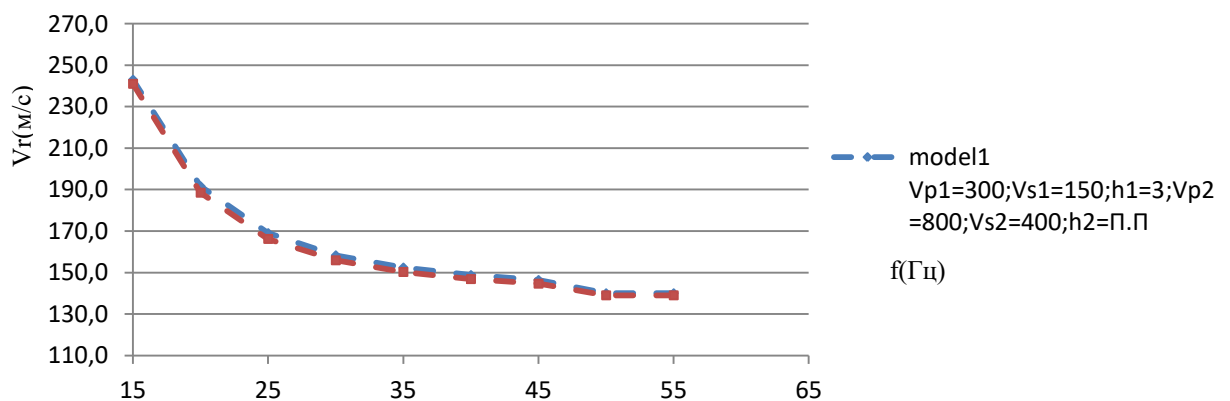


Рисунок 2.30 – Рассчитанные дисперсионные кривые для исходной модели и модели со сниженными скоростями  $V_p$  на 10%.

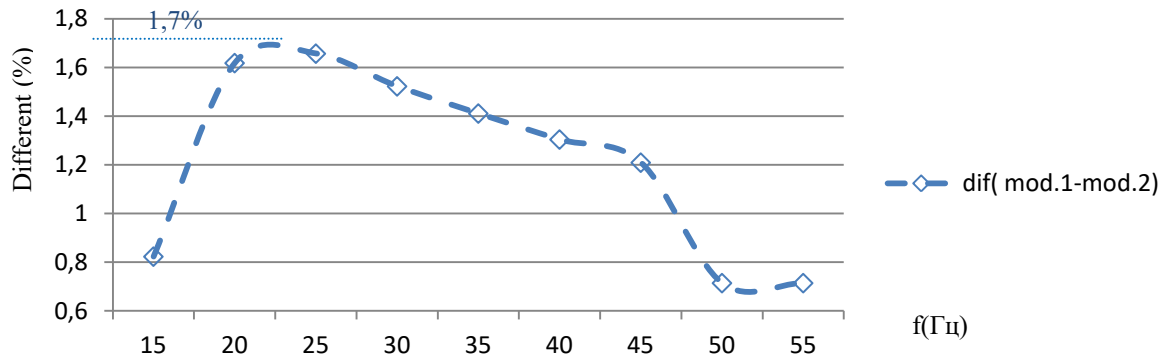


Рисунок 2.31 – Отклик дисперсионной кривой на изменение скорости продольной волны ( $V_p$ ) на 10%.

Эксперимент показал, что при изменении скорости продольных волн первого слоя на 10%, изменения фазовой скорости рэлеевских волн оказались совершенно незначительными: не более 1.7%. максимальные изменения наблюдаются в низкочастотной области дисперсионных кривых. Это свидетельствует о том, что скорость волн рэлеевского типа нечувствительна к изменениям скорости продольных волн в слоях.

Далее были проведены расчеты для оценки отклика дисперсионной кривой на изменения скорости поперечной волны ( $V_s$ ) в верхнем слое. Для этих целей использовалась исходная сейсмо-геотехническая модель, в которой изменялся параметр  $V_s$  (скорости поперечной волны) в верхнем слое на 10% (модель 3) (рис. 2.32). После этого дисперсионные кривые, также как и в случае с изменением  $V_p$ , сравнивались после чего рассчитывался отклик (рис. 2.33).

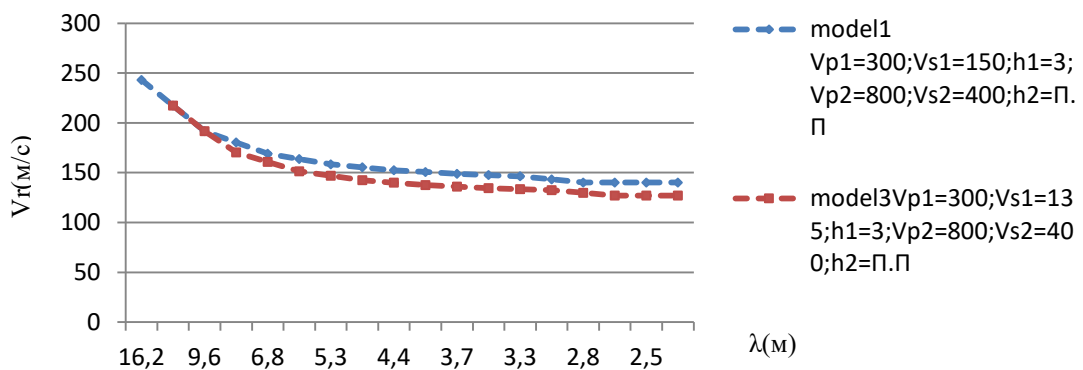


Рисунок 2.32 – Рассчитанные дисперсионные кривые для исходной модели и модели со сниженными скоростями ( $V_s$ ) на 10%.

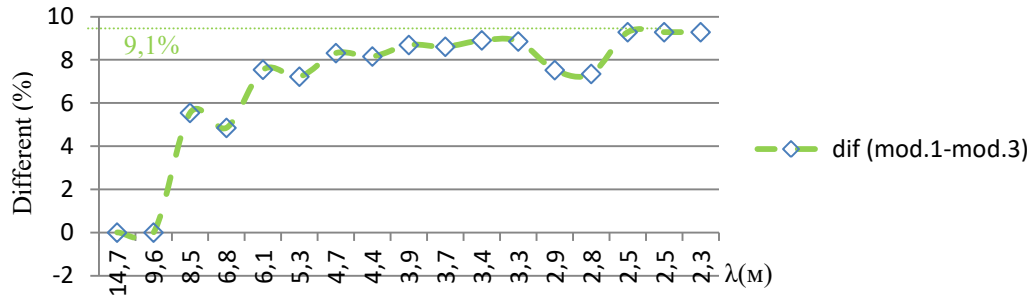


Рисунок 2.33 – Отклик дисперсионной кривой на изменение скорости поперечной волны ( $V_s$ ) на 10%.

Результаты эксперимента показали, что дисперсионная кривая сильно меняется при изменении значений поперечных волн ( $V_s$ ) в первом (верхнем) слое. Фазовая скорость псевдорэлееской изменилась на 9,1% при изменении значений поперечных волн, характеризующих первый слой на 10%. Это указывает на то, что влияние скорости сдвиговой волны в первом слое на скоростные характеристики волны рэлееского типа существенно, в особенности в высокочастотной области (области коротких длин волн). Максимальные изменения фазовых скоростей поверхностных волн происходят в диапазоне длин волн, близких к подошве слоя, в котором произошли изменения. В низкочастотной части дисперсионной кривой, которая характеризуется длинными волнами, величина изменений постепенно стремится к нулю.

Для оценки влияния на дисперсионную кривую параметра мощности ( $h$ ) слоя использовалась исходная модель, в которой менялась мощность верхнего слоя на 10% (увеличивалась на 0,3 м.) (рис. 2.34). После этого дисперсионные кривые сравнивались, после чего рассчитывался отклик дисперсионной кривой (рис. 2.35).

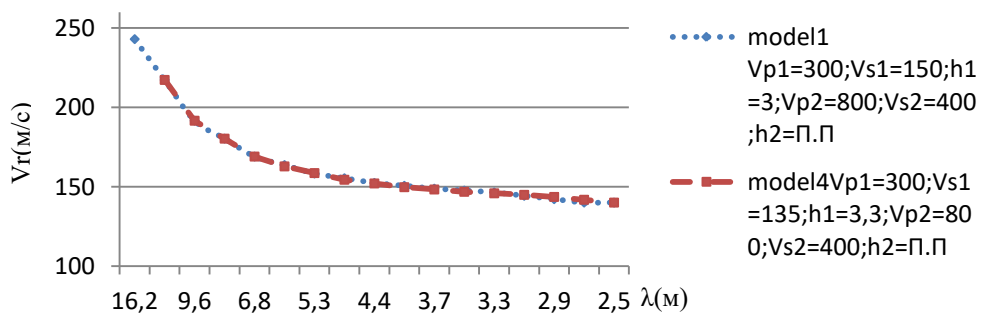


Рисунок 2.34 – Рассчитанные дисперсионные кривые для исходной модели и модели с увеличенной мощностью верхнего слоя  $h$  на 10%.

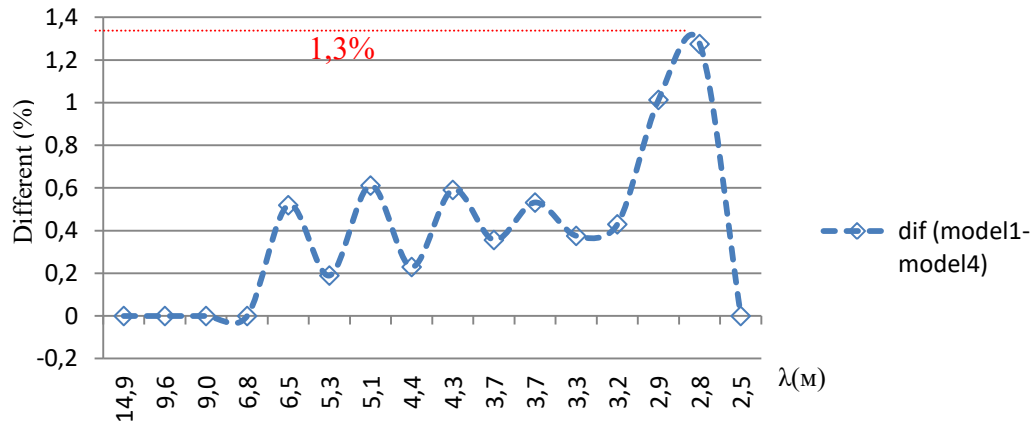


Рисунок 2.35 – Отклик дисперсионной кривой на изменение мощности верхнего слоя (h) на 10%.

В результате эксперимента было отмечено, что изменение мощности первого слоя на 10% повлекло за собой несущественные изменения фазовых скоростей поверхностных волн рэлеевского типа на 1,3%. Максимальные отклонения дисперсионной кривой наблюдаются в высокочастотной области кривой. Область характеризуется в большей степени верхним слоем. Далее ближе к длинноволновой области отклонения постепенно уменьшаются. При незначительном изменении мощности верхнего слоя происходит плавное изменение средних скоростных характеристик волны, которая охватывает верхний слой и некоторый объем полупространства.

Что касается параметра плотности, который также присутствует в дисперсионном уравнении (2.2), то, по мнению автора, с ним все неоднозначно.

Статистическая обработка большого числа как лабораторных, так и натуральных наблюдений, позволяет сделать вывод, что скорости тесно связаны с плотностью горных пород, возрастая, с увеличением последней, и соответственно снижаясь, при ее снижении.

Корреляционные зависимости для оценки объемной массы скелета приведены у многих авторов. Например, у Бондарева В.И. они имеют следующий вид[97]:

$$\gamma_{об} = (1,013V_p^{\frac{1}{8}} - 0,390) \quad (2.13)$$

$$\gamma_c = (0,1115 \cdot 10^{-2} + V_s + 1,410) \quad (2.14)$$

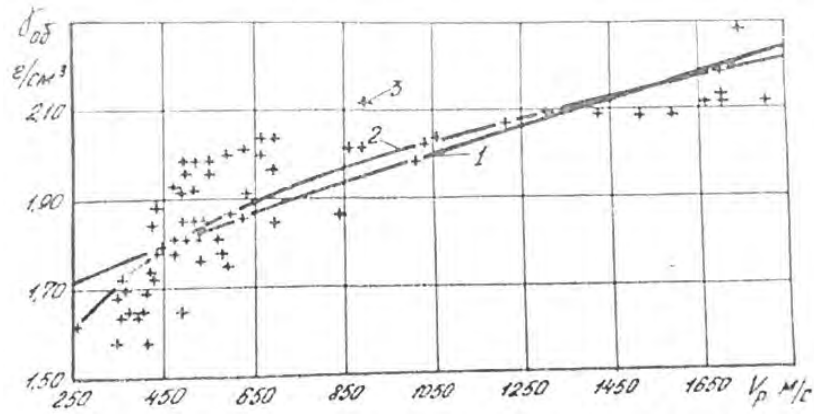


Рисунок 2.36 - Графики корреляционной зависимости между объемной массой песчаных грунтов любой степени влажности и величиной скорости распространения продольных волн: 1- линия линейной регрессии; 2- линия криволинейной регрессии; 3- результаты наблюдений (Бондарев В.И.).

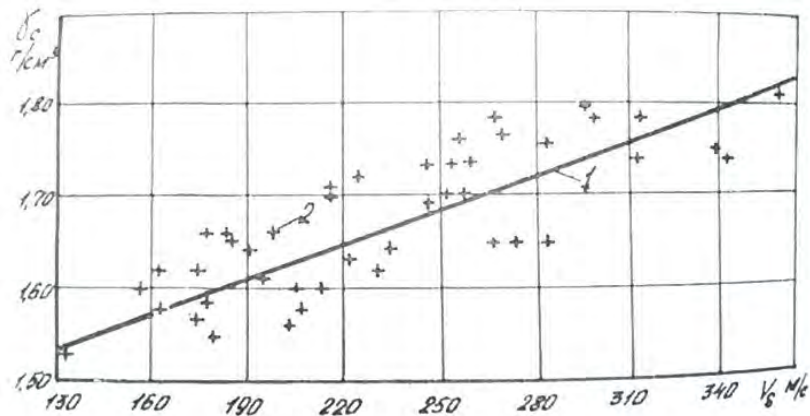


Рисунок 2.37 - Графики корреляционной зависимости между величиной объемной массой песчаных грунтов любой степени влажности и величиной скорости распространения поперечных волн: 1- линия линейной регрессии; 2- результаты наблюдений (Бондарев В.И.).

Приведенные соотношения (2.13-2.14) и графики корреляционной зависимости (рис.2.36-2.37) обычно используется для приближенной оценки плотности пород по их скоростным характеристикам, полученным, например, в буровых скважинах в результате проведения акустического каротажа.

Скорости как продольных, так и поперечных волн в значительной степени определяются характером структурных связей горных пород. Наибольшие скорости наблюдаются в консолидированных скальных породах с типичными для них жесткими связями. Все виды упрочнения этих связей (например, вследствие

метаморфизма) приводят к повышению скоростей. И напротив, если связи распадаются, то и скорости снижаются [16].

Поэтому правильнее полагать, что при изменении плотности, в первую очередь меняются скорости объемных волн ( $V_p$  и  $V_s$ ), которые и так находятся в составе дисперсионного уравнения. Более того в составе известного уравнения Рэлея для однородного бесконечного полупространства (2.15) присутствуют только скорости продольных и поперечных волн.

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\left(\frac{V_R}{V_P}\right)^2\right]\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left[1 - \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2\right] = \Omega; \quad (2.15)$$

Также известно, что скорости распространения объемных волн можно записать с помощью постоянных Ламе, которые характеризуют упругость среды ( $\lambda$  и  $\mu$  – постоянные Ламе). Коэффициент  $\lambda$  описывает напряжения, возникающие в образце при изменении объема. Константа  $\mu$  характеризует сдвиговые деформации и называется модулем сдвига.

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}}, \quad (2.16)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (2.17),$$

где  $\rho$  – плотность среды.

Таким образом, параметр плотности уже включен в скорость как продольной, так и поперечной волны. Поэтому закономерно, если меняется плотность в массиве, то меняются скорости, характеризующие этот массив. Поэтому можно вообще не выделять изменение плотности в отдельный элемент при дисперсионном анализе.

Результаты проведенных экспериментов показали, что характер строения среды по скорости распространения продольных волн и изменение мощности верхнего слоя незначительно влияют на кинематические и динамические свойства гармоник волн рэлеевского типа.



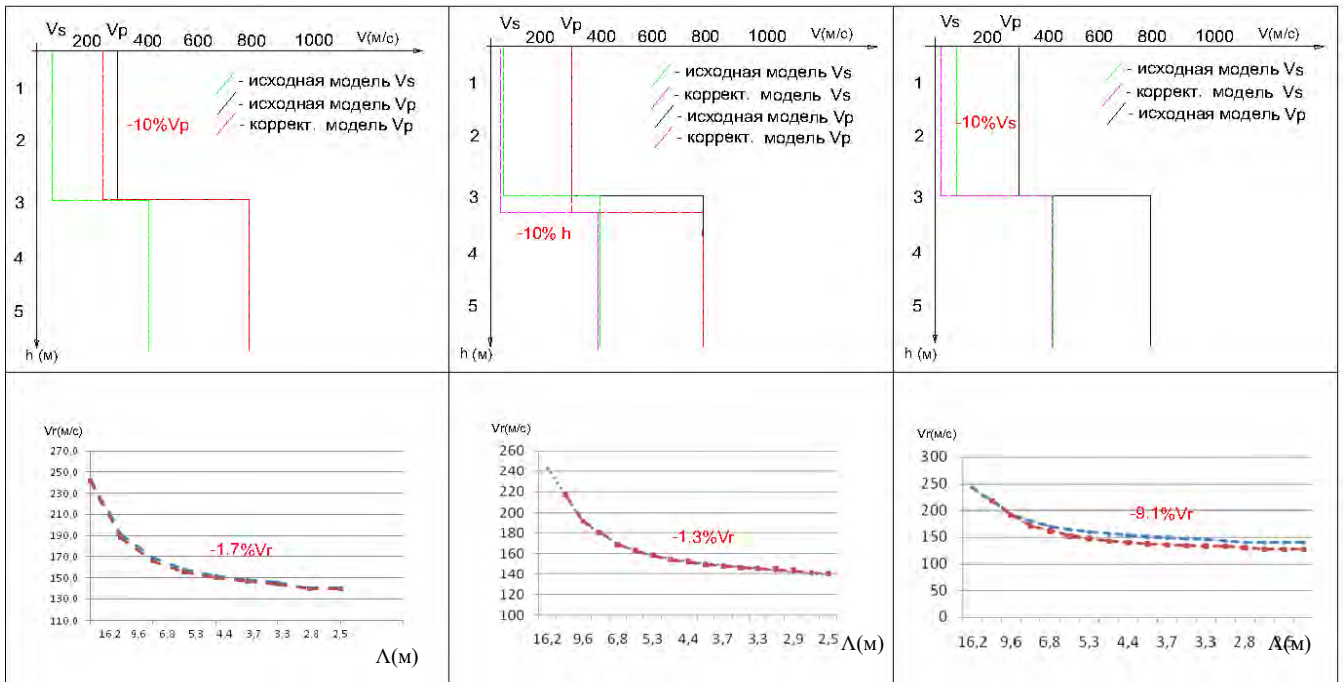


Рисунок 2.38 - Зависимости кинематических и динамических свойств гармоник рэлеевских волн от изменений значений входящих в уравнение параметров.

Основное, сильно выраженное влияние на динамические и кинематические характеристики гармоник поверхностных волн рэлеевского типа оказывает характер строения среды по скорости распространения поперечных волн (рис. 2.38). Это положение является «ключевым» для данной диссертационной работы. На него опираются основные защищаемые положения исследований в рамках работы.

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. При этом известно, что сейсмические волны продольного типа значительно реагируют на степень увлажнения в массиве, а при условии, что циклы мониторинговых измерений в течение года могут проводиться в разные сезонные периоды (периоды затяжных дождей, или наоборот засушливый период), это может стать помехой для объективной оценки состояния массива. Скорости волн поперечного типа наоборот 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 [81]), что является уже прямым признаком ослабления структурных связей в породе.

В связи с этим можно полагать, что по частотно-скоростным характеристикам поверхностных волн рэлеевского типа косвенно можно следить за изменениями скоростных характеристик поперечных волн, а, используя выведенные предшественниками корреляционные зависимости между сейсмическими и физико-механическими свойствами грунтов - за напряженно-деформированным состоянием исследуемого массива.

## **2.6. Способ расчета параметров, характеризующих изменения реологических свойств грунтов по данным дисперсионных параметров поверхностных волн**

Известно, что по ряду интегрально усредненных волновых параметров, в который входят  $(V_P, V_S, \alpha_S, \omega)$ , можно рассчитывать целый комплекс интегрально усредненных физико-механических характеристик. К списку характеристик можно отнести коэффициенты пористости, проницаемости, постоянные Ламе, общую плотность и время релаксации. При этом по частотно-скоростным характеристикам поверхностных волн рэлеевского типа исследователь имеет возможность оперировать только скоростями поперечных волн ( $V_S$ ), алгоритм расчета которых представлен во многих программных продуктах, в том числе и в программе, разработанной в ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс". Из теории упругости известно, что модуль сдвига ( $G$ ) - это физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться сдвиговой деформации, при этом она является вторым параметром Ламе ( $\mu$ ). В свою очередь параметр Ламе определяется как раз из известных нам значений скоростей волн поперечного типа ( $V_S$ ) и плотности ( $\rho$ ) (11).

$$\mu = V_S^2 \rho \quad (2.18)$$

Учитывая, что постоянная Ламе является параметром, характеризующим упругие деформации изотропных твердых тел, и в линейной теории упругости закон Гука выражает линейную зависимость между тензором деформаций и тензором напряжений, использовать этот параметр для оценки абсолютных характеристик

неупругих грунтов казалось бы нельзя. При этом весь принцип инженерной сейсморазведки основан на том, что закон Гука справедлив для большинства горных пород, в том числе и не абсолютно упругих, при условии, что деформации и напряжения не слишком велики. Чем меньше величина наблюдаемых деформаций, тем ближе оказывается вещество по своим свойствам к абсолютно упругому телу. Сейсмическая волна - внешняя возбуждающая сила, действующая в какой-либо небольшой области среды, имеет вид короткого импульса[94,124]. Следующая сложность выражается в том, что у исследователя нет точных данных о плотности исследуемых грунтов, и это уже является основной причиной невозможности определения абсолютных характеристик грунтов сейсмическими методами.

При этом оценка самих изменений характеристик исследуемых грунтов - величина относительная и в данном случае определение изменений значений  $\mu$  ( $Gd$ ), и соответственно оценка относительных изменений упругих свойств массива вполне обоснована.

Следовательно, физический смысл позволяет, используя значения рассчитанных скоростей поверхностных волн  $V_s$  и усредненный параметр плотности, который известен исследователю по данным геологических изысканий, определять параметр  $Gd$  (модуль сдвига) по формуле(2.19).

$$Gd = V_s^2 \rho \quad (2.19)$$

При необходимости, с помощью известных корреляционных зависимостей, у исследователя есть возможность расчета относительных изменений значений основных физико-механических характеристик таких как:  $\varphi$  (угол внутреннего трения),  $C$  (сцепление),  $E_d$  (модуль Юнга)[97].

При этом данные об относительных изменениях физико-механических характеристик исследуемого массива позволяет произвести корректировку расчетов устойчивости системы горная выработка- вмещающий массив.

Если же исследуемый объект хорошо изучен и известны критические условия устойчивости системы, данная методика позволяет на количественном уровне

прогнозировать аварийные события. Для этого геотехниками определяются критериальные значения параметров устойчивости системы "горная выработка-вмещающий массив горных пород", превышение которых становится опасным для целостности горной выработки.

### **2.7. Принципиальный алгоритм метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров поверхностных волн**

На основании анализа теоретической основы и результатов проведенных исследований, представленных в главе I и II, стало возможным составление принципиального алгоритма разрабатываемого метода (рис. 2.39). В результате мониторингового цикла исследователь получает информативные параметры об изменении свойств массива горных пород. При условии, что геотехниками рассчитаны критериальные характеристики устойчивости системы "крепь (обделка) горной выработки - вмещающий массив", по данным мониторинга можно количественно определять приближение аварийной ситуации.

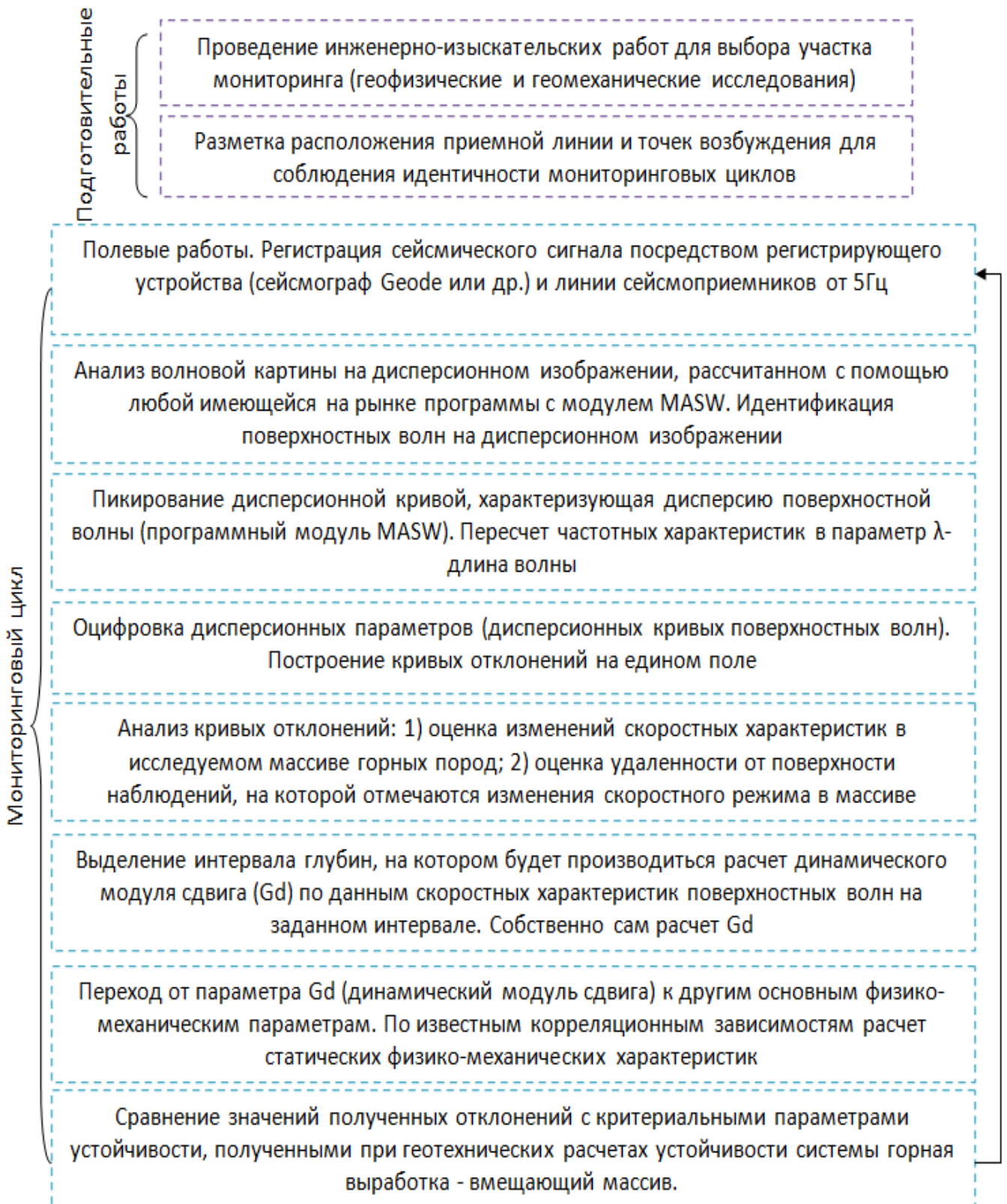


Рисунок 2.39 - Принципиальный алгоритм метода оценки геодинамического состояния массива горных пород на основе дисперсионных параметров сейсмических волн.

### **Глава III. Результаты расчетного математического и программного моделирования геологических процессов в массиве. Оценка уровня отклика дисперсионных кривых поверхностных волн на деформационные процессы в массиве**

В главе рассмотрены результаты расчетного математического и программного моделирования. Процессы, которые были смоделированы, часто встречаются при строительстве и эксплуатации тоннелей неглубокого заложения: оползневые деформации сдвига, деформации обделки горной выработки, которые могут быть связаны с изменением поля напряжений во вмещающем массиве в результате изменения физико-механических свойств грунтов или других возможных причин.

#### **3.1. Сейсмическая модель среды**

Реальные геологические среды - очень сложные образования, характеризующиеся большим числом разнообразных параметров. При сейсмическом воздействии в такой среде возникают не менее сложные волновые поля. Все многообразие воздействия среды на распространяющиеся в ней сейсмические волны можно разделить на два процесса: рассеяние волн и диссипацию (поглощение) их энергии. Первое явление определяется неоднородностями строения среды, а второе - ее реологическими свойствами. При изучении этих двух сторон сейсмического процесса необходимо прибегать к определенной идеализации среды и волнового поля, отображая их в виде моделей. Основное влияние поглощение оказывает на динамические характеристики волн. Оно проявляется в виде избирательного по частоте затухания амплитуд сейсмических колебаний. Характеристики поглощения могут дать важную информацию о составе и состоянии пород, по которым проходят сейсмические волны. Однако эти эффекты сравнительно слабы, они маскируются значительно более сильным проявлением неоднородностей строения среды, которая формировалась на протяжении большого геологического времени под воздействием

различных тектонических и физико-химических процессов переработки разного исходного материала. Эти процессы протекали неравномерно во времени и в пространстве. В результате реальная геологическая среда является неоднородной по своему составу и физико-механическим свойствам как по вертикали, так и по латерали. Упрощение схемы строения такой среды и ее отображение в виде модели - неизбежный и необходимый этап любых геофизических исследований[21].

Очевидно, что большая сложность реальных сред обуславливает столь же сложное поле генерируемых средой волн. При отображении процессов образования и распространения этих волн используются упрощенные представления о механизме передачи сейсмических колебаний в твердом теле. И наконец, результирующее волновое поле мы также отображаем в виде конкретной модели, вычленив из сложной записи колебаний главные составляющие - отдельные волны, обособленные характеристики и т.п.

Таким образом, цепочка "реальная среда - сейсмическое воздействие - механические процессы образования и распространения волн - результирующее волновое поле", при ее изучении и описании, заменяется на цепочку "модель среды - модель воздействия - модель механических процессов - модель волнового поля". Под сейсмической моделью среды обычно понимают идеализированную схему ее строения, включая механизм передачи колебаний.

При выборе и построении сейсмической модели предлагается различать два аспекта:

- 1) особенности устройства среды в пространстве, т.е. неоднородности ее строения и геометрический образ;
- 2) особенности устройства среды в каждой точке этого пространства как некоторой механической системы передачи сейсмических колебаний, т.е. ее механический образ.

На первый взгляд кажется очевидным слишком большое несоответствие сложного характера реальных геологических образований и упрощенных представлений, на основе которых строится модель сплошной среды. Реальные микро- и макрозернистые породы образованы порами и трещинами, заполненными

разными жидкостями и газами. Каждая из этих компонент характеризуется своими физико-механическими свойствами и разнообразными связями друг с другом. Возможность отображения таких систем компактной моделью сплошной среды с некоторым сравнительно небольшим числом обобщенных механических параметров требует определенных доказательств[21].

Пригодность той или иной модели всецело определяется возможностью правильного ее решения, в рамках поставленной перед исследователем задачи. Наличие нескольких моделей для объяснения одних и тех же фактов говорит о невозможности однозначного выбора, но при этом предпочтение отдают простейшей из них, так как никакие усложнения модели в данном случае нельзя считать экспериментально обоснованными.

С этих позиций можно утверждать, что сейсмическая модель сплошной среды является достаточно емкой. В ее рамках нашли объяснения все главные эффекты и наиболее значимые явления из области образования и распространения сейсмических волн.

### **3.2. Результаты математического расчетного моделирования**

Расчеты производились посредством решения обратной задачи с помощью программы аналитического расчета скоростей поперечных волн по фазовым скоростям поверхностных волн рэлеевского типа. Описание программы и математика расчета подробно описаны в пункте 2.4 главы II.

Задачей первого этапа моделирования являлась оценка отклика дисперсионной кривой на изменения скоростных характеристик структурных элементов модели, которые, как известно, зависят от физико-механических свойств грунтов. Подобные изменения могут быть следствием происходящих в слое процессов разуплотнения, увеличения трещиноватости, например, под воздействием растягивающих напряжений в процессе оползневых деформаций. Например, оползневый процесс, преимущественно у оползней асеквентного типа, сопровождается формированием области вмещающей поверхность скольжения с



пониженными скоростными характеристиками. Снижение скорости в данной области обусловлено повышенными растягивающими напряжениями, в результате которых порода, находящаяся в области выражена повышенной трещиноватостью и по мере увеличения растягивающих напряжений уровень трещиноватости растет.

Исходная модель, в которой в ходе эксперимента менялись свойства структурных элементов, показана на рис.3.1.1.

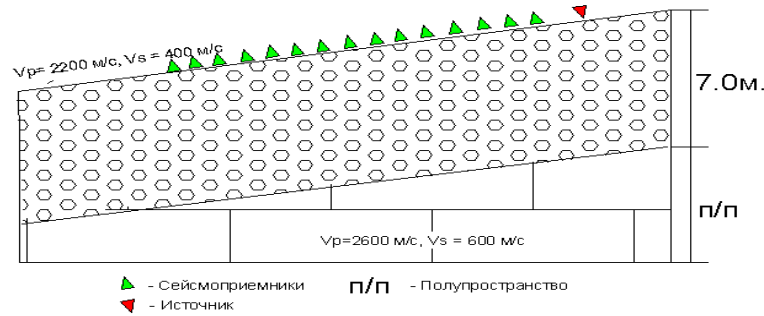


Рисунок 3.1.1 – Сейсмо-геотехническая модель №1 (исходная модель - устойчивое состояние массива). Верхний слой:  $V_{p1} = 2,2$  км/с;  $V_{s1} = 0,4$  км/с;  $h = 7,0$  м; слой полупространство:  $V_{p2} = 2,6$  км/с;  $V_{s2} = 0,6$  км/с.

Во-первых, был смоделирован процесс появления промежуточного слоя, в котором, вследствие различных причин происходили процессы снижения прочностных характеристик, например, при увеличении трещиноватости, что естественно вызывает снижение скоростных характеристик слоя, в котором происходят изменения [105]. Для этого скоростные характеристики структурного элемента (слоя №2) исходной модели №1 были изменены в несколько этапов (рис.3.1.2-3.1.4).

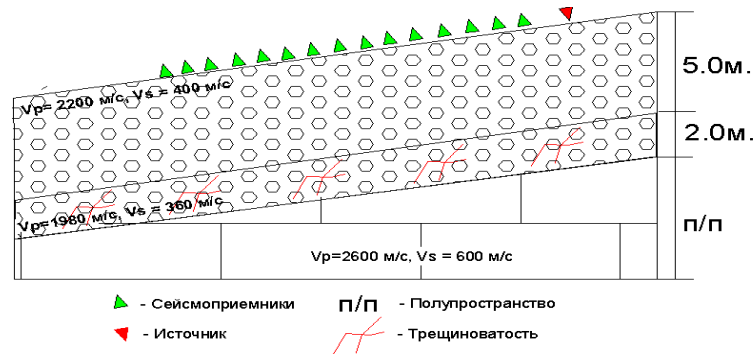


Рисунок 3.1.2 – Сейсмо-геотехническая модель №2 (ослабленное состояние промежуточного слоя). Верхний поверхностный, покрывающий, слой:  $V_{p1} = 2,2$  км/с;  $V_{s1} = 0,4$  км/с;  $h = 5,0$  м; Промежуточный слой:  $V_{p1} = 1,98$  км/с;  $V_{s1} = 0,36$  км/с;  $h = 2,0$  м; Слой полупространство:  $V_{p2} = 2,6$  км/с;  $V_{s2} = 0,6$  км/с.

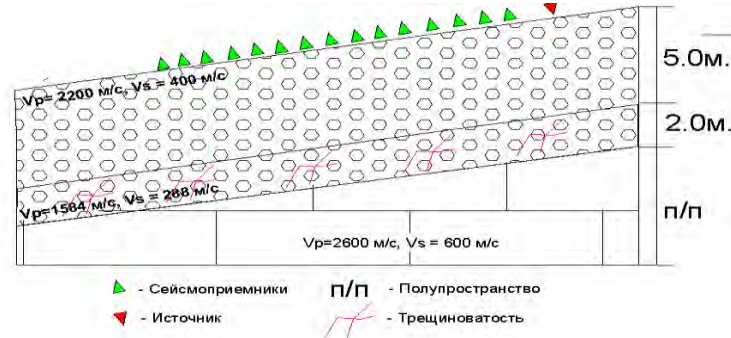


Рисунок 3.1.3 – Сейсмо-геотехническая модель №3 (динамика изменения состояния промежуточного слоя). Верхний поверхностный, покрывающий, слой:  $V_{p1} = 2,2$  км/с;  $V_{s1} = 0,4$  км/с;  $h = 5,0$  м; Промежуточный слой:  $V_{p1} = 1,584$  км/с;  $V_{s1} = 0,288$  км/с;  $h = 2,0$  м; Слой полупространство:  $V_{p2} = 2,6$  км/с;  $V_{s2} = 0,6$  км/с.

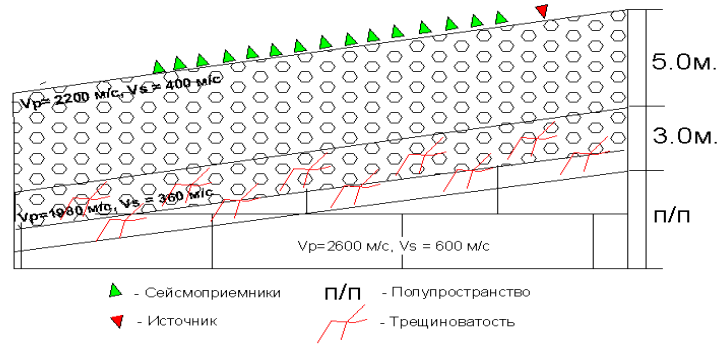


Рисунок 3.1.4 – Сейсмо-геотехническая модель №4 (динамика изменения состояния промежуточного слоя). Верхний поверхностный, покрывающий, слой:  $V_{p1} = 2,2$  км/с;  $V_{s1} = 0,4$  км/с;  $h = 5,0$  м; Промежуточный слой:  $V_{p1} = 1,584$  км/с;  $V_{s1} = 0,288$  км/с;  $h = 3,0$  м; Слой полупространство:  $V_{p2} = 2,6$  км/с;  $V_{s2} = 0,6$  км/с.

На основании предложенных моделей были рассчитаны дисперсионные кривые (рис.3.1.5), которые отображали динамику состояния модели.

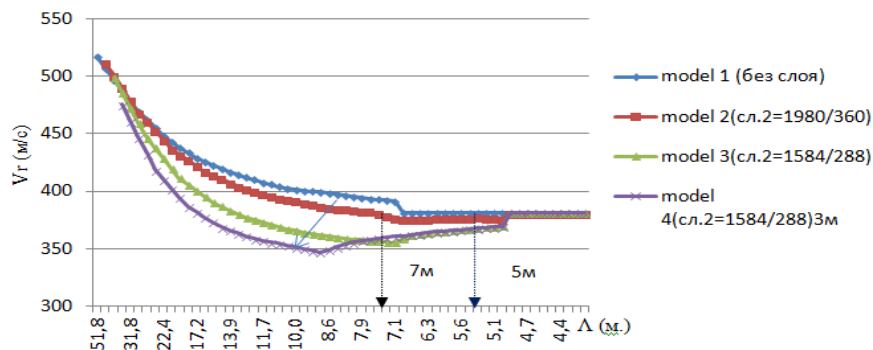


Рисунок 3.1.5 – Дисперсионные кривые для модели №1 (сохранное состояние промежуточного слоя), модели №2 (ослабленное состояние промежуточного слоя), модели №3 (дальнейшее ослабление слоя) и модели 4 (увеличение ослабленного слоя до 3 метров).

На рисунке 3.6 показаны отклонения траектории дисперсионных кривых для исходной модели № 1 и уточненных моделей № 2,3,4.

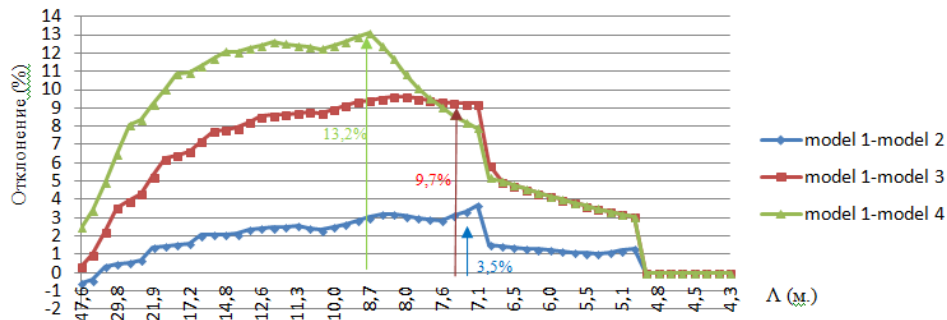


Рисунок 3.1.6 – Графики отклонений дисперсионных кривых характеризующих модели №2,3,4 от дисперсионной кривой исходной модели №1.

При анализе рассчитанных дисперсионных кривых и графиков их отклонений относительно исходного состояния, представленных на рисунках 3.1.5- 3.1.6, можно отметить следующее:

1) первое на что стоит обратить внимание - это изменение мощности первого слоя в исходной модели, которое произошло вследствие появления промежуточного слоя №2. На дисперсионной кривой, характеризующую исходную модель (рис. 3.1.5), отчетливо видна граница первого слоя и полупространства, которая находится на глубине 7 метров. При этом на последующих дисперсионных кривых, характеризующих модели 2,3 и 4 отмечено смещение границы до 5 метров, при этом можно увидеть падение скоростных характеристик в модели, начиная с границы  $\lambda=5$  метров.

2) появление в модели слоя с пониженными скоростными характеристиками (уменьшение значений скорости  $V_p$  и  $V_s$  в слое на 10%) изменило траекторию дисперсионной кривой на 3,5% в пике, который отмечается на  $\lambda=7$  метрах и соответствует подошве слоя, в котором произошли изменения.

3) снижение значений скорости  $V_p$  и  $V_s$  еще на 20% (всего на 30% от исходной модели) повлекли за собой изменение траектории дисперсионной кривой на 9,7%. Основные отклонения дисперсионной кривой отмечаются в области  $\lambda=7$  метров. Пик менее выражен, а область со значительными изменениями

дисперсионной кривой растянута в длинноволновую область дисперсионной кривой.

4) увеличение мощности промежуточного слоя №2 без изменения скоростных характеристик (относительно модели 3) привело к смещению пика в область  $\lambda=8.5$  метров с изменением параметров дисперсионной кривой на 13,2% в пике относительно исходной модели.

Для оценки отклика дисперсионных кривых на происходящие изменения во вмещающем массиве, в случае проведения исследований, проводимых через высокоскоростную (железобетонную) обделку горной выработки, были проведены математические расчеты относительно исходной модели №1 (рис. 3.1.7).

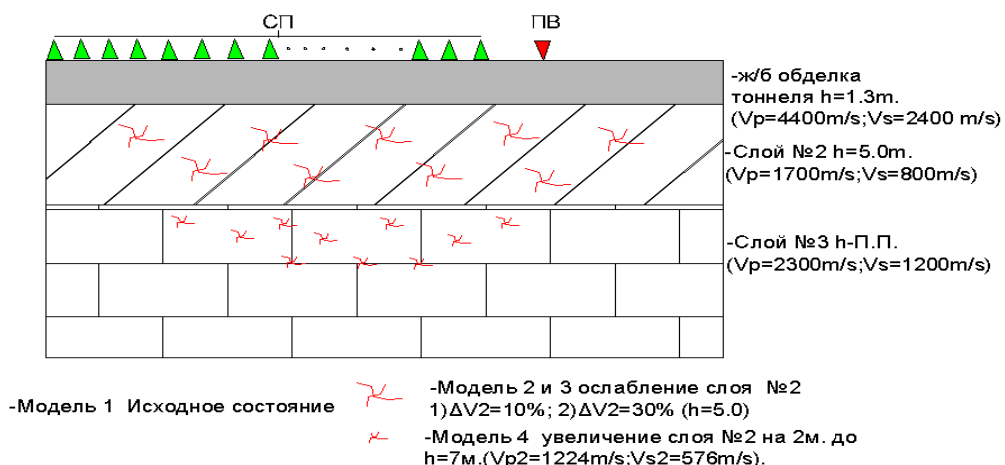


Рисунок 3.1.6 – Схема развития сейсмо-геотехнической модели №1 (при регистрации через высокоскоростную обделку горной выработки - инверсное распределение скоростей).

Исходная сейсмо-геотехническая модель №1 состояла из структурных элементов со следующими характеристиками:

1) верхний слой представлял железобетонную обделку тоннеля. Толщина обделки составляла 1,3 метра. Слой характеризовался скоростями продольной волны ( $V_p$ ) = 4400 м/с и поперечной волны ( $V_s$ ) = 2400 м/с;

2) слой №2 представлял ближнюю область заобделочного пространства мощностью 5 метров, который характеризовался скоростями  $V_p$  = 1700 м/с и поперечной волны  $V_s$  = 800 м/с;

3) далее в модели был заложен слой - полупространство (П.П.), который характеризовался скоростями  $V_p = 2300$  м/с и поперечной волны  $V_s = 1200$  м/с;

В эксперименте был смоделирован процесс снижения прочностных характеристик в ближней зоне заобделочного пространства. Подобный процесс может быть обусловлен, например, процессом перераспределения естественного поля напряжений вокруг горной выработки, изменением физических свойств грунтов в результате увлажнения, суффозии, вибрации или других процессов. При этом скорости во вмещающих грунтах естественным образом изменяются. В процессе эксперимента были смоделированы несколько стадий этого процесса:

- 1) снижение скоростных характеристик слоя №2 на 10%;
- 2) снижение скоростных характеристик слоя №2 еще на 20%;

3) вовлечение в деформационные процессы более глубоких горизонтов путем увеличения мощности слоя №2 на 2 метра с сохранением его скоростных характеристик на уровне -30% от исходной модели. На основании эксперимента рассчитывались дисперсионные кривые для каждого состояния модели.

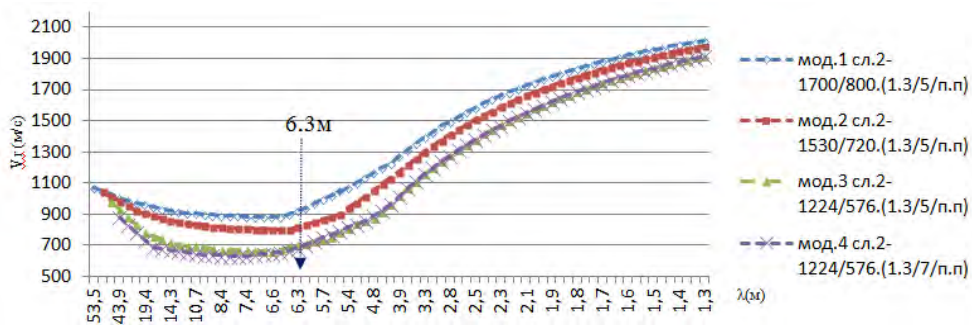


Рисунок 3.1.7 – Дисперсионные кривые для модели №1 (сохранное состояние слоя №2), модели №2 и №3 (динамика ослабления слоя №2), модели №4 (вовлечение в деформационный процесс слоя №3 - увеличение слоя №2 на 2 метра).

На рисунке 3.1.8 показаны отклонения траектории дисперсионных кривых для исходной модели №1 и уточненных моделей №2,3,4.

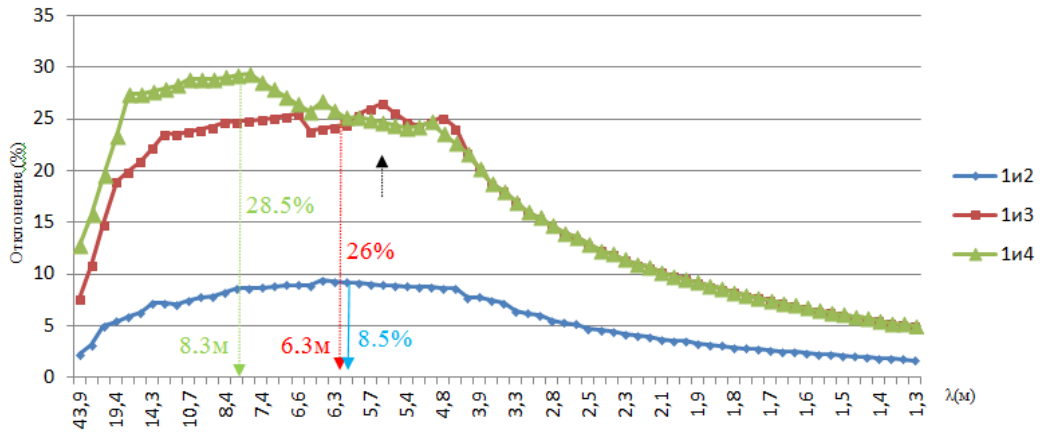


Рисунок 3.1.8 – Графики отклонений дисперсионных кривых характеризующих модели №2,3,4 от дисперсионной кривой исходной модели №1.

При анализе рассчитанных дисперсионных кривых и графиков отклонений дисперсионных кривых, представленных на рисунках 3.1.7-3.1.8, можно отметить следующее:

1) высокочастотная часть дисперсионных кривых (рис.3.1.7), которая характеризует маленькие длины волн, в отличие от разрезов с традиционным распределением скоростей, имеет тенденцию к увеличению. Это связано с тем, что дисперсионная кривая в высокочастотной области стремится к значениям  $V_r$  в верхнем слое. В данном случае верхний слой характеризуется высокими скоростями. Чем больше составляющая первого слоя в интервале, который охватывает псевдорэлеевская волна, тем выше средняя скорость поверхностной волны, которая характеризует этот интервал;

2) так как в слое бетона скорость не меняется, можно считать, что никакого дополнительного влияния на траекторию дисперсионной кривой железобетонная обделка оказывать во время эксперимента не будет. По этой причине дисперсионные кривые, представленные на рисунке 3.1.7, построены от отметки 1,3м.

3) на исходной дисперсионной кривой №1 кривых, характеризующих измененные модели №2 и №3, достаточно хорошо прослеживается смена слоя на  $\lambda=6,3$  метра и граница между слоями 2 и 3, в которой существенно изменяются скоростные характеристики.

4) при 10% изменении скоростных характеристик ( $V_p$  и  $V_s$ ) в слое №2 отмечается отклик дисперсионной кривой на  $\sim 8,5\%$  в пике, причем максимальные отклонения дисперсионной кривой прослеживаются на интервале кривой, который характеризует зону, близкую к подошве слоя, в котором произошли изменения  $\sim 6,3$  метра.

5) при последующем изменении скоростных характеристик еще на 20% (всего на 30% от исходных значений) отмечается  $\sim 26\%$  отклик дисперсионной кривой в пике. Также отмечается процесс расширения области кривой в длинноволновую область.

6) при увеличении мощности слоя №2 на 2 метра с сохранением скоростных характеристик в промежуточном слое 2 (30%<sup>-ое</sup> понижение от характеристик исходной модели) отмечается  $\sim 28,5\%$  отклик дисперсионной кривой в пике. При этом отмечается смещение пика в низкочастотную область кривой, которое соответствует 2 метрам. Именно на эту величину увеличилась мощность слоя №2 (рис.3.1.7).

Результаты анализа данных, полученных при математических расчетах дисперсионных кривых по заданным моделям, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) дисперсионная кривая, в достаточной для регистрации мере, реагирует на изменения скоростных характеристик в слоях, обладающих сравнительно небольшой мощностью, перекрытых другими слоями, в том числе и в составе разрезов с инверсным распределением скоростей (с понижением скоростей по глубине). Соотношения совокупного изменения скоростей  $V_p$  и  $V_s$  и изменения траектории дисперсионной кривой существенным образом разделились:
  - при работе с традиционным распределением скоростей (имитация работ на поверхности грунтового 3-хслойного массива) соотношение лежит в пределах  $1/2-1/3$ ;
  - при работе с инверсным разрезом (имитация работ через высокоскоростную железобетонную обделку горной выработки с вмещающим 2-хслойным горным массивом) соотношение лежит в пределах  $1/1-1/2$ .

2) по траектории дисперсионной кривой достаточно точно определяются границы раздела сред. При изменении положения границы между двумя слоями, например, вследствие эрозионных процессов, по данным мониторинговых наблюдений можно наблюдать смещение пика (у разностных кривых) в низкочастотную - длинноволновую область и более медленный и гладкий спад отклонения.

Таким образом, по характеру отклика дисперсионных кривых, используя для анализа "кривые отклонений", можно определить в какой области массива происходят изменения физико-механических свойств вмещающих грунтов и количественно оценить изменения скоростного режима[105].

### **3.3. Результаты программного моделирования**

Также для обоснования возможности применения многоканального дисперсионного анализа поверхностных волн при оценке устойчивости вмещающих массивов было проведено программное моделирование.

Эксперимент заключался в формировании сейсмо-геотехнической модели оползневого тела, наиболее часто встречающегося асеквентного типа. В процессе моделирования рассчитывались волновые поля, возникающие при различных состояниях структурных элементов модели, что непосредственно характеризовало состояние устойчивости оползневого массива. По методике MASW рассчитывались дисперсионные изображения получаемого волнового поля, на котором выделялись кривые поверхностных волн, по результатам которых, путем сравнения, регистрировались изменения их траекторий в зависимости от изменений характеристик структурных элементов модели.

Для оценки отклика дисперсионных кривых поверхностных волн на изменения, происходящие в оползневом массиве, в частности в слое по которому происходит смещение оползневого тела по поверхности сохранных пород, в результате увеличения растягивающих напряжений, была создана сейсмо-геотехническая модель оползневого массива асеквентного типа (рис. 3.2.1). Данный



тип оползней наиболее популярен и чаще всего встречается на территории нашей страны. В модели имитировались различные стадии оползневых деформаций. Структурные элементы модели были наиболее приближены к реальным условиям.

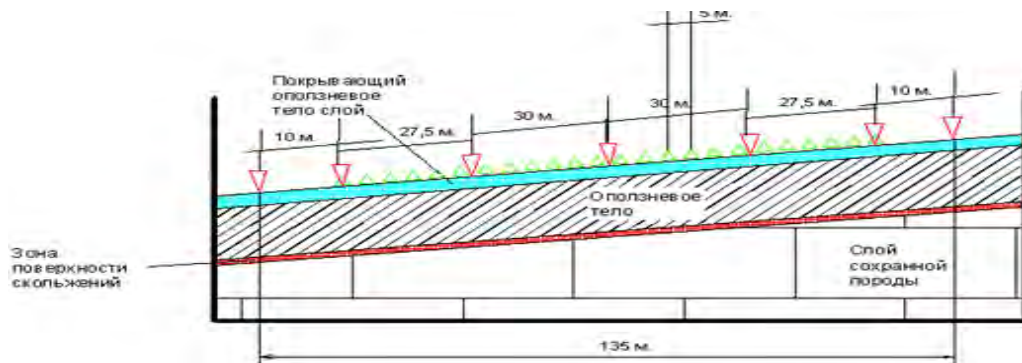


Рисунок 3.2.1 - Сейсмо-геотехническая модель оползня асеквентного типа.

#### Структурные элементы модели:

- 1) Почвенный покрывающий оползневое тело слой. Мощность слоя 1,5 м,  $V_p=300$  м/с,  $V_s=150$  м/с;
- 2) Оползневое тело. Мощность слоя 8 м,  $V_p=1400$  м/с,  $V_s=850$  м/с;
- 3) Сохранные породы. Мощность слоя - полупространство,  $V_p=3000$  м/с,  $V_s=1600$  м/с;

Коллеги из РАНМИИ (г. Донецк), согласились помочь в проведении программного моделирования синтезированных волновых полей, которые можно зарегистрировать на представленной выше модели при использовании методики MASW с применением ударного источника (кувалда).

В процессе программного моделирования регистрировались волновые поля при следующих изменениях в структурных элементах модели:

- 1) стабильное устойчивое состояние оползневого массива (нет зоны с повышенными касательными растягивающими напряжениями)- модель М1;
- 2) проявление зоны поверхности смещения в массиве в результате увеличения касательных растягивающих напряжений (в массиве появляется новый структурный элемент с пониженными скоростными характеристиками)- модель М2;
- 3) последующая динамика состояния зоны вмещающей поверхность смещения (последующее снижение скоростных характеристик слоя)- модель М3.

### 3.3.1. Описание программы моделирования волнового поля

Программа, с помощью которой осуществлялось моделирование, была разработана в УкрНИМИ в 90-х годах[98], при этом все это время успешно использовалась в практике и совершенствовалась. В настоящее время в РАНИМИ (г. Донецк) разработана и применяется новая версия этого программного продукта.

Процесс моделирования можно разделить на несколько групп[90]. С помощью первой группы реализовано построение модели среды, задается геометрия приемной линии. На основе принятой сейсмо-геотехнической модели рассчитывается физико-математическая модель.

Физико-математическая модель, в свою очередь, является основой для применения группы вычислительных процессов, в рамках которых производится расчет коэффициентов конечно-разностного представления и последующее моделирование распространения волнового поля. Анализ результатов позволяет получать характеристики всего волнового поля, и его отдельных структурных составляющих.

Программный блок создания модели позволяет на основе априорных данных о горно-геологических условиях строить соответствующую сейсмогеологическую модель, задавать геометрию расположения основных геологических структур, слагающих толщу массива пород, расположение различных типов геологических нарушений и неоднородностей[90].

В большинстве методов, моделирования процессов распространения сейсмоакустических колебаний, реализована двухмерная модель среды. Расчетная плоскость располагается перпендикулярно плоскости напластования (рис. 3.2.2). По этой причине при моделировании допускается, что свойства пород не меняются вдоль оси  $Y$ .

По этой причине в программе расположение геологических структур реализовано набором геометрических фигур в плоскости моделирования[90].

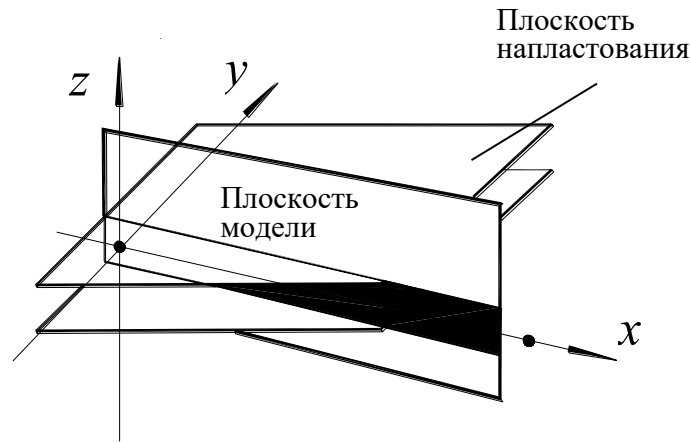


Рисунок 3.2.2 - Расположение расчетной плоскости относительно плоскости напластования.

Распространение колебаний можно описать уравнением движения упругой среды:

$$\rho u_i = \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  - плотность среды,  $u_i$  - ускорение её частиц,  $\sigma_{ik} = \lambda u_{ll} \delta_{ik} + 2\mu u_{ik}$  - тензор напряжения,  $u_{ik}$  - компоненты тензора смещения,  $\lambda$  и  $\mu$  - коэффициенты Ламе.

Физико-математическую модель можно получить после назначения параметров плотности и коэффициентов Ламе на всех структурных элементах модели. Учет влияния дополнительных факторов, влияющих на процесс распространения колебаний, реализован путем замены параметров  $\mu$  и  $\lambda$  на  $\mu_{эфф}$  и  $\lambda_{эфф}$ , где:

$$\mu_{эфф} = \mu + \Delta\mu; \quad \lambda_{эфф} = \lambda + \Delta\lambda. \quad (3.2)$$

Параметры  $\Delta\mu$  и  $\Delta\lambda$  рассматриваются в программе как слагаемые, учитывающие состояние массива и характеристик слагающих пород.

В реальности, информации о величинах  $\mu$  и  $\lambda$  нет. Поэтому при моделировании, как правило, используют величины  $V_s$  и  $V_p$ , которые связаны с коэффициентами Ламе следующими соотношениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.4)$$

,где  $\rho$ - плотность среды,  $\mu$  и  $\lambda$  - коэффициенты Ламе.

Также в программе реализована возможность изменения физико-механических параметров среды в рамках любой геометрической фигуры, определяющей геологическую структуру, это позволяет создавать модели наиболее приближенные к реальности[90].

Различные по форме и размеру выработки или любые пустоты задаются также различными геометрическими фигурами. В связи с тем, что колебаний в них не происходит, дополнительных параметров для расчетов не требуются.

Основная проблема в использовании конечно-разностных методов заключается в том, что границы элементов решетки зарождают «паразитическую» область решения, связанную с переотраженной от границ волной. Для решения этой проблемы связанной с подавлением этого эффекта интегрируются зоны поглощающие колебания у каждой границы решетки. При этом компоненты вектора перемещений представляются следующим образом[90]:

$$u = ue^{-\alpha_x t}, \quad v = ve^{-\alpha_y t}, \quad w = we^{-\alpha_z t} \quad (3.5)$$

где  $\alpha_i$  – коэффициенты затухания соответствующих компонент смещения во времени.

В тоже время предложенные зоны сами могут порождать отраженные волны, в связи с тем, что наличие затухания является неоднородностью. В связи с этим коэффициенты затухания задаются с градиентом на увеличение (от крайне малых величин во внутренней области, до максимальных значений у краёв решетки), или по линейному, или по квадратичному закону[99].

В конечном этапе создания модели, задаются размеры самой модели по узлам расчетной решетки, при этом в каждом узле задаются значения физико-механических параметров[90].

В процессе разработки модели, в том числе, задаются условия возбуждения сейсмических колебаний, что подразумевает расположение источника колебаний, направленность импульса (либо вдоль осей координат, либо в произвольном направлении), функцию источника, которая может быть задана последовательным набором гармоник полупериодов синусоидальных колебаний с определенной частотой и амплитудой, а также дискретизацию по времени. При этом параллельно вычисляются и отображаются спектральные характеристики источника (рис. 3.2.3). В качестве математического аппарата в программе реализовано быстрое преобразование Фурье (БПФ). Возможность коррекции в режиме реального времени формы, длительности и частоты исходного сигнала, позволяет пользователю получать функцию источника с необходимыми характеристиками. При этом, в автоматическом режиме, программа проверяет выполнение условия, чтобы каждая гармоника была описана не менее чем 10-15 дискретами по времени[90].

Следует отметить, что при заданном шаге дискретизации по времени, система автоматически проверяет выполнение необходимого условия устойчивости решения, которые имеют вид [100]:

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\min \{ \Delta x_{m,n}, \Delta z_{m,n} \}}{V_{S_{m,n}} \sqrt{2}} \right\} \quad (3.6)$$

,где  $V_{S_{m,n}}$  - скорость распространения сдвиговых волн для узла модели с “координатами”  $(m,n)$ .

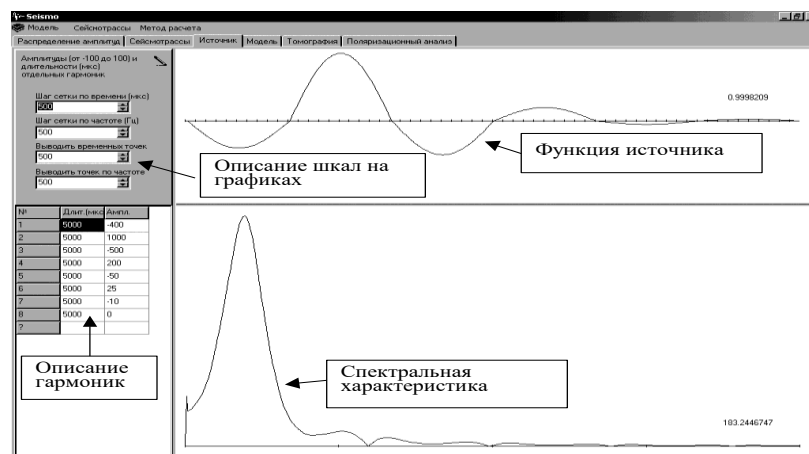


Рисунок 3.2.3 - Фрагмент работы модуля создания и оценки функции источника.

Система наблюдений представляет собой наборы сейсмоприёмников. Для каждого из наборов задаётся число сейсмоприёмников (до 96) и их расположение.

Одним из наиболее сложных вопросов при моделировании является учет затухания колебаний. Оно обусловлено целым рядом факторов [75], среди которых важнейшими являются расхождение фронта волны, рассеяние волны на неоднородностях, поглощение упругих волн и др. Затухание колебаний за счет расхождения фронта волны при использовании МКР учитывается автоматически. Рассеяние волны на неоднородностях может быть промоделировано в случае, если размер неоднородности сравним с шагом дискретизации модели. В то же время моделирование поглощения волн представляет собой чрезвычайно сложную задачу.

Колебательный процесс выражается в периодических сжатиях, растяжениях частиц среды и смещениях их относительно друг друга. Определенная доля энергии колебаний при этом расходуется. Характер и параметры этого процесса существенно зависят как от типа волны, так и от физико-механических свойств среды. Он описывается коэффициентом поглощения  $\beta$  и логарифмическим декрементом затухания  $\theta$ , которые связаны между собой соотношением [98]:

$$\theta = \beta \cdot L \quad (3.7)$$

, где  $L$  – длина волны. При расчете компонент смещений волнового поля в заданной точке неоднородной среды учесть поглощение аналитически в общем случае практически невозможно в результате того, что колебания достигают источника по-разному, проходя различное расстояние по разным породам, претерпевая отражения, преломления и трансформации на границах раздела сред. В итоге, в настоящее время доминирует упрощенный подход, рассматривающий величину  $\beta$  как интегральный показатель, зависящий от параметров среды, от размеров нарушенной области, от соотношения размеров нарушенной и ненарушенной зон. Учет интегрального поглощения имеет «оценочный» характер и производится с помощью фильтрации теоретических сейсмограмм. Зависимость  $\beta$  от пористости,

трещиноватости и величины горного давления подробно рассмотрена в ряде работ [78,98,102].

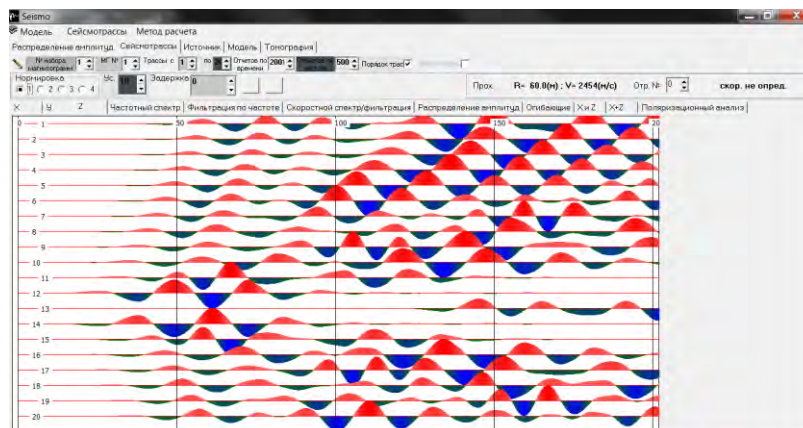


Рисунок 3.2.4 - Синтетическая сейсмограмма, как итог моделирования программой.

Итогом моделирования является синтетическая сейсмограмма, на которой выделяются необходимые типы волн. В нашем случае полезными волнами выступают, обладающие дисперсией, поверхностные волны (рисунок 3.2.4).

### 3.3.2. Результаты, полученные с помощью программы моделирования волнового поля

Исходная модель соответствовала изображенной на рисунке 3.2.1 сейсмо-геотехнической модели оползневого массива (асеквентного типа). Оползневое тело, имитируемое программной моделью, находилось в устойчивом состоянии, при этом никаких дестабилизирующих процессов в массиве не происходило.

#### Структурные элементы модели (M1):

- 1) Почвенный покрывающий оползневое тело слой. Мощность слоя 1,5м,  $V_p=300$  м/с,  $V_s=150$  м/с;
- 2) Тело оползня. Мощность слоя 8м,  $V_p=1400$  м/с,  $V_s=850$  м/с;
- 3) Сохранные породы. Мощность слоя - полупространство,  $V_p=3000$  м/с,  $V_s=1600$  м/с;

В процессе программного моделирования были рассчитаны сейсмограммы (рис. 3.2.5), зарегистрированные 48-ми канальной расстановкой с шагом между

сейсмоприемниками 2 метра, с фланговой системой возбуждения с выносом источника на 10 метров. Параметры источника соответствовали ударам кувалды.

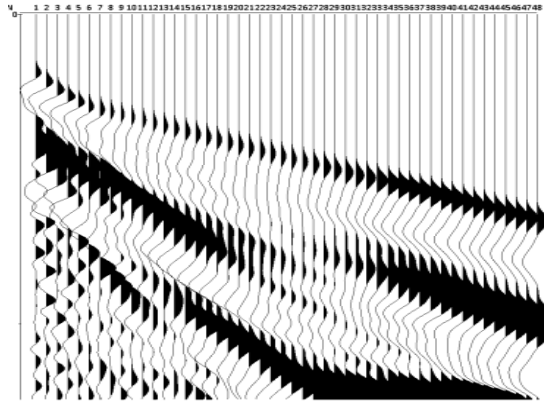


Рисунок 3.2.5 – Синтетическая сейсмограмма, рассчитанная для модели M1.

С помощью пакета многоканального анализа поверхностных волн (MASW), который входит в состав программы RadexPro Professional 2016, рассчитывались дисперсионные изображения синтезированных волновых полей. На дисперсионном изображении можно проследить фундаментальную моду поверхностных волн рэлеевского типа и слабо выделяемые высшие моды (рис. 3.2.6).

Для дисперсионного анализа достаточно иметь фундаментальную моду, которая характеризует весь разрез [87]. Поэтому для увеличения точности пикирования сузим окно дисперсионного изображения по оси  $F$  (Гц) в пределах 0-125 Гц, а по оси  $V_{\text{фаз}}$  в пределах 0-1550 м/с. (рис.3.2.7).

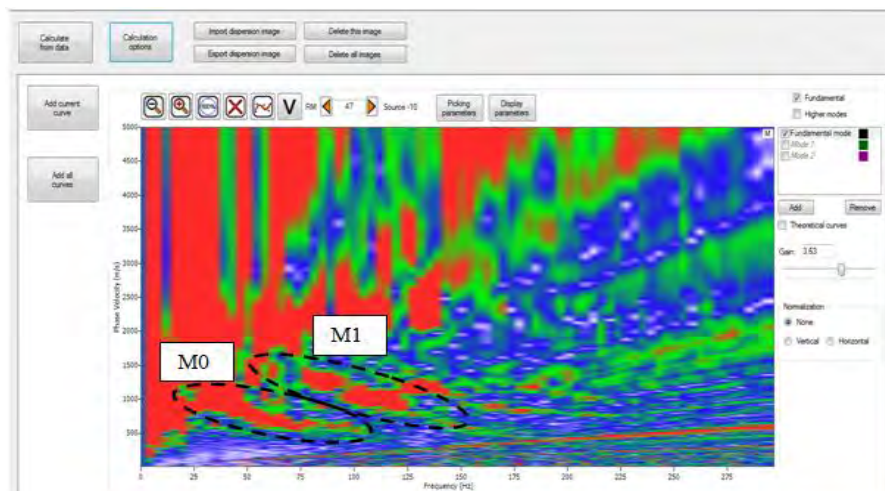


Рисунок 3.2.6 – Дисперсионное изображение, рассчитанное по модели M1.



Прокировав фундаментальную моду с помощью инструментов программы, мы получаем дисперсионную кривую фундаментальной моды поверхностной волны (рис. 3.2.7).

Следующие этапы моделирования были основаны на известных положениях, доказанных ранее такими исследователями, как Огильви А.А., Горяинов Н.Н., Боголюбов А.Н., Никитин В.Н., Борщ-Компаниец и др.[7-9,11,16,18,22].

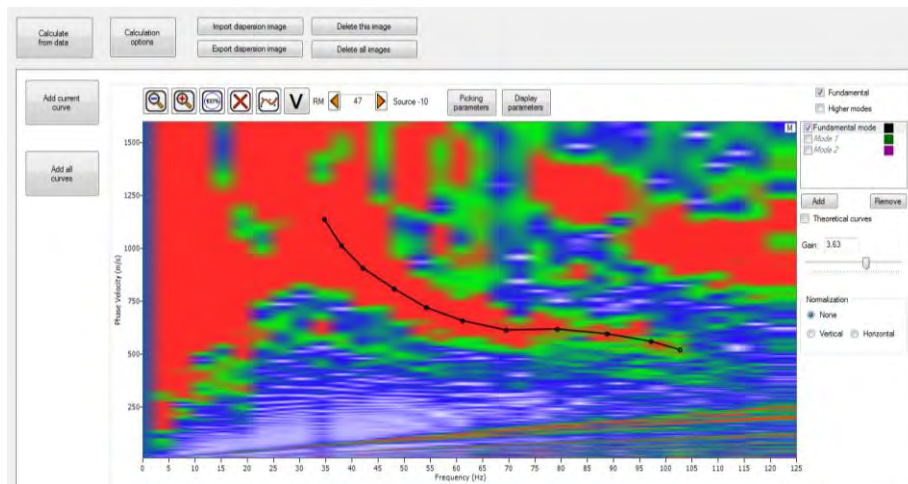


Рисунок 3.2.7 – Дисперсионное изображение в окне:  $f=(0-125\text{Гц})$ ;  $V_{\text{фаз}}=(0-1550\text{м/с})$ . Дисперсионная кривая поверхностной волны (модель оползня М1).

В работах перечисленных авторов отмечено, что процессы, возникающие в оползне, следует рассматривать, прежде всего, как механическое явление, как противоборство сил, с одной стороны, стремящихся привести оползневые массы в движение, а с другой - препятствующих этому. На рисунке 3.2.8 представлена схема баланса удерживающих и сдвигающих сил.

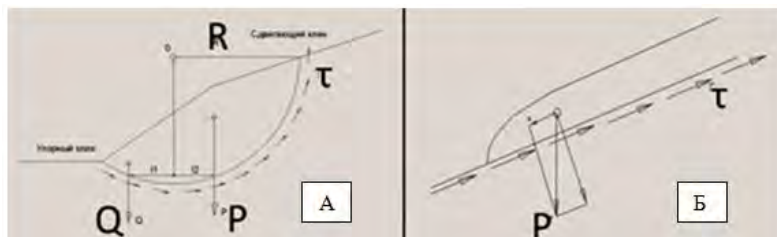


Рисунок 3.2.8 - Схема баланса оползневой массы с поверхностью смещения.

Для случая А: в перечень удерживающих сил входят вес упорного клина Q и сопротивление сдвигу по поверхности скольжения  $\sum\tau$ . Сдвигающей силой является вес сдвигающего клина P.

Условие устойчивости склона, выраженное уравнением моментов относительно центра вращения  $O$ , имеет вид:

$$QL_1 + R \sum \tau > PL_2; \quad (3.8)$$

Для случая Б: упорный клин, а следовательно, и сила  $Q$  отсутствует. Условие устойчивости в виде суммы проекций сил на плоскость будет:

$$\sum \tau > P \sin \alpha; \quad (3.9)$$

При этом сопротивление грунта сдвигу, как известно, выражается зависимостью:

$$\tau = (\delta - u) \operatorname{tg} \varphi + C; \quad (3.10),$$

где  $u$  - поровое давление;  $\varphi$  - угол внутреннего трения;  $C$  - сцепление.

Уравнения (3.8-3.10) отражают основные причины оползней.

Проанализировав предложенные уравнения, можно отметить, что нарушение устойчивости оползневого массива может произойти в результате трех причин: уменьшения удерживающих сил; увеличения сдвигающих сил; и при одновременном уменьшении удерживающих и увеличении сдвигающих сил. При этом сам механизм смещения оползневого тела по поверхности скольжения нельзя рассматривать отдельно от процесса формирования самой этой поверхности. В ходе развития деформации происходит постепенное увеличение растягивающих касательных напряжений в пределах этой зоны скольжения. Действующие напряжения являются одной из основных причин образования вторичной текстуры пород с выраженной трещиноватостью [96,103,104].

Процесс увеличения как микро, так и макро трещиноватости пород, существенно снижает показатели физико-механических свойств последних. При этом эти процессы естественным образом отражаются на таких параметрах, как:  $E_d$  - динамический модуль упругости;  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $G_d$  - динамический модуль сдвига и пр. Нетрудно заметить, что все эти параметры динамические и

зависят главным образом от скоростей распространения продольных и поперечных волн.

$$E_d = \frac{\delta V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} ; \quad (2.11)$$

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} ; \quad (2.12)$$

$$G_d = \delta V_s^2 ; \quad (2.13),$$

где  $V_p$ - скорость распространения продольной волны;  $V_s$ - скорость распространения поперечной волны;  $\delta$  – плотность.

Очевидно, что скорости распространения объемных волн в среде, в которой будут происходить изменения физико-механических свойств, будут меняться.

При увеличении растягивающих напряжений в среде увеличивается трещиноватость, структурные связи породы нарушаются, что приводит к неминуемому снижению скоростей упругих волн.

О снижении скоростей в области поверхности скольжения писал еще А.А. Огильви в учебнике «Основы инженерной геофизики» 1990г. В учебнике автор привел физико-геологические модели оползневых массивов (ФГМ), в которых отметил, что важнейшей особенностью ФГМ оползневого массива является наличие поверхности (зоны) скольжения. Именно в этой зоне естественная структура породы претерпевает наибольшее изменение. Нарушаются присущие ей связи, изменяются ее минералогический состав, повышается количество и минерализация поровой влаги. Эти изменения находят отражение во всех петрофизических параметрах и, в частности, в понижении скоростных характеристик. Отчетливо проявляются в этой зоне уменьшение скоростей продольных волн и скоростей поперечных волн и возрастание коэффициентов их поглощения (рис.3.2.10). Каждая последующая подвижка все в большей и большей степени изменяет свойства и состояние грунтов в зоне скольжения и соответственно приводит к нарушению сейсмических параметров. При этом возникают условия, благоприятствующие развитию среды с диффузным, постепенным изменением физических свойств среды [16].

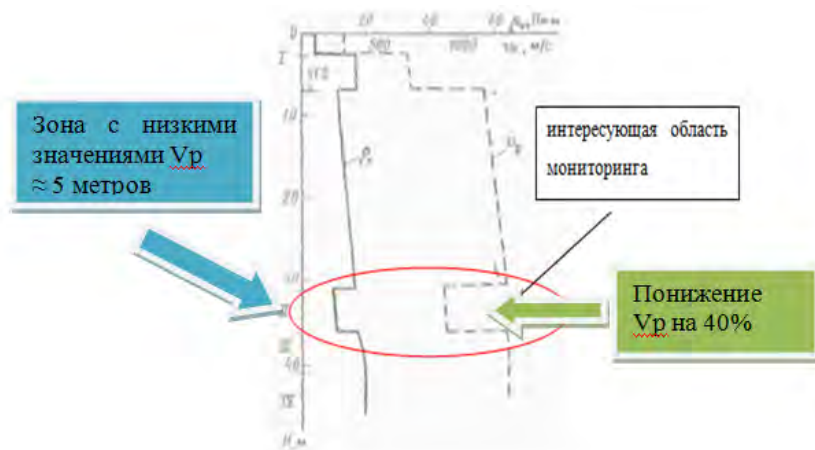


Рисунок 3.2.10 – Синтетические графики  $\rho_k$  и  $V_p$  в толще оползневого массива (Огильви А.А.).

На представленном рисунке I -почвенный интенсивно выветрелый слой; II - зона скольжения; III - резервная зона; IV - порода в коренном залегании.

Результаты вышеизложенного подтверждают, что при развитии оползневых деформаций в массиве в первую очередь будут меняться сейсмические характеристики именно в зоне соответствующей поверхности скольжения с захватом резервной зоны (по Огильви А.А.) и частично подошвы оползневого тела.

Поэтому вторая модель была основана на особенностях развития зоны скольжения, описанных выше.

Модель (M2)

Структурные элементы модели (M2):

- 1) Почвенный покрывающий оползневое тело слой. Мощность слоя 1,5м,  $V_p=300$  м/с,  $V_s=150$  м/с;
- 2) Тело оползня. Мощность слоя 8м,  $V_p=1400$  м/с,  $V_s=850$  м/с;
- 3) Образовавшийся слой в результате появления растягивающих касательных напряжений на поверхности скольжения. Мощность слоя 2 метра,  $V_p$  снизились на 10% до 1260 м/с,  $V_s$  снизились на 10% до 760 м/с.
- 4) Сохранные породы. Мощность слоя - полупространство,  $V_p=3000$  м/с,  $V_s=1600$  м/с;

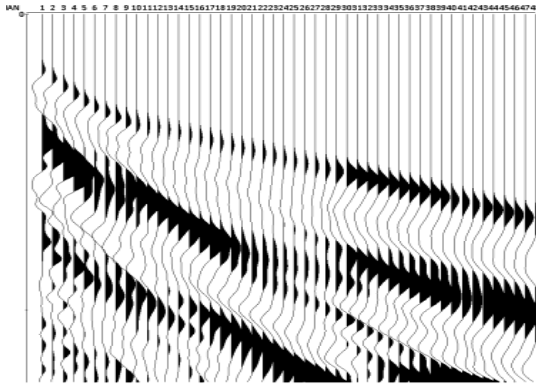


Рисунок 3.2.11 – Сейсмограмма, рассчитанная для модели M2.

Далее аналогично первой модели, по данным сейсмограммы модели M2 было рассчитано дисперсионное изображение (рис. 3.2.12).

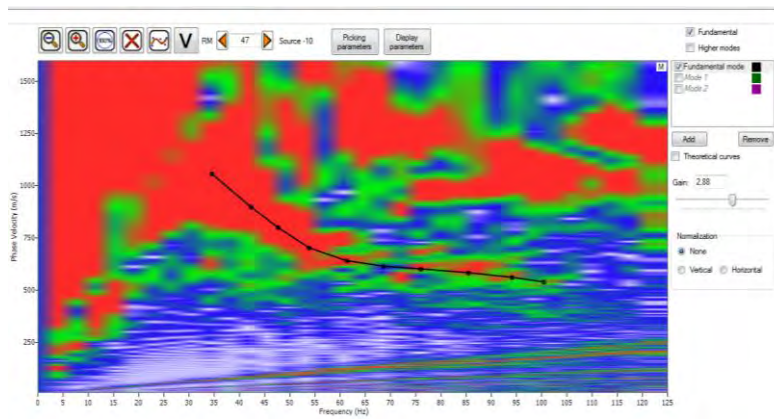


Рисунок 3.2.12 – Дисперсионное изображение в окне:  $f=(0-125\text{Гц})$ ;  $V_{\text{фаз}}=(0-1550\text{м/с})$ . Дисперсионная кривая поверхностной волны (модель оползня M2).

На дисперсионном изображении пропикирована кривая, относящаяся к поверхностным волнам. При различных усилениях изображения с помощью функции "Gain" появляется возможность выделить кривую как в высокочастотной области (при сильном усилении изображения), при этом в низкочастотной области кривая сильно размывается. Поэтому целесообразно сначала пропикировать на сильном усилении высокочастотную область кривой, а потом значительно понизить усиление и пропикировать низкочастотную область кривой. В этом случае пропикированная кривая будет максимально приближена к реальным частотно-скоростным характеристикам поверхностной волны.

Также для оценки правильности пикирования в программе предусмотрен второй метод расчета дисперсионного изображения, который реализуется параллельно первому, поэтому всегда можно оценить правильность выбранной траектории кривой. Второй метод основан на стандартном расчете в области частота-волновое число (F-K). Пример окна второго метода расчета показан на рисунке 3.2.13.

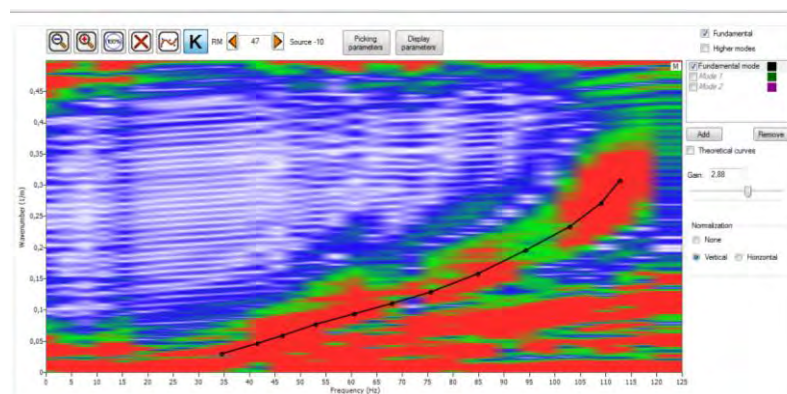


Рисунок 3.2.13 – Дисперсионное изображение в окне:  $f=(0-125\text{Гц})$ ;  $V_{\text{фаз}}=(0-1550\text{м/с})$ . Расчет дисперсионного изображения в области (F-K) (модель оползня М2).

При развитии оползневой процесс в массиве продолжают изменения напряженного состояния. Наиболее сильные изменения физико-механических свойств происходят в области поверхности смещения, помимо этого область смещения увеличивается в размерах. Увеличение мощности происходит как за счет вовлечения в процесс образования трещиноватости пород оползневой тела под воздействием растягивающих напряжений, так и пород, слагающих ближнюю к поверхности смещения зону условно сохранных пород или пород «резервной зоны», о которой упоминал в своих работах А.А. Огильви [16]. Поэтому была рассчитана модель 3, которая отображала динамику деформаций в массиве.

Модель (М3)

Структурные элементы модели (М3):

- 1) Почвенный покрывающий оползневое тело слой. Мощность слоя 1,5м,  $V_p=300\text{ м/с}$ ,  $V_s=150\text{ м/с}$ ;
- 2) Тело оползня. Мощность слоя 8м,  $V_p=1400\text{ м/с}$ ,  $V_s=850\text{ м/с}$ ;



3) Образовавшийся слой в результате появления растягивающих касательных напряжений на поверхности скольжения. Мощность слоя 2 метра,  $V_p$  снизились на 10% по отношению к модели M1 до значений 1260 м/с,  $V_s$  снизились на 20% по отношению к модели M1 до значений 680 м/с.

4) Сохранные породы. Мощность слоя - полупространство,  $V_p=3000$  м/с,  $V_s=1600$  м/с;

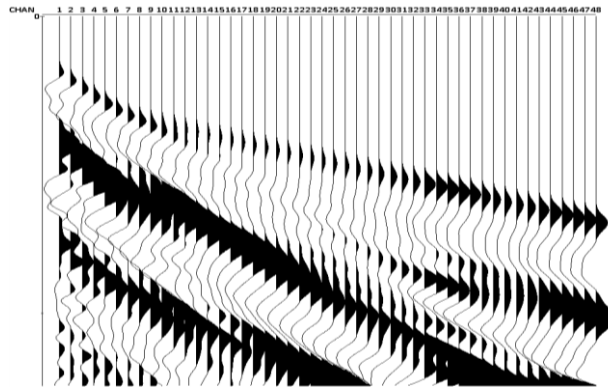


Рисунок 3.2.14 – Сейсмограмма, рассчитанная для модели M3.

Далее аналогично первой и второй модели по данным сейсмограммы модели M3 было рассчитано дисперсионное изображение (рис. 3.2.15).

Проанализировав полученные дисперсионные изображения (3.2.8, 3.2.12, 3.2.15) для различных сценариев, можно отметить, что дисперсионные кривые реагируют на изменения, происходящие в модели, а именно в слое сместителе.

Для того чтобы количественно оценить эти изменения был произведен анализ отклика дисперсионных кривых (рис. 3.2.16-3.2.17) на изменения, происходящие в массиве.

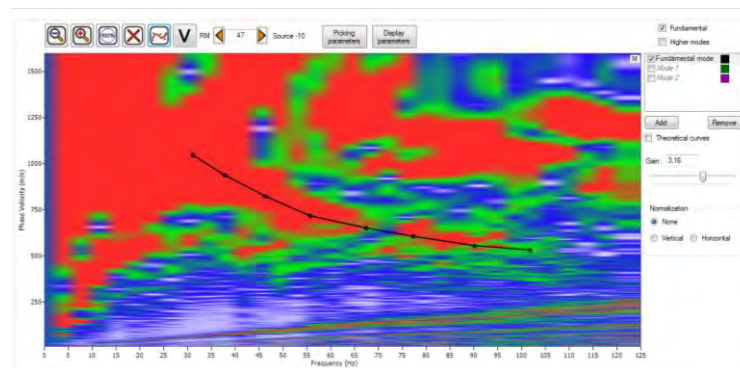


Рисунок 3.2.15 – Дисперсионное изображение в окне:  $f=(0-125\text{Гц})$ ;  $V_{\text{фаз}}=(0-1550\text{м/с})$ . Дисперсионная кривая поверхностной волны (модель оползня M3)

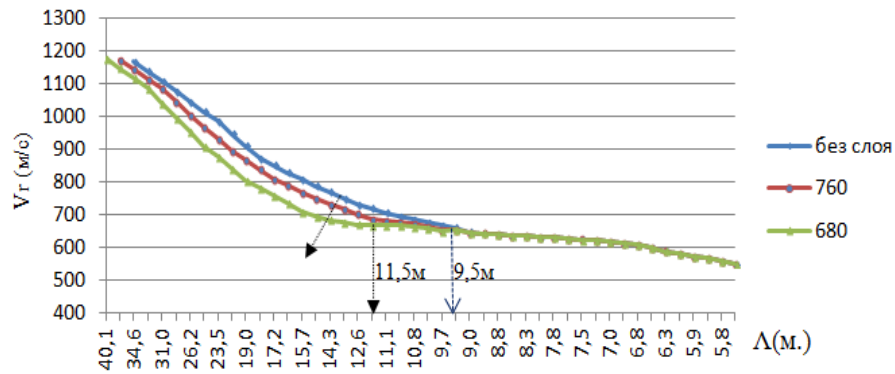


Рисунок 3.2.16 – Дисперсионные кривые, рассчитанные: для модели без слоя поверхности смещения ( $V_s$  слоя = 850 м/с); для модели со слоем, который характеризуется  $V_s=760$  м/с; для модели со слоем, который характеризуется  $V_s=680$  м/с.

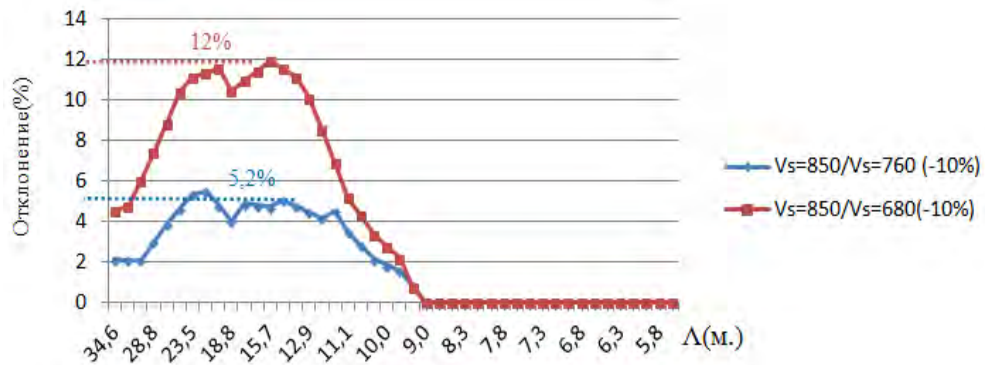


Рисунок 3.2.17 – Отклонение дисперсионных кривых (кривые отклонения) для моделей со слоем смещения относительно исходной модели без слоя сместителя. Характеристики слоя:  $V_s=760$  м/с и  $V_s=680$  м/с.

1) при появлении в модели слоя в результате действия растягивающих касательных напряжений на поверхности скольжения с пониженными скоростными характеристиками, отличающимися на 10% от первоначальных, до  $V_p=1260$  м/с,  $V_s=760$  м/с, смещение дисперсионной кривой составило 5,2% в пике, при этом пиковые значения отклонений приходятся на область близкой интервалу подошвы слоя в котором изменялись скоростные характеристики;

2) при последующем уменьшении значений скоростных характеристик в образовавшемся слое еще на 10% (а в сумме на 20% от характеристик от исходной модели) до значений  $V_p=1224$  м/с,  $V_s=680$  м/с смещения дисперсионной кривой составили 12% от первоначального положения дисперсионной кривой,



характеризующей модель без слоя сместителя. Стоит отметить, что график изменения траектории кривой по форме практически повторяет график для 10%-го изменения. Основные изменения происходят лишь в величине смещения дисперсионных кривых от исходной модели.

Таким образом, соотношение совместного изменения скоростей  $V_p$  и  $V_s$  и изменения траектории дисперсионной кривой находится в области  $\sim 1/2$  для разрезов с традиционным распределением скоростей с глубиной.

### **3.4. Основные выводы по результатам моделирования**

Результаты расчетного и программного моделирования доказали принципиальную возможность использования дисперсионных параметров поверхностных волн для оценки геодинамического состояния массива горных пород. Причем как при работах с разрезами, характеризующимися традиционным распределением скоростей, так и с инверсным, когда массив перекрыт высокоскоростным слоем.

Дисперсионные параметры дисперсионной кривой реагируют на изменения в слоях, обладающих как сравнительно небольшой мощностью, так и перекрытых другими слоями.

В процессе разработки метода была отмечена важная деталь: сравнивать дисперсионные кривые в виде традиционного их представления (фазовая скорость  $V_r$ (м/с) - частота  $f$ (Гц)) неправильно. В основе этого утверждения лежит известная зависимость  $\lambda = V_r/f$ . Очевидно, что при изменении любого параметра правее знака равенства неминуемо приведет к изменению длины волны  $\lambda$ . По этой причине оценивать динамику изменений скоростного режима в определенном слое затруднительно. Вследствие этого автором было предложено в сравниваемых дисперсионных кривых использовать фиксированный параметр  $\lambda$ .

По траектории дисперсионной кривой достаточно точно определяются границы структурных элементов модели. При изменении положения границ между слоями наблюдаются смещения пиков, что особенно хорошо отображается на

предложенных автором "кривых отклонений" либо в низкочастотную - длинноволновую область, либо в высокочастотную - коротковолновую область. При изменении скоростных характеристик в структурном элементе модели достаточно эффективно обнаруживаются отклонения дисперсионных кривых, причем возможна идентификация области, в которой произошли эти изменения.

Выявленные закономерности также показали, что в случае регистрации поверхностных волн на разрезе с традиционным распределением скоростей, соотношение изменений скоростных характеристик  $V_s, V_p$  и отклика дисперсионной кривой поверхностных волн рэлеевского типа находятся в диапазоне  $\sim 1/2 - 1/3$ . При этом при регистрации волн через высокоскоростную слой тоже соотношение находится в диапазоне  $1/1 - 1/2$ .

Максимальные отклонения дисперсионной кривой наблюдаются в области, характеризующей подошву слоя, в котором произошли изменения.

Результаты проведенного моделирования показали, что по характеру отклика дисперсионных кривых, используя для анализа инструмент "кривые отклонений", достаточно эффективно определяются структурные элементы модели, в которых происходят как изменения скоростных характеристик, так и изменения, связанные с мощностью структурных элементов. По этой причине можно полагать, что с помощью предложенной методики дисперсионного анализа поверхностных волн можно определять динамику изменений скоростных характеристик массива, а так как скорости зависят от физико-механических характеристик, определять динамику изменений состояния устойчивости массива в целом.

#### **IV. Контроль геомеханических процессов в массиве по данным дисперсионного анализа поверхностных волн**

Для оценки возможностей метода дисперсионного анализа поверхностных волн при решении инженерных задач по определению состояния устойчивости горных массивов были проведены экспериментальные исследования в различных условиях: на оползневых склонах и внутри горной выработки. При этом геология объектов исследования была достаточно хорошо изучена, а также совместно с проводимыми экспериментами осуществлялся контроль другими методами, в том числе прямыми способами контроля смещений, что позволило контролировать достоверность и качество получаемых результатов.

#### **4.1. Результаты мониторинговых экспериментов, полученные на оползневых склонах**

##### **4.1.1. Оценка устойчивости оползневого массива на участке 8бис п. Хоста**

Экспериментальные мониторинговые работы выполнялись на оползневом склоне, который находился в поселке Хоста. Оползневые процессы в пределах исследуемой территории имеют очень широкое развитие. Исследуемый оползневый массив вмещал в себя железнодорожный тоннель (рис. 4.1.1). В рамках проекта реконструкции действующего транспортного тоннеля и проходки нового, параллельно строительству, проводился мониторинг состояния оползневого склона.



Рисунок 4.1.1 – фотография объекта мониторинга.

Исследуемый оползневый массив находился под влиянием многочисленных дестабилизирующих условий, например: вибрационное воздействие строительной техники, перераспределение напряжений в массиве в результате рекультивационной строительной деятельности, близости действующего железнодорожного полотна.

В геологическом строении участка исследований принимают участие отложения палеогеновой системы, представленные Сочинской и Мысовидненской свитами олигоцена.

Сочинская свита (P3sc). Аргиллиты серого цвета с редкими тонкими прослоями алевролитов и песчаников мощностью 2-5см, редко до 15 см.

Мысовидненская свита (P3mv). Согласно залегает на сочинской свите. Сложена рыхлыми песчаниками с прослоями глин и линзами конгломератов. Мощность свиты 160м (из объяснительной записки к Государственной геологической карте РФ масштаба 1:200000).

Породы мысовидненской свиты встречены в мысовой части у действующего тоннеля. По данным проведенных изысканий ООО «Поиск», породы свиты встречены в виде «многочисленных фрагментов мощных пластов песчаника кварцевого, мелкозернистого, серого и светло-серого цвета, смещающихся вниз по склону по поверхности напластования». Скорее всего, данные отложения были перемещены в район тоннеля древними оползневыми процессами.

Аргиллиты Сочинской свиты легко поддаются воздействию атмосферных агентов выветривания и, постепенно переходя в суглинисто-глинистую массу, создают благоприятные условия для развития на склонах мощного делювиально-элювиального покрова, подверженного оползневым и гравитационным процессам (осыпи, обвалы).

Четвертичные отложения (tlV). Насыпной грунт представлен отсортированным и не отсортированным дресвяно-щебнистым или щебнесто-глыбовым материалом с песчано-глинистым заполнителем и без заполнителя, разной плотности в зависимости от времени отсыпки. Мощность пород достигает 2.0-2.4м.

Четвертичные делювиально-оползневые отложения (d-dpIV). Глина коричневатато-серая, твердая, с включениями дресвы и щебня осадочных пород очень низкой прочности (аргиллиты, алевролиты) до 30%. Вскрытая мощность слоя 0,5-10,0м.

Четвертичные делювиально-пролювиальные отложения (dpIV). Суглинок коричневатато-серого цвета, твердый, тяжелый, пылеватый, с включением дресвы и щебня песчаника и аргиллита до 10%. Вскрытая мощность слоя 1.0-9.5м.

Четвертичные элювиальные отложения (eIII-IV). Песчаник светло-серого цвета низкой прочности, интенсивно выветрелый до дресвяно-щебенистого материала. Вскрытая мощность слоя 2,2-7,0м.

Участок характеризуется выдержанностью элементов залегания коренных пород. Азимут падения пластов коренных пород изменяется от  $190^\circ$  до  $200^\circ$ , угол падения от  $25^\circ$  до  $40^\circ$ . Залегание пластов коренных пород - согласно падению поверхности склона (консеквентное) и наличие тектонической трещиноватости определяют формирование блоково-пластовых оползней сдвига.

Именно эти особенности юго-юго-западного склона горы Видной в течение всей истории развития Черноморского бассейна на разных уровнях его состояния, приводили к формированию мощных блоково-пластовых оползней. Большое воздействие на их активизацию оказывала сейсмичность региона, которая предопределила современный геоморфологический облик и геолого-литологическое строение территории.

На участке исследования выделяются следующие типы подземных вод: трещинно-пластовые воды элювиальной зоны и коренных отложений, грунтовые воды делювиально-оползневых масс.

На территории исследований развиты такие виды геологических и инженерно-геологических процессов, как эрозия, абразия, оползневые деформации противооползневых и гидротехнических сооружений. В связи с тем, что участок работ расположен на поверхности водораздельного склона с уклоном поверхности около 30%, исследуемая территория повреждена плоскостной эрозией, связанной с деятельностью поверхностных вод в периоды атмосферных осадков. Площадная

пораженность территории эрозийными процессами составляет более 50% и относится к весьма опасной категории опасности (СНиП 22-01095, приложение Б)[106].

В составе природных факторов, определяющих формирование оползней сдвига, основными являются залегание пластов коренных пород согласно падению поверхности склона (консеквентное) и наличие тектонической трещиноватости. В таких условиях техногенный фактор (глубокие подрезки склонов без предварительного их закрепления) провоцирует очаговую активизацию оползневых процессов, как в пределах контуров древних оползневых смещений, так и на участках ранее не захваченных оползневой смещением[107]. Примером такого сценария событий служит техногенный блоковый оползень сдвига, сошедший в конце мая 2010г на участке строительства припортальной выемки восточного портала тоннеля.

В процессе инженерно-геологического обследования территории выявлены 4 очага развития оползневых процессов, которые могут повлиять на безопасность строительства и эксплуатации пути тоннеля. Их контуры и номера вынесены на карту (рис 4.1.2). Особый интерес вызывает оползневой участок №4. Именно на этом участке в период мониторинговых исследований были зарегистрированы оползневые деформации, сопровождающиеся подвижками склона.

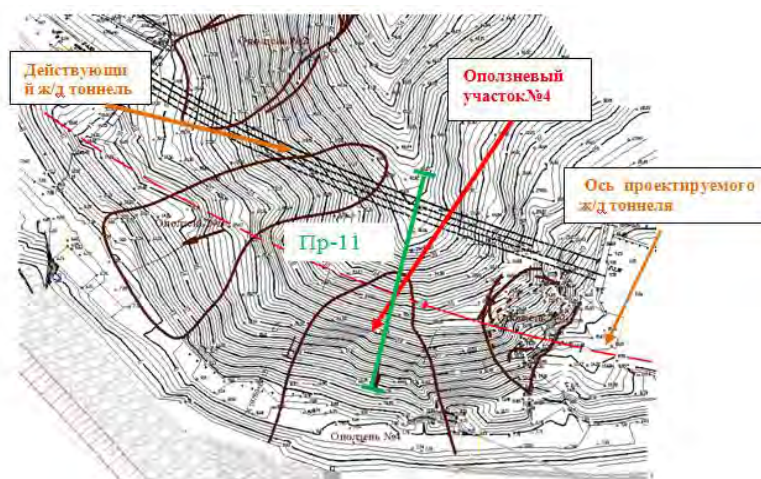


Рисунок 4.1.2 – Схема производства геофизических работ.

На участке №4 оползневой смещением захвачены как делювиальные суглинисто-щебенистые грунты - поверхностные склоновые отложения, так и

фрагменты мощных пластов песчаника кварцевого темно-серого цвета Сочинской свиты. Оползневый контур расположен на фронтальной части абразионно-оползневого склона в поверхности гребня, в его нижней части. Вдоль подножья оползневого склона насыпью проложена временная технологическая автомобильная дорога. Падение оползневой поверхности строго соответствует падению пластов коренных пород массива: Азимут падения  $190^\circ \perp 30^\circ$ . Высотные отметки оползневой поверхности находятся в интервале 5,0-35,0м. В соответствии с СП 11-105-97[108] ч.П т.4.1 оползень относится к консеквентным оползням сдвига (рис. 4.1.3). Длина оползня 50метров. Средняя ширина оползня 35 метров (в головной части 15м, к языковой части постепенно увеличивается до 45м). Площадь контура  $1750\text{м}^2$ . Предполагаемая средняя мощность захвата оползневым смещением блоков и пластов коренных пород предположительно достигает 6,7-11 м. Предполагаемый расчетный объем смещенных пород составляет  $7875\text{м}^3$ . Уступ головной стенки отрыва высотой до 6 метров, крутизной в верхней части  $55^\circ$ , ниже  $45^\circ$ . В уступе обнажены песчаные и супесчаные грунты с включением редких глыб сильно выветрелых песчаников Мысовидненской свиты.

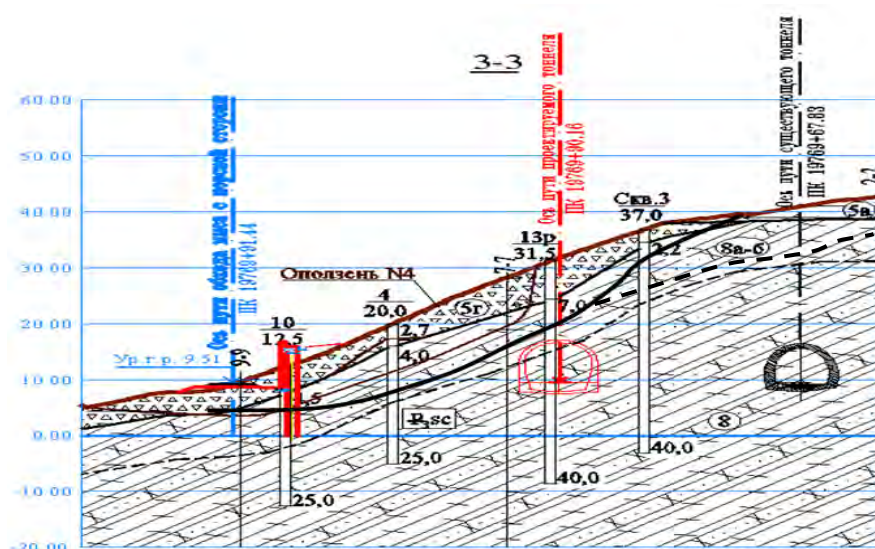


Рисунок 4.1.3 – Поперечный геологический профиль через оползневый участок №4.

Причиной формирования оползня послужил техногенный фактор-строительство волноотбойной стены у подножья абразионного уступа, при котором производилась глубокая подрезка склона.

В соответствии с СП 11-105-97 п.4.4.11 на кафедре СПбГУ и в отделе ПГ ЛМГТ производилась оценка и прогноз устойчивости склона, в том числе и участка №4. В расчетах устойчивости применялись методы, основанные на том, что предельное напряженное состояние в откосе удовлетворяется по внутренней наиболее напряженной поверхности.

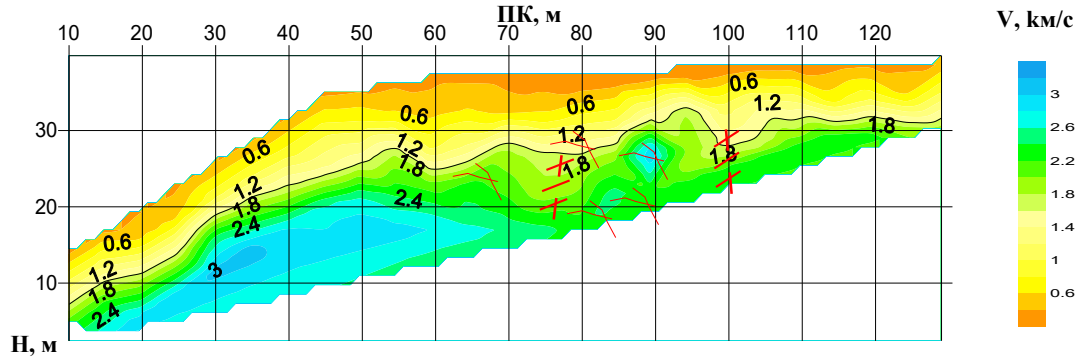
В результате проведенных расчетов устойчивости оползневого участка №4 (ФМС по данным изысканий и «обратных» расчетов) было получено, что коэффициент устойчивости  $K_u = 0,73$ , а с учетом сейсмики составил 0,6. Что говорит о высокой вероятности активизации оползневых смещений на данном участке.

Среди комплекса геофизических методов, используемых для оценки состояния устойчивости склона, был задействован метод сейсморазведки в модификации МПВ. Мониторинговые измерения производились с дискретностью раз в квартал по сети закрепленных на местности измерительных геофизических профилей. Измерения производились в период времени с 05.2010 по 08.2012. Результатом сейсмических исследований являлись сейсмотомографические разрезы волн продольного и поперечного типа (рис. 4.1.4), на основании которых рассчитывались динамические упругие характеристики слагающих грунтов. Одним из таких параметров является динамический модуль упругости –  $E_d$  (4.1).

По данным геологии и результатам сейсмотомографических исследований, исследуемый массив условно был разделен на три слоя, которые определяли его структурные особенности. Так, значения модуля Юнга вычислялись для каждого выделенного слоя, после чего строился график изменения модуля упругости во времени (рис. 4.1.5). Такое представление модуля Юнга по слоям имело практическую значимость.



Хоста, ж/д тоннель №8, ПР - 11(сентябрь 2011 г.), (Vp)



Хоста, ж/д тоннель №8, ПР-11(Сентябрь 2011 г.), (Vs)

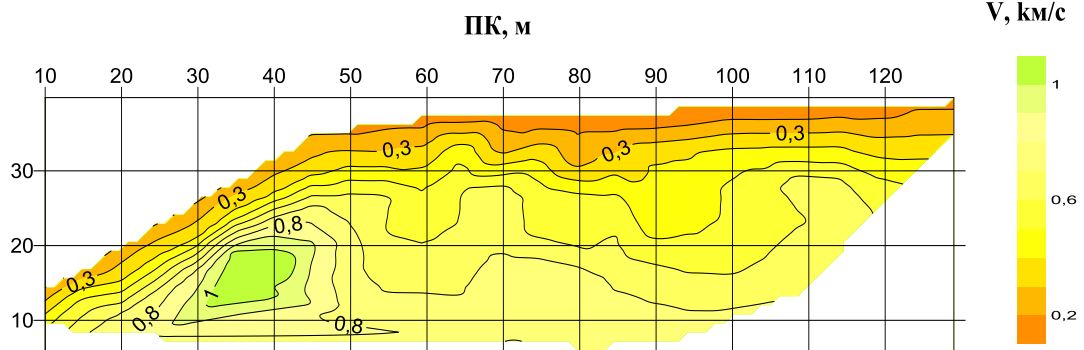


Рисунок 4.1.4 – Пример сейсмотомографических разрезов Vp и Vs волн на объекте исследования.

$$E_0 = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}; \quad (4.1)$$

где Vp, Vs- скорости продольных и поперечных волн; ρ- плотность.

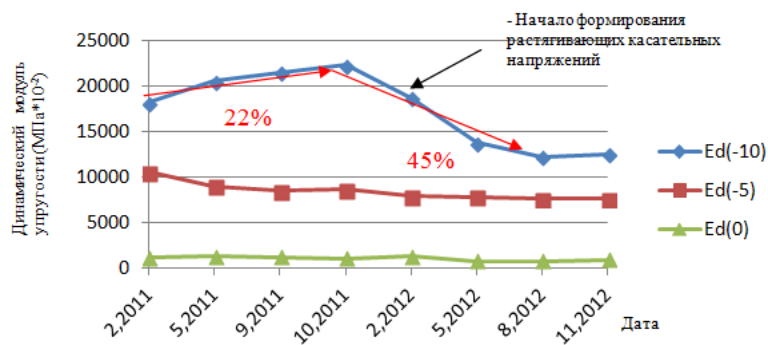


Рисунок 4.1.5 – График изменения значений модуля Юнга во времени, характеризующих разные уровне в массиве.

Как уже упоминалось в главе 3.3.2, оползневый механизм связан с формированием поверхности смещения. По этой причине в зоне, вмещающей формирующуюся поверхность и резервную зону, должны происходить более

значительные изменения физико-механических характеристик грунтов нежели в других частях массива. Таким образом, массив сейсмических данных условно был разделен на 3 слоя (рис. 4.1.5), что позволило рассматривать выбранные интервалы раздельно друг от друга, это помогло более точно определить динамику изменения состояния пород и точнее идентифицировать интервал глубин, на котором эти изменения максимальны.

Таким образом, был выделен:

- слой, характеризующий верхнюю приповерхностную часть массива;
- слой, характеризующий оползневое тело;
- слой, характеризующий зону, которая вмещает потенциальную поверхность смещения и "резервную зону" (по Огильви А.А.)

В результате анализа динамики изменений  $E_d$  по каждому выделенному слою было отмечено, что в приповерхностной зоне и в слое, который характеризует оползневое тело, изменения  $E_d$  не такие значительные, как в слое, который вмещает поверхность скольжения. Причина высоких значений модуля Юнга, характеризующих слой поверхности смещения, по отношению к значениям, характеризующим тело оползня, заключается в том, что сейсмические волны, помимо вышеуказанного слоя, захватывают слой песчаников.

По характеру изменений значений модуля Юнга был определен момент начала увеличения растягивающих касательных напряжений, которые начались в период с октября 2011 года по февраль 2012 (рис.4.1.5). В отчетах ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс" заказчик был оповещен об увеличении риска подвижки оползня. В период времени с 28.01.2012 по 17.03.2012 произошла незначительная подвижка оползневого тела с образованием трещины отрыва на поверхности склона.

Совместно с сейсмическими исследованиями на объекте осуществлялись работы по определению напряжений обделки тоннеля с помощью датчиков ПЛДС-400, установленных на обделке тоннеля (рис. 4.1.7). Струнные датчики линейных деформаций ПЛДС-400 представляют собой струну длиной 400 мм, закреплённую между двумя опорными шайбами внутри двух, телескопически соединённых, металлических тонкостенных труб внешним диаметром около 50 мм. Измеряемым

параметром является период колебания струны в микросекундах. Измерения производятся переносным цифровым периодомером ПЦП-1.

По трассе тоннеля датчики были установлены в двух сечениях по два датчика в сечении (на обеих сторонах относительно продольной оси тоннеля) на высоте около +1,5 м от УГР (рис. 4.1.6, 4.1.7). Закрепление датчиков выполнено через специальные закладные детали, приваренные к опорным шайбам датчиков при помощи анкеров к внутренней поверхности обделки. Сечения расположены на секциях 13 и 18 обделки тоннеля.

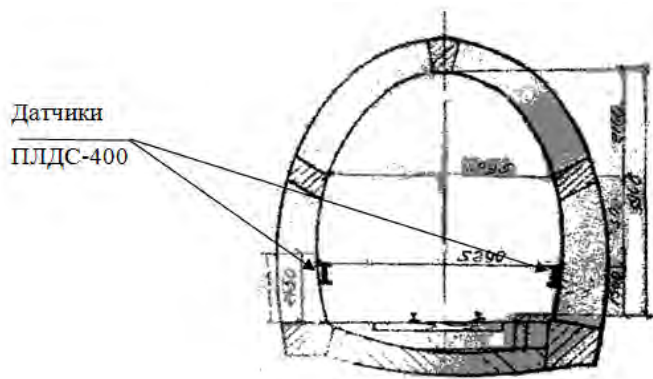


Рисунок 4.1.6 – Размещение датчиков ПЛДС в сечении тоннеля.



Рисунок 4.1.7 – Датчик ПЛДС на внутреннем контуре обделки (нагорная сторона).

Установка датчиков и снятие нулевых замеров были осуществлены в начале июня 2010 г. После установки датчиков измерения проводились регулярно (рис. 4.1.8).

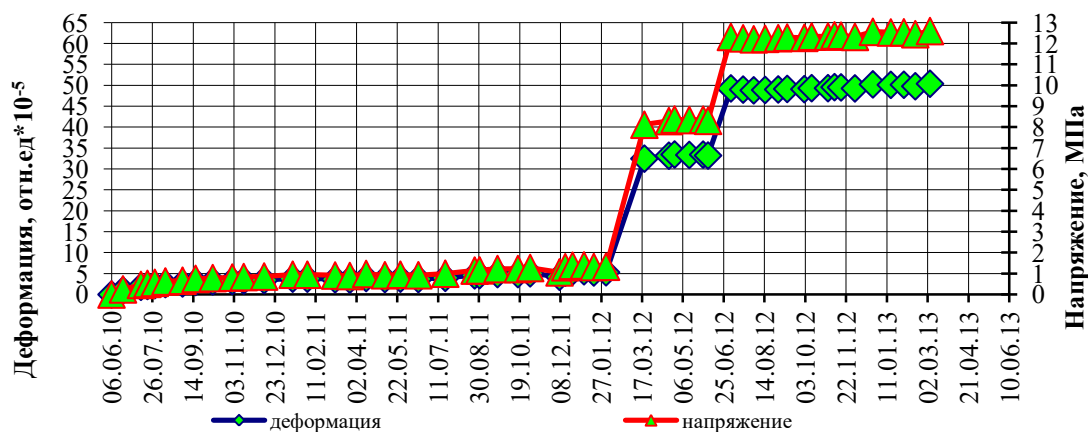


Рисунок 4.1.8 – Кривые развития относительных деформаций и напряжений на внутреннем контуре обделки с нагорной стороны в секции 13.

В период февраль-март 2012 г. был зарегистрирован скачок напряжений по датчику: от 1,3 МПа до 8,3 МПа, что связано с влиянием подвижки оползневого тела. По всей видимости, в результате смещения оползневого тела, произошло перераспределение действующих напряжений в массиве, что естественным образом являлось причиной изменения напряжений обделки тоннеля.

Анализируя имеющиеся данные об изменении напряжений обделки тоннеля и данные изменений  $E_d$ , можно отметить их достаточно высокую корреляцию. Процесс можно описать следующим образом: в период с октября 2011 года по февраль 2012 года по сейсмическим данным фиксируется тенденция снижения скоростных характеристик в слое, который относится к зоне, включающей поверхность скольжения. Рассчитанный по данным скоростей модуль упругости обоснованно показал тенденцию к снижению. Снижение упругих показателей указывает на снижение прочностных характеристик вмещающих грунтов в результате увеличения растягивающих касательных напряжений в зоне, вмещающей поверхность смещения в результате оползневых деформаций. В результате, когда в балансе удерживающих и сдвигающих сил произошел перевес в сторону сдвигающих в период с февраля по март 2012 года, произошла подвижка оползневого тела с образованием трещины отрыва на поверхности склона. При этом в результате перераспределения напряжений в массиве произошел пригруз обделки тоннеля, что стало основной причиной скачка напряжений с 1,3 до 8,3 МПа. После

этого события отмечается некоторое затишье в значениях напряжений, но отмечается тенденция снижения показателей  $E_d$ . В период с середины мая - начала июня 2012 года вновь происходит скачек напряжений в обделке тоннеля (до 12 МПа), которое указывает на очередное нагружение конструкции обделки тоннеля. Рассчитанный коэффициент достоверности аппроксимации (рис. 4.1.9) показал значения  $R^2 \sim 0,73$ , что говорит о корреляции данных изменения рассчитанного динамического модуля упругости  $E_d$  и данных изменения НДС обделки тоннеля.

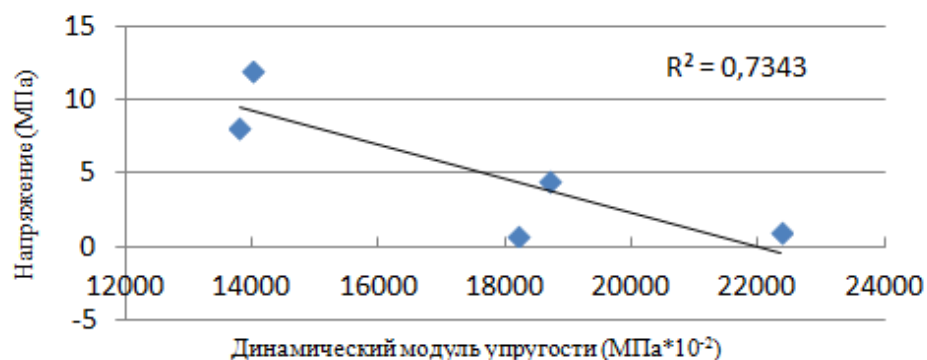


Рисунок 4.1.9 – Расчет коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$  (между параметрами  $E_d$  и данными напряжений на обделке тоннеля).

При строительстве нового железнодорожного тоннеля №8 датчиками деформаций были оснащены три сечения временной крепи и два сечения постоянной обделки. Проходка тоннеля велась механизированным способом.

Датчики в крепи установлены на ПК 19769+62,7, ПК 19769+85,7, ПК 19770+15,7. Датчики в постоянной обделке установлены на ПК 19769+68,7 и ПК 19770+00,7. Размещение опытных участков по трассе тоннеля показано на рисунке 4.1.10.

На ПК 19769+85,7 измерительными приборами оснащены два узла по два датчика (рис. 4.1.11а) при проходке калоттной части выработки, а также два узла по два датчика в штроссовой части. При установке на стальные двутавровые арки датчики были закреплены вязальной проволокой к приваренным кускам арматуры после соединения сегментов стальной арки.

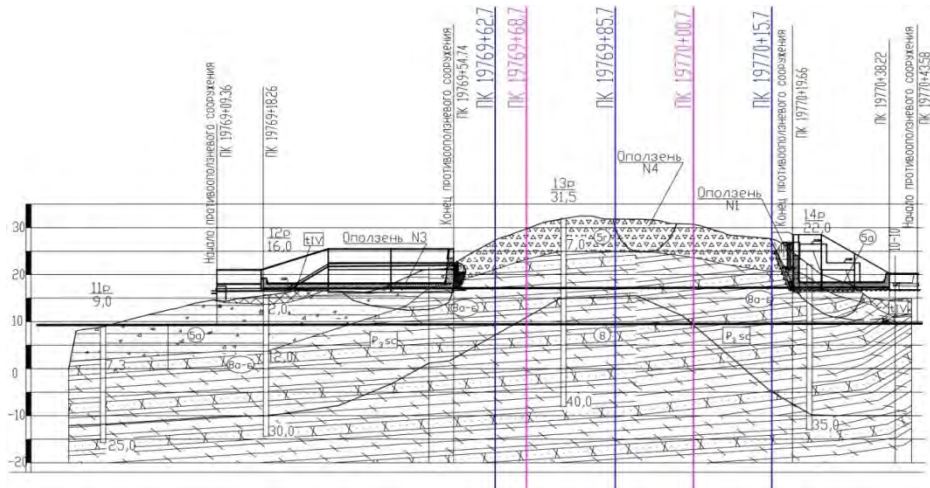


Рисунок 4.1.10 – Размещение опытных участков во временной крепи по трассе тоннеля.

В постоянной обделке датчики размещены на внешнем и внутреннем контурах монолитной железобетонной обделки в полусводовой части симметрично относительно оси тоннеля в двух узлах (рис. 4.1.11б). Установка датчиков была осуществлена перед укладкой бетона в опалубку.

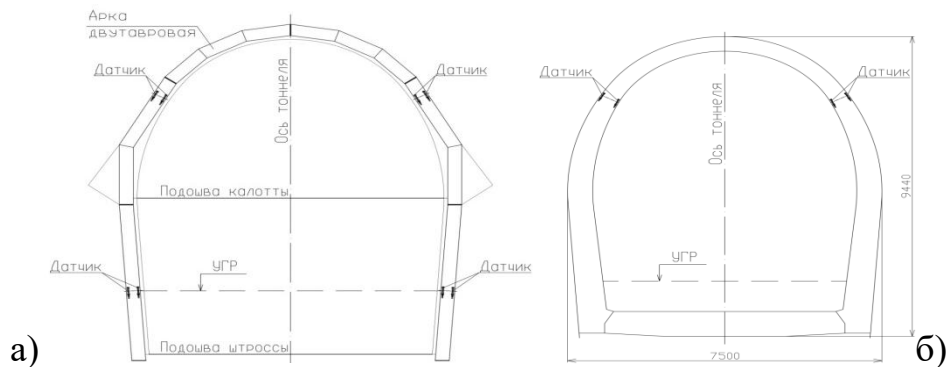


Рисунок 4.1.11 – а) Схема расположения датчиков в крепи на ПК 19769+85,7; б) Схема расположения датчиков в постоянной обделке.

На рисунках 4.1.12 – 4.1.15 показаны графики развития во времени относительных деформаций бетона и нормальных тангенциальных напряжений в аркобетонной крепи калотты и в боках штроссовой части на ПК 19769+85,7.

В местах установки датчиков в калоттной части тоннеля с левой стороны до разработки штроссовой части отмечались незначительные растягивающие напряжения как на внешнем, так и на внутреннем контурах крепи. После разработки штроссы в феврале и возведения постоянной обделки в апреле фиксируется



увеличение растягивающих напряжений до 8,2 МПа к концу отчетного периода. Такие величины напряжений превышают предел прочности бетона на растяжение.

По правой стороне выработки в калоттной части отмечаются сжимающие напряжения, достигающие величины 3,5 МПа к моменту начала разработки штроссовой части. После разработки штроссовой части в феврале и возведения постоянной обделки в апреле отмечается рост напряжений по правой стороне сводовой части выработки, после чего напряжения на внутреннем контуре достигают 17,5 МПа. С конца апреля по начало июня наблюдается стабильное состояние.

По датчикам, расположенным в боках штроссовой части выработки, в целом, фиксируются сжимающие напряжения. По правой стороне штроссовой части выработки сжимающие напряжения к концу отчетного периода достигают 3,5 МПа, а по левой стороне – 6,8 МПа на внешнем контуре.

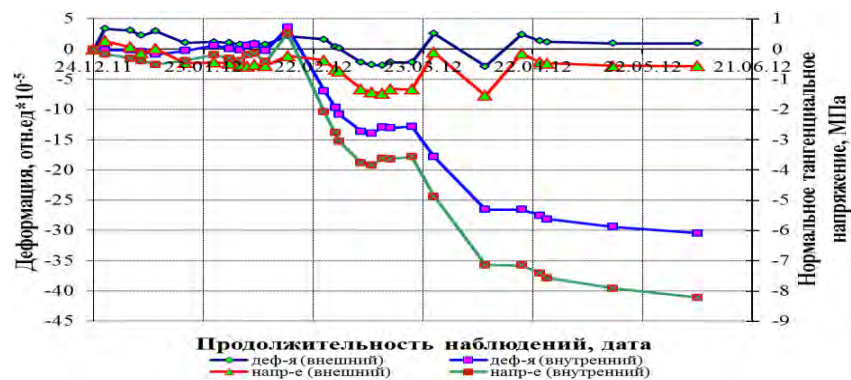


Рисунок 4.1.12 – Кривые развития относительных деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне аркобетонной крепи калоттной части на ПК 19669+85,7 слева.

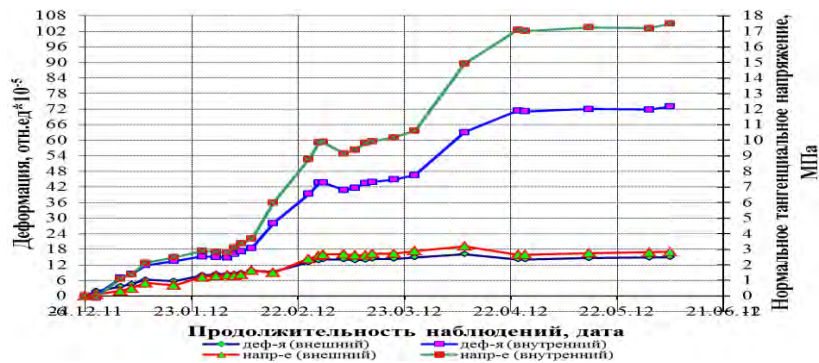


Рисунок 4.1.13 – Кривые развития относительных деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне аркобетонной крепи калоттной части на ПК 19669+85,7 справа.

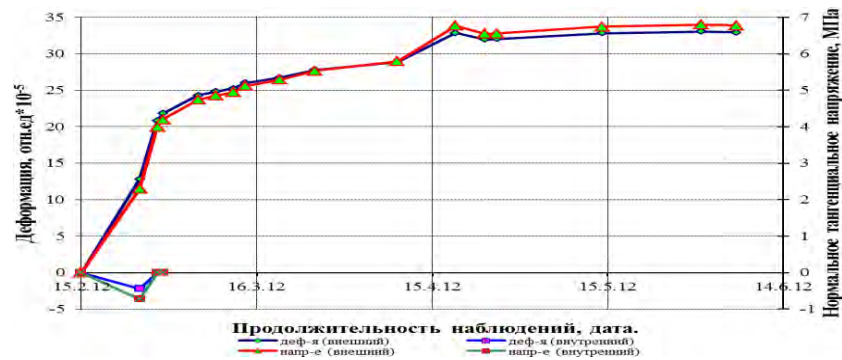


Рисунок 4.1.14 – Кривые развития относительных деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне аркобетонной крепи штроссовой части на ПК 19669+85,7 слева.

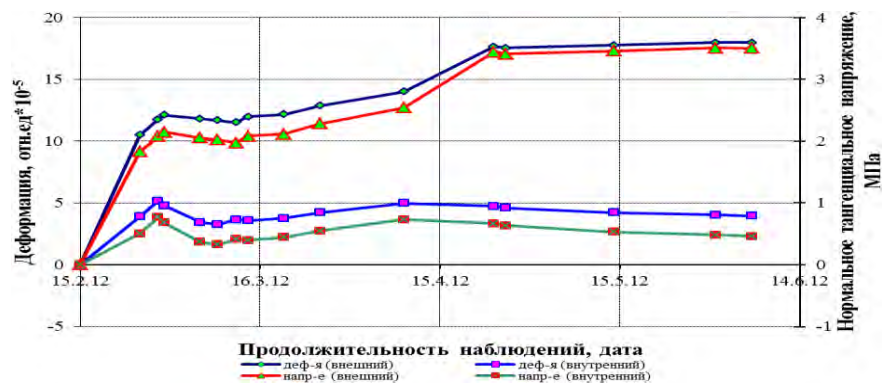


Рисунок 4.1.15 – Кривые развития относительных деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне аркобетонной крепи штроссовой части на ПК 19669+85,7 справа.

Можно отметить, что деформации, зарегистрированные в старом действующем тоннеле и новом (строящемся), носят достаточно близкий характер. Резкое повышение значений напряжений в обделке тоннеля начинается в период 01.2012-02.2012г., и регистрируются датчиками НДС, которые находятся в сечениях близких к исследуемому оползню №4. Стабилизация напряжений начинается с даты 06.2012г.

Для проверки работоспособности метода дисперсионного анализа поверхностных волн при решении задач, связанных с оценкой устойчивости оползня, были использованы сейсмические данные, полученные методом МПВ. Поверхностные волны достаточно интенсивно прослеживались на зарегистрированных волновых полях. По этой причине по уже имеющимся сейсмограммам был произведен дисперсионный анализ по всему циклу мониторинговых измерений.



Расчет дисперсионных изображений производился с помощью модуля дисперсионного анализа – MASW, который входит в программу RadexPro Professional. Дисперсионные изображения рассчитывались различными методами: Phase shift и F-K (подробное описание процедуры расчета представлено в главе 2. На рассчитанных дисперсионных изображениях, путем пикировки по максимумам амплитуд, выделялись дисперсионные кривые, относящиеся к поверхностным волнам рэлеевского типа (методика выделения дисперсионных кривых поверхностных волн подробно изложена в главе 2)[110].

Дисперсионные кривые были рассчитаны для опорных (маркирующих) событий, в которых менялась тенденция  $E_d$ , отображенная на рисунке 4.1.5. Таким образом, на рисунках 4.1.16-4.1.20 представлены дисперсионные изображения для периода 02.2011, 10.2011, 02.2012, 05.2012, 08.2012.

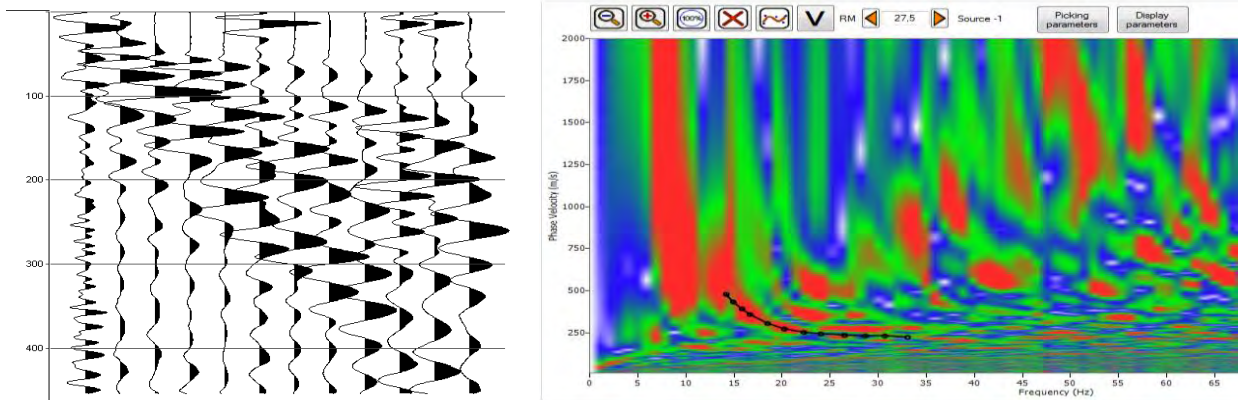


Рисунок 4.1.16 – Сейсмограммы зарегистрированные 02.2011.  
Пропикированная дисперсионная кривая на дисперсионном изображении.

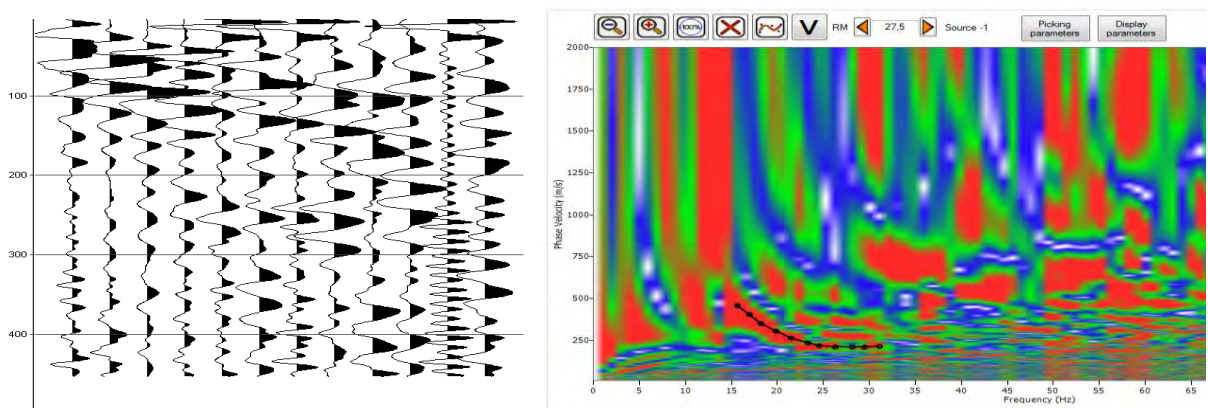


Рисунок 4.1.17 – Сейсмограммы зарегистрированные 10.2011.  
Пропикированная дисперсионная кривая на дисперсионном изображении.

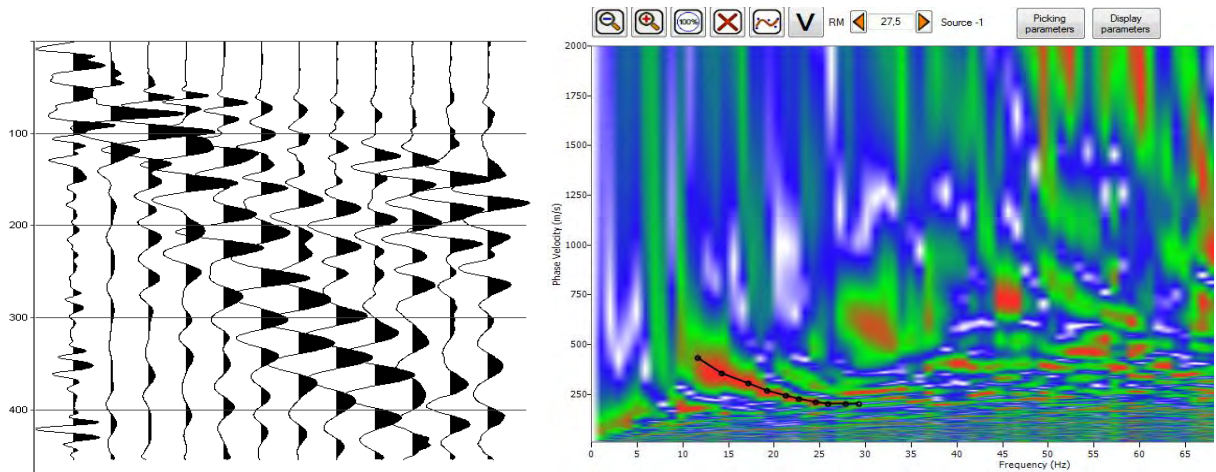


Рисунок 4.1.18 – Сейсмограммы зарегистрированные 02.2012.  
Пропикированная дисперсионная кривая на дисперсионном изображении.

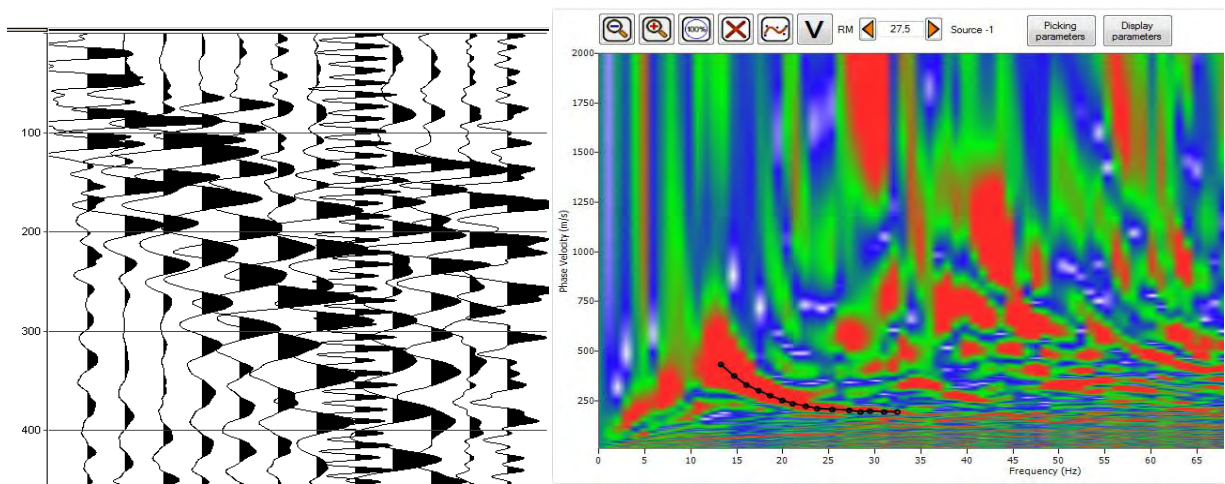


Рисунок 4.1.19 – Сейсмограммы зарегистрированные 05.2012.  
Пропикированная дисперсионная кривая на дисперсионном изображении.

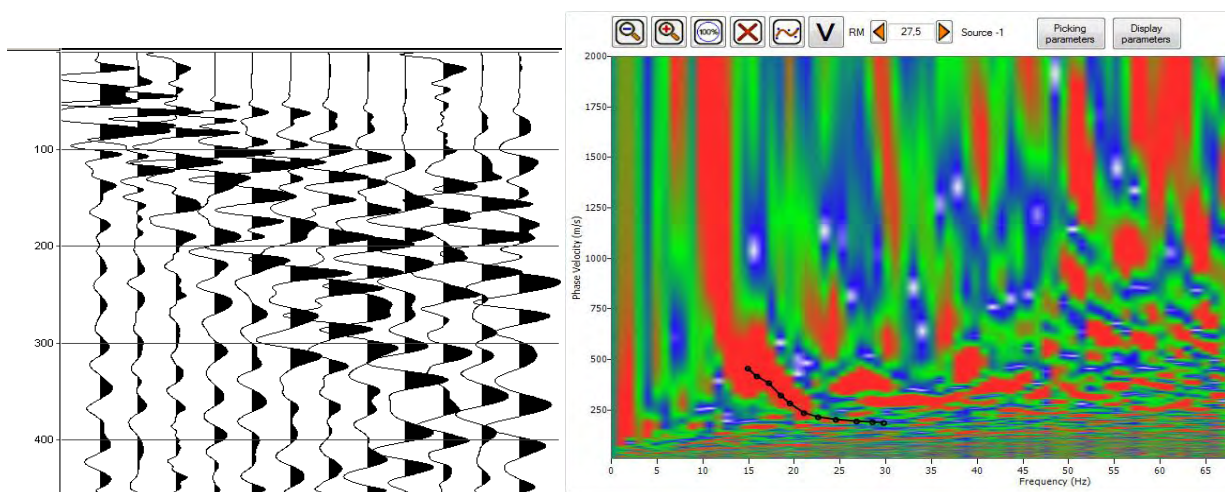


Рисунок 4.1.20 – Сейсмограммы зарегистрированные 08.2012.  
Пропикированная дисперсионная кривая на дисперсионном изображении.

Рассчитанные дисперсионные кривые были приведены в единое поле (рис.4.1.21). На изображении видно, как реагируют дисперсионные кривые на происходящие в массиве изменения. Можно заметить общие тенденции в изменении параметров дисперсионных кривых с изменением модуля упругости ( $E_d$ ). Так, максимальные значения  $V_r$  отмечаются у дисперсионной кривой, характеризующей состояние массива на период времени 10.2011. До этого момента отмечается плавное возрастание значений  $V_r$  во времени. После 10.2011 происходит снижение скоростных характеристик.

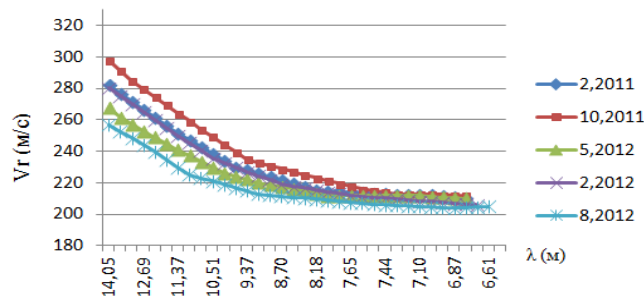


Рисунок 4.1.21 - Дисперсионные кривые, рассчитанные для 02.2011, 10.2011, 02.2012, 05.2012, 08.2012.

Для количественной оценки отклика дисперсионных кривых на изменения в массиве был произведен расчет отклонений дисперсионных кривых (разностных кривых), выраженных в процентном соотношении относительно кривой, характеризующей первоначальное состояние для каждой точки соответствующей  $\lambda$  - длины волны (рис.4.1.22).

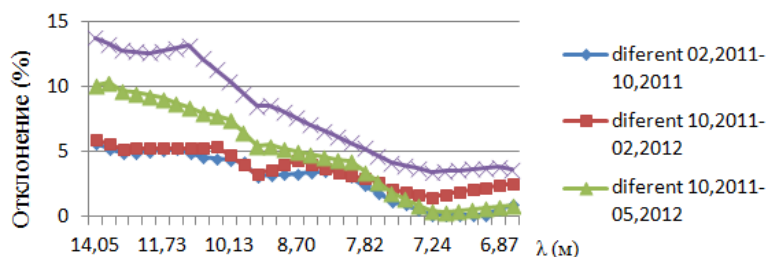


Рисунок 4.1.22 –Отклонение дисперсионных кривых, рассчитанных для 02.2011, 10.2011, 02.2012, 05.2012, 08.2012.

Кривая 02.2011-10.2011 характеризует изменение дисперсионной кривой в интервале времени между февралем и октябрём 2011 года. В этот период времени происходит достаточно плавное изменение (повышение) скоростных характеристик

фазовых скоростей поверхностных волн до 6,4%. В высокочастотной области (наименьшие длины волн) отмечаются незначительные изменения в пределах 2%. Начиная с отметки  $\lambda \sim 9,4$  м, отмечаются более значительные изменения  $V_r$ , относительно значений на 02.2011 год.

В период с 10.2011 отмечается тенденция снижения скоростных характеристик, которая отображается в смещении кривых в низкоскоростную область. Тенденция прослеживается для кривых 10.2011-02.2012, 10.2011-05.2012, 10.2011-08.2012. Понижение скоростных характеристик на 08.2012 относительно 10.2011 составили около 14% в пике.

Для сравнения большого количества дисперсионных кривых удобнее использовать принцип оценки по мониторинговому окну. Принцип заключается в выборе интересующего нас интервала глубин (интервалы  $\lambda$ -длины волн), который включает потенциально деформируемый слой, при этом оценивается средняя скорость поверхностных волн, характеризующих выбранное окно. По данным выборки прослеживается изменение средних скоростей поверхностных волн во времени для интересующего интервала. В данном случае по имеющимся геологическим данным потенциальная поверхность смещения и так называемая резервная зона (Огильви А.А.) находятся в интервале 7-12 метров. По этой причине окно мониторинга выбиралось с условием охвата всех потенциальных поверхностей смещения и соответствовало интервалу 6,5-12м. (рис. 4.1.23).

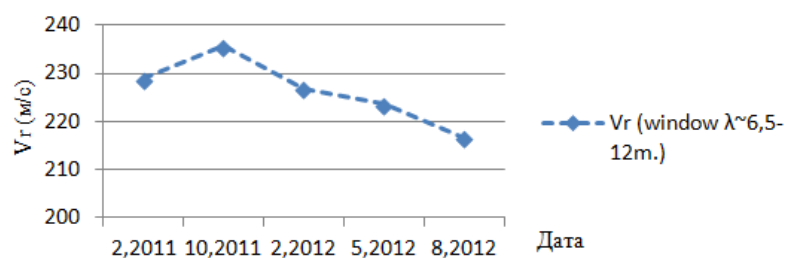


Рисунок 4.1.23 - График изменения скоростного режима  $V_r$  в мониторинговом окне 6,5-12м.

Получившийся график можно сравнить с ранее уже представленным графиком изменения модуля упругости в массиве (рис. 4.1.5).



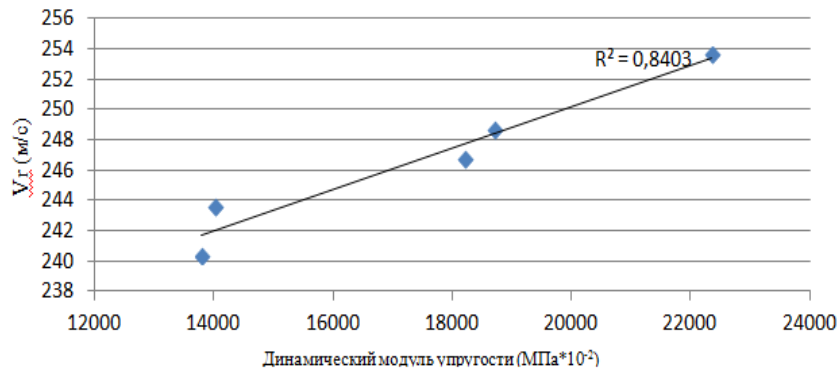


Рисунок 4.1.24 – Расчет коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$  (между параметрами  $V_r$  и данными  $E_d$ ).

Рассчитанный коэффициент достоверности аппроксимации (рис. 4.1.24) показал высокие значения  $R^2 \sim 0,84$ . Это позволяет считать результаты представленных методов взаимокоррелируемыми.

По частотно-скоростным характеристикам поверхностных волн рэлеевского типа были рассчитаны скорости поперечной волны для диапазона глубин 6,5-12 м., после чего были рассчитаны значения динамического модуля сдвига для заданного интервала глубин. В последующем был построен график изменений параметра во времени (рис. 4.1.25).

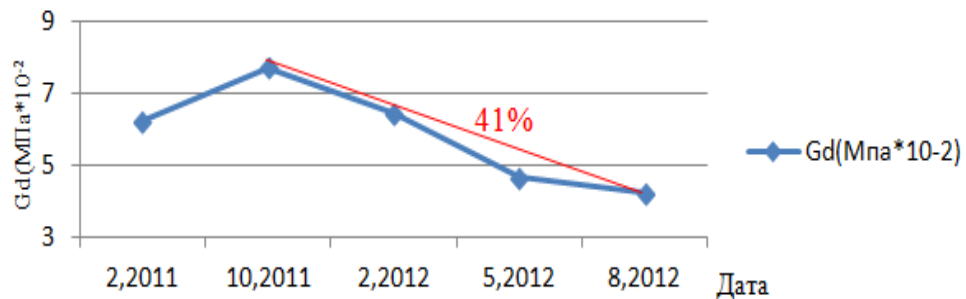


Рисунок 4.1.25 – График изменения параметра  $G_d$  во времени

Анализ графика изменений  $G_d$  показал, что изменения модуля сдвига в выбранном интервале глубин 6,5-12 метров достаточно существенные. При этом, начиная с даты 10.2011, отмечается снижение параметра  $G_d$  на 41%, что объясняет снижение устойчивости оползневой тела в результате увеличения растягивающих напряжений в области вмещающей поверхность смещения и резервную зону.

#### **4.1.2. Оценка устойчивости оползневого склона на участке 13 бис п. Мамайка**

Локальный участок исследования (условное название 13бис) входит в состав целой оползневой системы (рис. 4.1.26), которая располагается на побережье Черного моря в п. Мамайка р-на Б.Сочи. Большое количество разрушенных оползневыми проявлениями строений указывает на значительную оползневую активность участка исследований.

Описываемый участок пересекает Северо-Кавказская железная дорога и исторически с 1914 года, он известен как оползневый. Тогда здесь, в нижней части абразионного склона, в 20-70м от уреза моря, он впервые был подрезан полувыемкой железной дороги на высоту до 10-20м. Глинистые породы в откосе вскоре начали оползать на полотно дороги. Противооползневые мероприятия (подпорные стены с дренажами, сеть поверхностных водотоков, гидросмыв оползневых пород) оказались малоэффективными – оползень продолжал разрастаться вверх по склону. В 1950-1952гг. вдоль дороги построена закрытая галерея (тоннель) протяженностью около 500м.

Как известно, «Мамайский оползневой массив» по характеру смещения пород и морфологии склона разделяется на 2 части:

1) верхняя часть мощностью 3-7м состоит из делювиально-пролювиальных отложений и не представляет угрозы сохранности конструкциям тоннеля, так как эта часть оползня просто переползает поверх кровли галереи вниз на пляжевую полосу, где затем уносится в море. Причем активность этого сползания ранее была обусловлена в основном периодическим обводнением массива природными осадками. В последние же 10-15 лет эта активность в большей степени связана уже с искусственным замачиванием верхних участков оползня из многочисленных индивидуальных прудов и бассейнов и с протечками из разрывов из 3-х городских водоводов;

2) нижняя часть является так называемым древним (верхнечетвертичным) оползнем и состоит из блоков коренных пород и перекрывающих их глинисто-

щебенистого покрова. Это подтверждено многочисленными скважинами (рис. 4.1.26), вскрывающими блоки сдвинутых коренных пород с различной ориентацией слоистости, глиной трения по плоскостям. Данная часть оползневого массива пока условно стабилизирована, а на его поверхности имеет развитие древняя Карангатская терраса, сложенная гравийно-галечниковыми отложениями. Однако, техническая деятельность человека привела в движение грунтовые массы не только поверхностного оползня, но и древние оползневые массы, на что указывают данные инклинометрических измерений в скважинах и отдельные сооружения, стоящие на довольно глубоких сваях (12-15 м).

3) Основание действующего тоннеля (крытая галерея) было устроено на сдвинутых блоках коренных пород древнего оползня, что особенно заметно в районе Северного портала. Однако устойчивость этих коренных пород весьма условна, о чем свидетельствуют количественные показатели приращений напряженно-деформированного состояния по длине тоннеля и динамика раскрытия швов между заходками обделки.

4) В настоящее время весьма заметны обширные очаги активного развития оползневого процесса на вышележащем склоне. В составе переползаемых поверх тоннеля грунтов, кроме обломков и глин сочинской свиты, встречены глыбы песчаника и мергеля Мамайской свиты, залегающей над Сочинской, а также песчано-гравийно-галечный грунт Карангатской террасы, что также указывает на значительную глубину захвата грунтов оползевым смещением. Таким образом, действующий тоннель (крытая галерея) по сути выполняет функцию удерживающего сооружения. Тоннелем перекрыт сток грунтовых вод с поверхности вышележащего оползневого склона, что приводит к интенсивному замачиванию грунтов в дождевые периоды и провоцирует активизацию оползневого процесса.

5) Выше отметок 45-50м, а у северного портала галереи выше 30м, склон застроен 1-3 этажными частными жилыми домами, при этом некоторые дома уже пустуют из за их аварийного состояния в результате оползневых деформаций (рис. 4.1.26). Дополнительный пригруз головной части оползневого склона, хозяйственная деятельность, связанная в том числе с дополнительным

неорганизованным водосбросом, непрофессиональные попытки укрепления склона отдельными владельцами только ухудшают общую ситуацию.

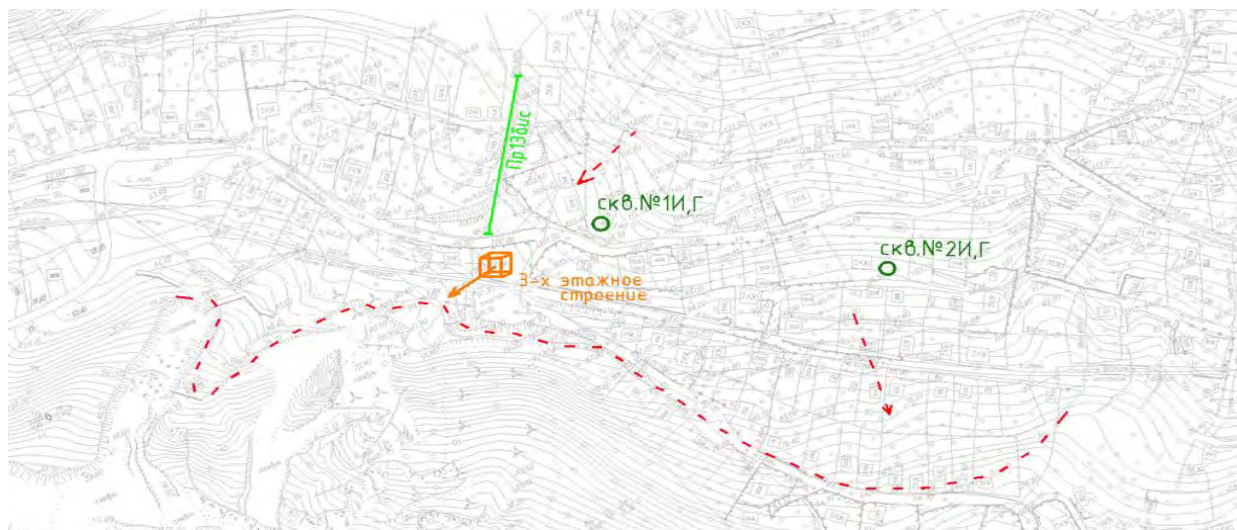


Рисунок 4.1.26 – Наблюдательная схема локального участка 13бис.

Работы по изучению Мамайского оползня проводились ранее в 2005 – 2007 гг., когда была создана режимная сеть, включавшая 11 наблюдательных станций, оборудованных 28 датчиками гидростатического давления. Регулярные режимные наблюдения по датчикам гидростатического давления, проводившиеся в течение трех лет, позволили сделать вывод о том, что амплитуда сезонных изменений гидростатических давлений в теле Мамайского оползня не превышает 1 – 2 м водяного столба, что свидетельствовало о практической стабильности напряженного состояния оползневого массива в годовом цикле.

По результатам проведенных циклов наблюдений было также зафиксировано снижение напоров подземных вод с глубиной, что свидетельствует о наличии нисходящего потока. Установлена также дренажная роль Воронцовского надвига и других тектонических структур, что способствует повышению устойчивости массива при прочих равных условиях. Наблюдаемые оползневые деформации обусловлены сезонным и техногенным увлажнением и набуханием покровных отложений на глубину до 10 м от земной поверхности и смещением этих отложений по склону.



В течение трех лет часть наблюдательных станций по объективным причинам вышла из строя, а с 2008 года наблюдения практически не проводились. В 2011 году было принято решение возобновить гидрогеологический мониторинг, но на этот момент в работоспособном состоянии оставалась только одна скважина. По этой причине были пробурены и оснащены гидрогеологическими датчиками новые наблюдательные скважины. В том числе скважины 1Г и 2Г, располагающиеся непосредственно поблизости локального участка 3бис (рис. 4.1.26).

Размещение датчиков в скважинах в виде гирлянд и проведение систематических режимных наблюдений позволило оценить структуру потоков подземных вод и изменение напряжённого состояния как покровных глинистых образований, так и меловых слабопроницаемых отложений [111].

Номер инженерно-геологического элемента	Стратиграфический индекс	Подойва слоя, м		Мощность слоя, м	Описание грунтов	Литогеологический разрез, влажность и консолидация	Уровень грунтов. вод, м		Конструкция скважины
		Абс. отметка	Глубина				Дата		
							Появился уровень	Установившийся	
Н	t <sub>Q<sub>IV</sub></sub>	103,40	0,70	0,70	Техногенный грунт: суглинок желто-бурого цвета, от твердой до полутвердой консистенции, с включениями строительного мусора в виде обломков бетона и обломков коренных пород в количестве до 20-25%.				
	d-p <sub>Q<sub>IV</sub></sub>	96,00	7,60	6,90	Глина буровато-серого цвета от полутвердой до тугопластичной консистенции, с включениями обломков коренных пород (аргиллита, мергеля, песчаника) размером от 1-2 до 5-7 см, в количестве до 25-30%, обломки коренных пород выветрелые, окисленные, неравномерно распределены по слою. С глубины 5,0-7,0м содержание обломков увеличивается до 35-40%.				
	P <sub>2m</sub>	87,00	17,00	9,40	<p>Флишевая толща коренных пород: неравномерное переслаивание аргиллитов зеленовато-серого и темно-серого цвета (70-75%) и песчаников серого цвета (25-30%), наблюдаются редкие прослой мергелей серого и серо-зеленого цвета мощностью до 5 - 10 см.</p> <p>Песчаники серые, средне- и мелкозернистые, полимиктовые карбонатом цементе (реактируют с кислотой), слаботрещиноватые, плотные, средней прочности, неяснослоистые. Трещины разноориентированы к оси зерна. До глубины 26м по прослоям и трещинам наблюдается окисление.</p> <p>Аргиллиты трещиноватые, выветрелые, от низкой до пониженной прочности, размягчаемые, имеют раковистый излом. Трещины разноориентированные, раскрытие до 1 мм. Контакт песчаников с аргиллитами под углом 30-35 градусов к оси зерна.</p> <p>Прослой мергелей серый и зеленовато-серый маломощные, мергели от малопрочных до средней прочности, слабоветрелые.</p> <p>Ближе к кровле слоя в интервале глубин 12-14м наблюдается <b>зеркала скольжения</b> по аргиллиту под углами 50-60 град. к оси зерна.</p> <p>В интервале 16,7-16,6м керн представлен в виде щебня аргиллита и песчаника с единичными цельными столбиками до 10-15 см, встречаются обломки мергеля зеленовато-серого и розовато-серого цвета размером до 7-8см в количестве до 5-10%, наблюдается частичное поглощение промывочной жидкости.</p>		11,30	12,30	

Рисунок 4.1.27 – Буровая колонка скважины 1Г.

В качестве регистрирующих устройств использовались струнные пьезометры трех типов фирмы «Soil Instruments Ltd» (Великобритания). Установленные в скважинах струнные пьезометры типа W9-30-SS-T с дисковым наконечником (рис. 4.1.28) обеспечили измерение гидростатических давлений с погрешностью  $\pm 0,1\%$  в интервале давлений  $0 \div 300$  кПа; пьезометры типа W9-70-SS-T – в интервале  $0 \div 700$  кПа и пьезометры типа W9-200-SS-T в интервале  $0 \div 2000$  кПа. Всего в 5 режимных скважинах (станциях) было установлено пять струнных пьезометров типа W9-30-SS-T, семь струнных пьезометров типа W9-70-SS-T и три струнных пьезометров типа W9-200-SS-T. Характеристики наблюдательных станций приведены в таблице 4.1.1



Рисунок 4.1.28 – Датчик гидростатического давления Soil (Великобритания).

Считывающее устройство позволяет регистрировать показания струнных датчиков в четырех вариантах – частота колебания струны ( $f$ ),  $f^2/1000$ , период колебания струны ( $1/f$ ).

Переход от замеренных показаний к значениям определяемых гидростатических давлений производилось по аналитическим зависимостям, установленным производителем при тарировке каждого датчика в заводских условиях, и скорректированным с учетом параметров, снятых непосредственно перед установкой датчика в скважину. Методика проведения измерений и их интерпретации базируется на рекомендациях инструкции для W9 стандартных струнных пьезометров и «Руководства по эксплуатации портативного считывающего устройства для струнных датчиков фирмы «Soil Instruments Ltd» (Великобритания). Графики изменения гидростатического давления и уровня

подземных вод по скважинам 1Г и 2Г представлены на рисунках 4.1.29 и 4.1.32 соответственно.

Таблица 4.1.1

## Характеристика наблюдательных станций.

№№ скважин	Количество датчиков	Глубины установки датчиков, м	Тип датчика, (его заводской номер)
1Г	2	22.5 62.5	W9-30-SS-T (036049) W9-200-SS-T (036105)
2Г	5	3.0 10.0 40.0 52.0 80.0	W9-30-SS-T (036057) W9-30-SS-T (036066) W9-70-SS-T (036076) W9-70-SS-T (036097) W9-200-SS-T (036106)

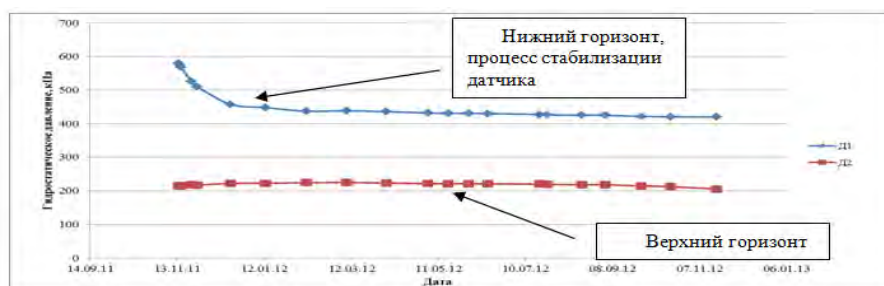


Рисунок 4.1.29 – График изменения гидростатических давлений по скважине № 1Г.



Рисунок 4.1.30 - График изменения уровней подземных вод по скважине № 1Г.

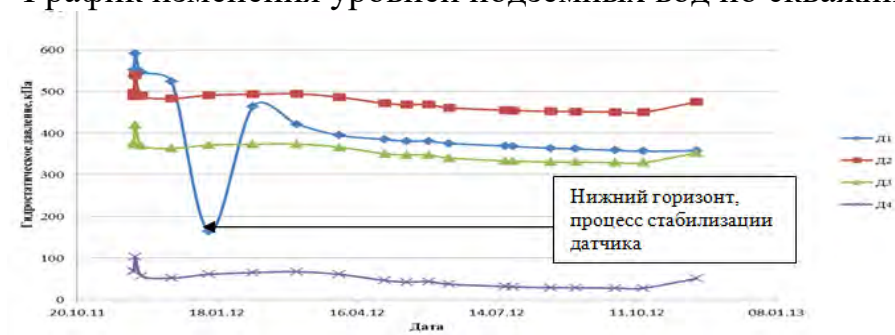


Рисунок 4.1.31 – График изменения гидростатических давлений по скважине № 2Г.



Рисунок 4.1.32 - График изменения уровней подземных вод по скважине № 2Г.

Анализируя результаты режимных наблюдений по находящимся на исследуемом участке наблюдательным станциям, можно сделать вывод, что по всем рабочим датчикам (вошедшим в стабильный режим работы) наблюдается рост гидростатических давлений, что может свидетельствовать о возможных деформациях массива. Зависимость уровня гидростатического давления и устойчивости массива проиллюстрирована на рисунке 4.1.33[111].

Увеличение гидростатических давлений наблюдается в скважинах 1Г и 2Г, где гидростатические давления за 4 месяца выросли на 25 кПа и 18 кПа соответственно.

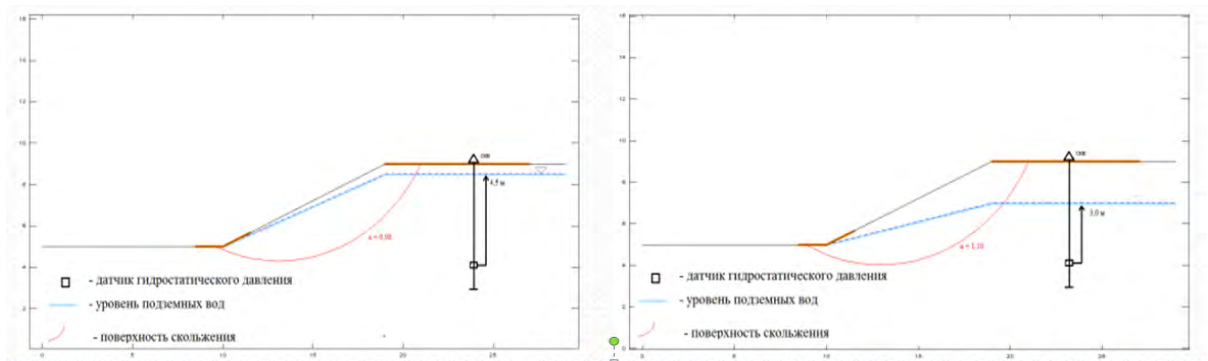


Рисунок 4.1.33 – Зависимость уровня гидростатического давления (уровня подземных волн) и устойчивости массива.

Для оценки величины и направления деформации (смещения) на объекте исследования применялся метод инклинометрии.

Глубинные наблюдательные репера представляют собой вертикальные скважины. В массиве песчано-глинистых пород они специально обсажены полиэтиленовыми трубами для того, чтобы за счет своих более податливых и пластических свойств труб можно было бы более четко и детально увидеть характер искривления скважин из-за воздействия на них “текущего” массива.

В процессе развития деформаций в массиве гибкие наблюдательные полиэтиленовые колонны перемещаются и искривляются согласно подвижкам массива. Путем дискретных инклинометрических измерений отклонений наблюдательной колонны от ее первоначального положения определяют величину, направление и скорость возникающих перемещений различных точек профиля колонны.

Для обеспечения надежной привязки начального положения траекторий пробуренных скважин и дальнейшего контроля за возможным изменением их пространственного положения был использован инклинометр КВАРЦ – 32.01 и комплект компактного переносного спуско-подъемного оборудования, разработанные и изготовленные в научно-производственном центре «ГеоМИР» (рис. 4.1.34).

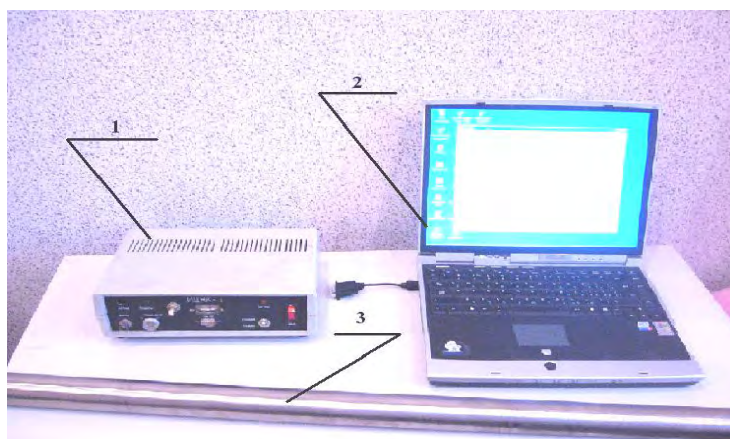


Рисунок 4.1.34 – Комплект скважинного оборудования «Кварц» НПЦ Геомир.

Скважинный инклинометр КВАРЦ – 32.01 представляет высокоточную и высоконадежную измерительную систему угловых непрерывных измерений траектории скважин благодаря использованию жестко закрепленных трех координатных первичных преобразователей магнитного и гравитационного поля Земли и применению компьютерной обработки данных измерений.

В 2011 году было произведено 2 цикла измерений по заложенным наблюдательным скважинам – реперам, в том числе и по скважине 1И, которая находилась в непосредственной близости к локальной оползневой зоне 13бис (рис. 4.1.35, 4.1.36).

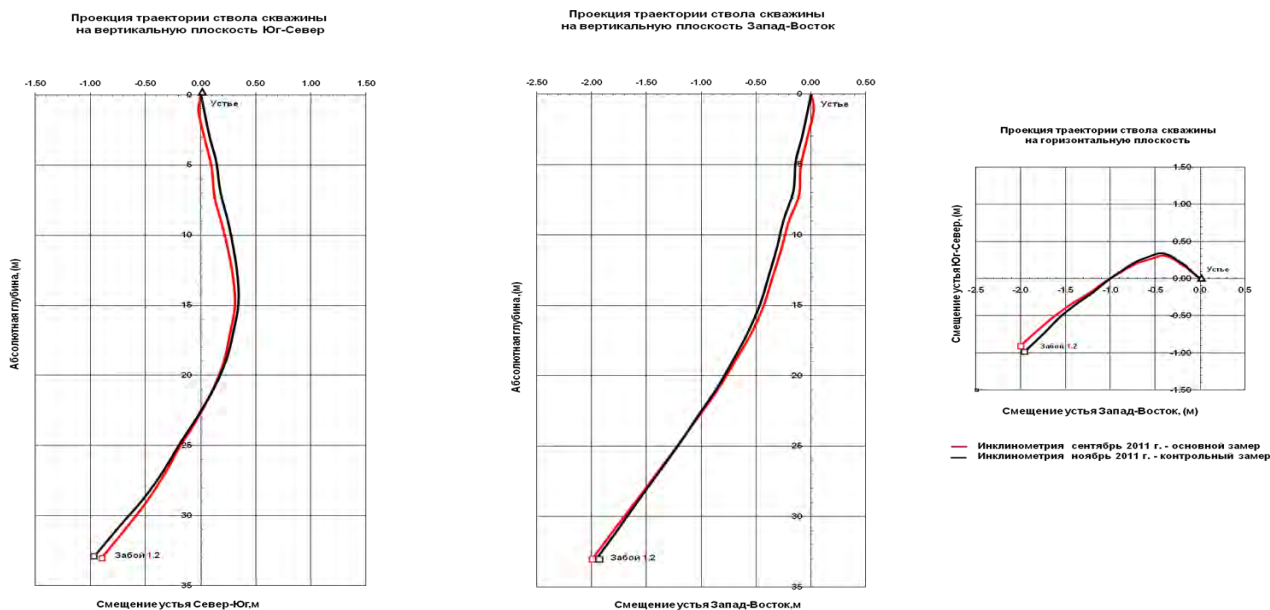


Рисунок 4.1.35 - Траектория наблюдательной скважины №1И. Период 09.2011-11.2011.

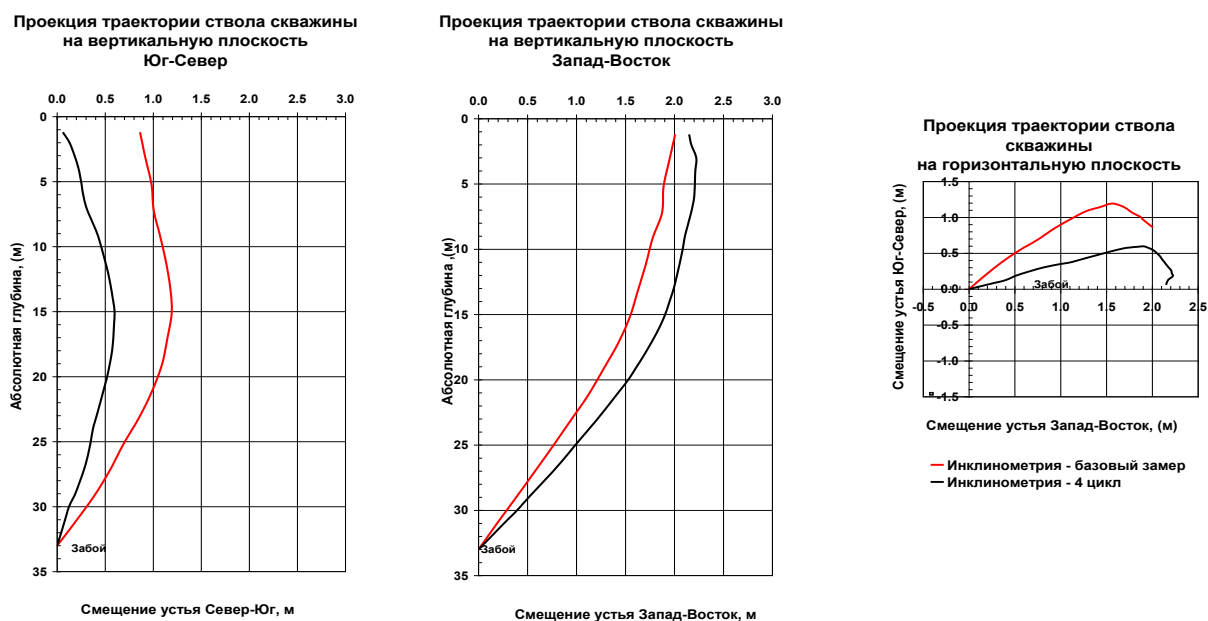


Рисунок 4.1.36 - Траектория наблюдательной скважины №1И. Период 11.2011-11.2012.

По данным инклинометрии можно отметить, что в период 10.2011- 10.2012 на исследуемом участке произошла подвижка оползневого тела. Тоже можно отметить и по скважине 2И (рис. 4.1.37).



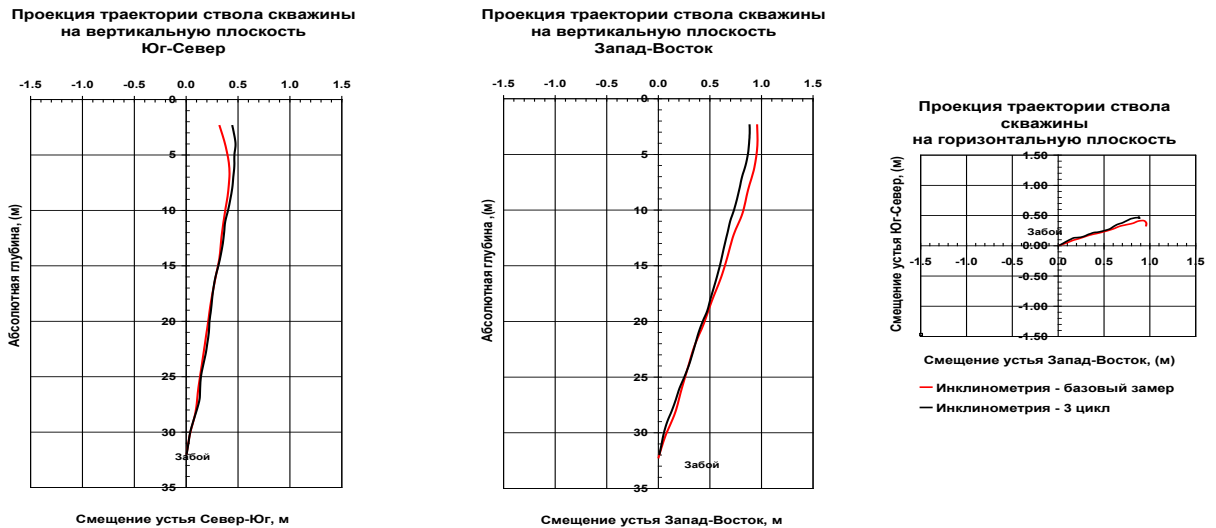


Рис.2 Изменение траектории ствола скважины № 2И в период с февраля по ноябрь 2012 г.

Рисунок 4.1.37 – Траектория наблюдательной скважины №1И. Период 02.2012-11.2012.

Отмеченное в 2012г смещение устья скважины 1И в юго-восточном направлении по азимуту  $170^0$ , которое к моменту проведения 3-го цикла наблюдений составило 0.62м, по данным 4-го цикла измерений в ноябре 2012 года, составило уже 0.82м, что свидетельствует о смещении пород осадочной толщи в районе скважины 1И и 2И.

В рамках мониторинга устойчивости Мамайской оползневой системы, в комплексе с другими методами, был применен метод радарной спутниковой интерферометрии для мониторинга оползневых процессов[112-114].

Область проведения космического мониторинга стабильности оползневого склона в районе тоннеля №4 на участке Туапсе – Адлер Северокавказской железной дороги изображена на рисунке 4.1.38. Она расположена в пределах четырехугольника, обозначенного на рисунке.

По результатам, полученным с помощью спутниковой радарной интерферометрии, было отмечен период интенсивных смещений оползня (до начала мая 2012 года), которые отмечались на поверхности. Этот период обусловлен сильными дождями и активизация оползневых деформаций отмечается в этот период в том числе и на других оползнях (Барановка, Молдовка, Хоста, Кепша).



Рисунок 4.1.38 - Область мониторинга методом радарной спутниковой интерферометрии.

В этот же период отмечается рост напряжений на обделке тоннеля, который пересекает данный оползневой массив (рис. 4.1.39).

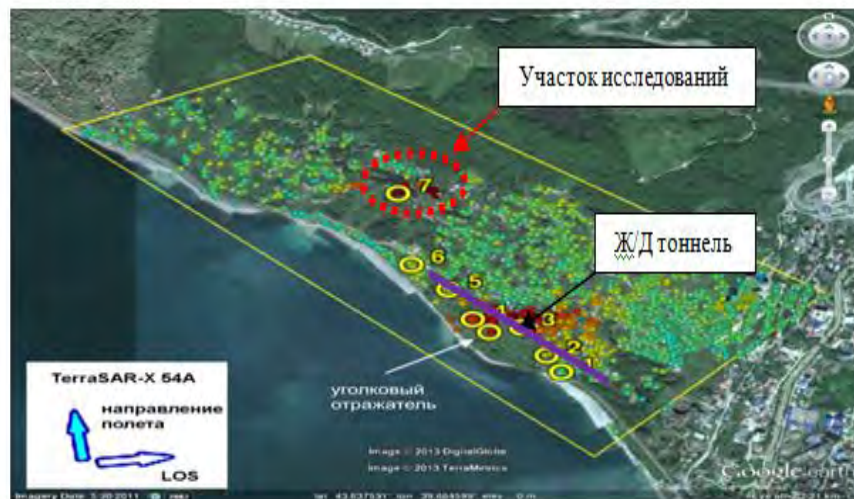


Рисунок 4.1.39 - Положение контрольных участков 1-7 (устойчиво отражающих элементов) в области мониторинга, нанесённые на карту Google Earth. . Расчет по серии из 8 снимков с 29.11.2012 по 25.02.2013.

В комплексе с описанными ранее методами на объекте были проведены мониторинговые сейсмоакустические исследования, которые проводились для оценки физико-механических параметров оползневой массива и выявления изменений зарегистрированных параметров во времени.

Сейсмические полевые наблюдения выполнялись с помощью 24-х канальной сейсмостанции типа МСС-1 по методике непрерывного сейсмопрофилирования



методом преломленных (МПВ) и рефрагированных волн. Шаг между сейсмоприемниками 5м. При проведении работ использовались 7-ми точечные системы наблюдений с возбуждением колебаний ударным способом. Регистрация велась на открытом канале с частотой оцифровки – 2,1 кГц для усиления полезного сигнала использовалось накопление. Сейсмоприемники устанавливались в грунт с небольшим заглублением.

На стадии обработки строились годографы первых вступлений продольных, поперечных волн, по которым определялись скорости в верхней части разреза. Рассчитывались разностные годографы, по которым определялись граничные скорости для разных типов волн, что в последующем на стадии интерпретации позволяло контролировать результаты машинной обработки сейсмических материалов. Необходимо заметить, что первичная обработка материалов сейсмических наблюдений осложнена тем, что полезный сигнал присутствует на фоне многочисленных техногенных помех (работы в условиях населенного пункта). Всё это потребовало использования дополнительных фильтров полученного сигнала.

Результаты сейсмоакустических исследований по профилю 13бис: структура участка исследования хорошо прослеживается на рисунке 4.1.40, на котором представлен полученный сейсмотомографический разрез, на разрезе уверенно выделяются несколько слоев, которые различаются скоростными характеристиками.

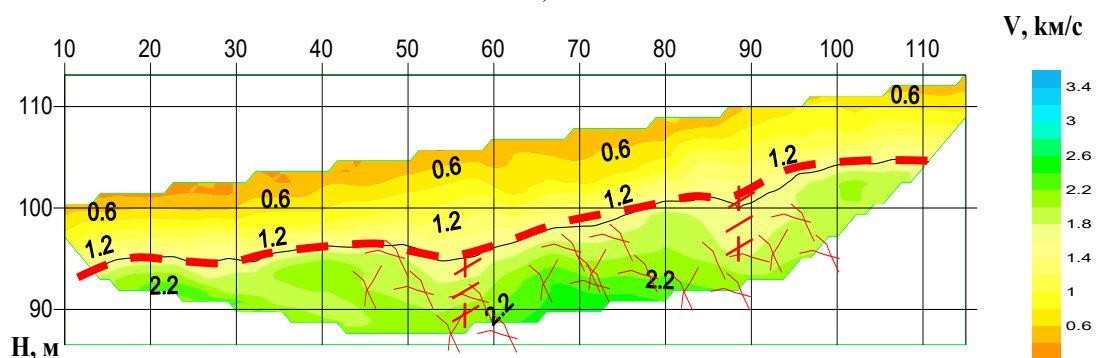


Рисунок 4.1.40 - Сейсмотомографический разрез профиль 13бис ( $V_p$ ).

Профиль 13 бис расположен в верхней части Мамайского оползня перпендикулярно склону со стороны северного портала тоннеля.

На сейсмических разрезах, исходя из структуры распределения скоростных свойств, можно выделить три, выдержанных по своим свойствам, горизонта (рис. 4.1.40.):

- первый слой – зона малых скоростей включает в себя насыпной грунт, почвенно-растительный слой и верхняя часть глинистого тела оползня. Характеризуется  $V_p \sim 0,33 - 0,6$  км/с и  $V_s \sim 0,1 - 0,2$  км/с. Мощность слоя от 0 до 3 м;

- второй слой – глинистое тело оползня с верхним слоем интенсивно разрушенных коренных пород. Характеризуется  $V_p \sim 0,8 - 1,4$  км/с и  $V_s \sim 0,15 - 0,3$  км/с. Мощность слоя 4 - 8 м с увеличением в районе прослеживания тектонического нарушения;

- третий слой, исходя из его характеристик, может представлять собой зону выветривания коренных пород с глинистым заполнителем пор и трещин. Характеризуется  $V_p \sim 1,6 - 2,2$  км/с и  $V_s \sim 0,3 - 0,55$  км/с. Прослеживается на глубинах порядка 8 – 11 м.

Относительно «сохраненные» коренные породы на профиле прослеживаются не при каждом наблюдении (не хватает глубинности исследований, так как невозможно проложить более длинный профиль). Относительно «сохраненные» коренные породы характеризуются  $V_p \sim 2,4 - 2,7$  км/с и  $V_s \sim 0,6 - 0,9$  км/с.

По регистрируемым скоростям объемных волн и данным о плотностях рассчитывались динамические упругие параметры грунтов, и оценивалась динамика их изменений во времени. Более того массив сейсмических данных был разделен таким образом, чтобы появилась возможность рассчитать  $E_d$  (динамический модуль упругости) для отдельных горизонтов массива (рис. 4.1.41). С помощью этой процедуры удалось выделить сейсмический горизонт, в котором происходят наиболее значительные изменения сейсмических, а равно и физико-механических свойств массива.

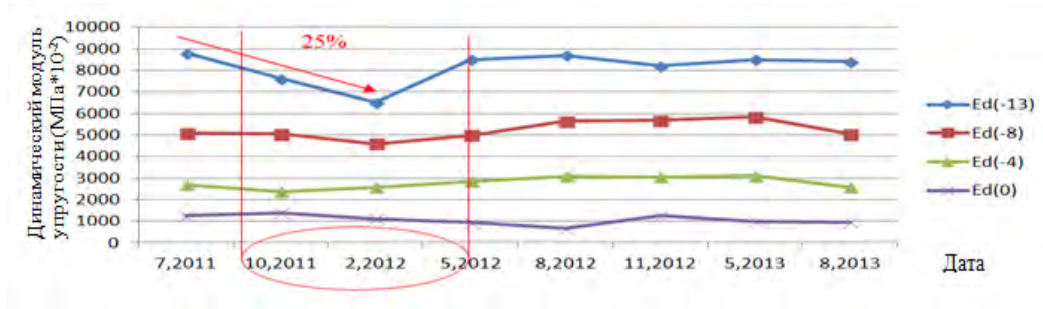


Рисунок 4.1.41 – График изменения значений динамического модуля упругости для различных сейсмических слоев массива.

По данным, представленным на графике видно, что наиболее значительные изменения происходят в интервале близком 13-ти метрам. С 07.2011 отмечается снижение значений модуля упругости. Минимальные отклонения (снижение модуля упругости) отмечаются в период ~ 02.2012 после чего значения упругих параметров постепенно увеличивается и приближается к исходным значениям. Отмеченное максимальное отклонение находится в пределах ~ 25% от среднего средневзвешенного уровня  $E_d$  в период нормализации массива.

Обладая целым комплексом данных геотехнического мониторинга, характеризующих состояние исследуемого массива и исходными сейсмическими записями, у автора появилась возможность проверить возможности многоканального дисперсионного анализа поверхностных волн для задач оценки состояния устойчивости оползневого массива.

Результаты многоканального дисперсионного анализа поверхностных волн:

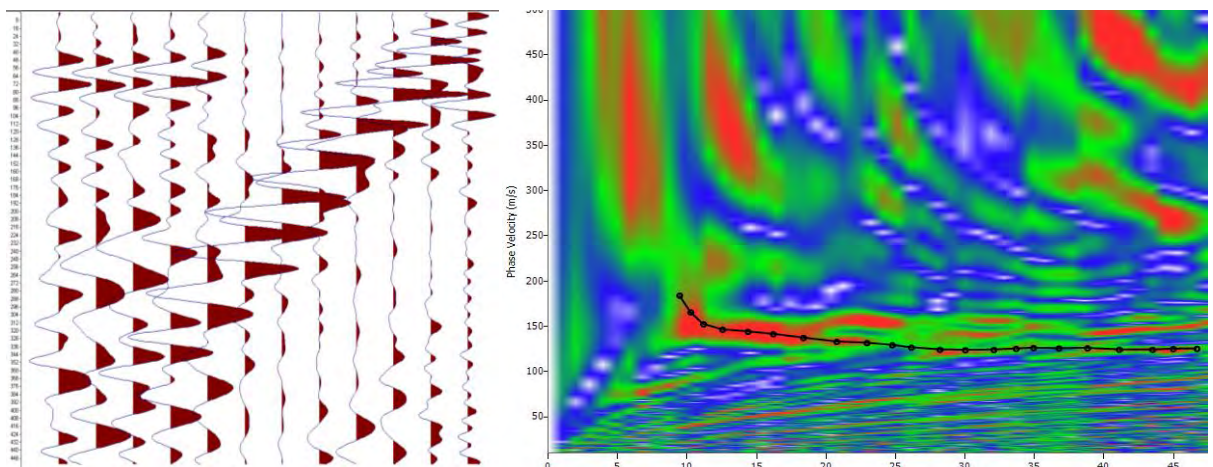


Рисунок 4.1.42 – Сейсмограмма, полученная 08.2011 и рассчитанное дисперсионное изображение.



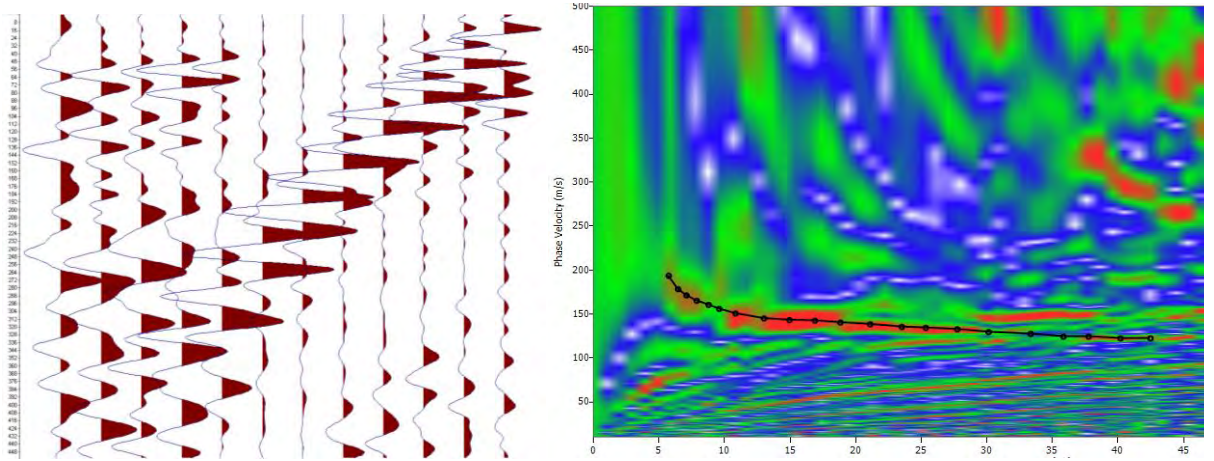


Рисунок 4.1.43 – Сейсмограмма, полученная 10.2011 и рассчитанное дисперсионное изображение.

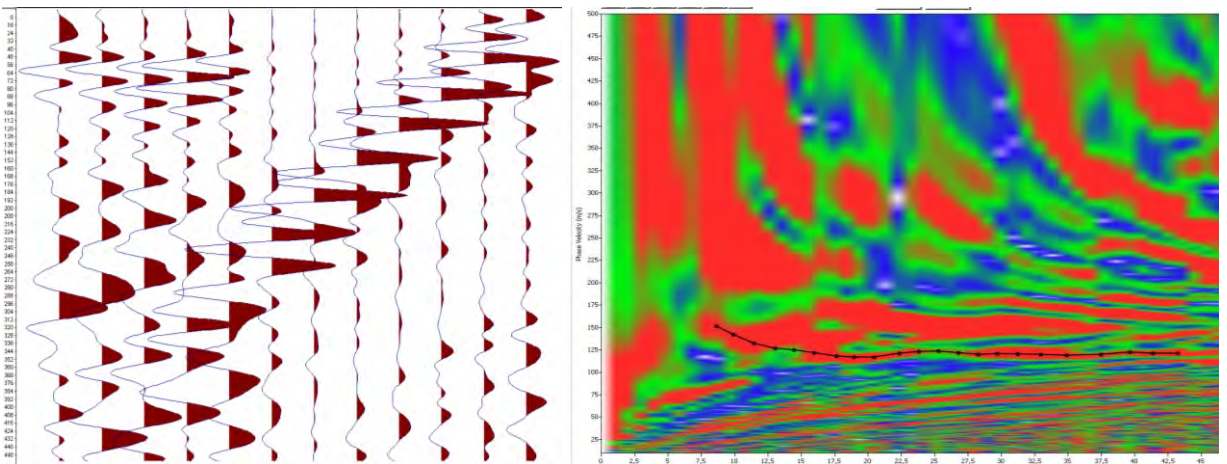


Рисунок 4.1.44 – Сейсмограмма, полученная 02.2012 и рассчитанное дисперсионное изображение.

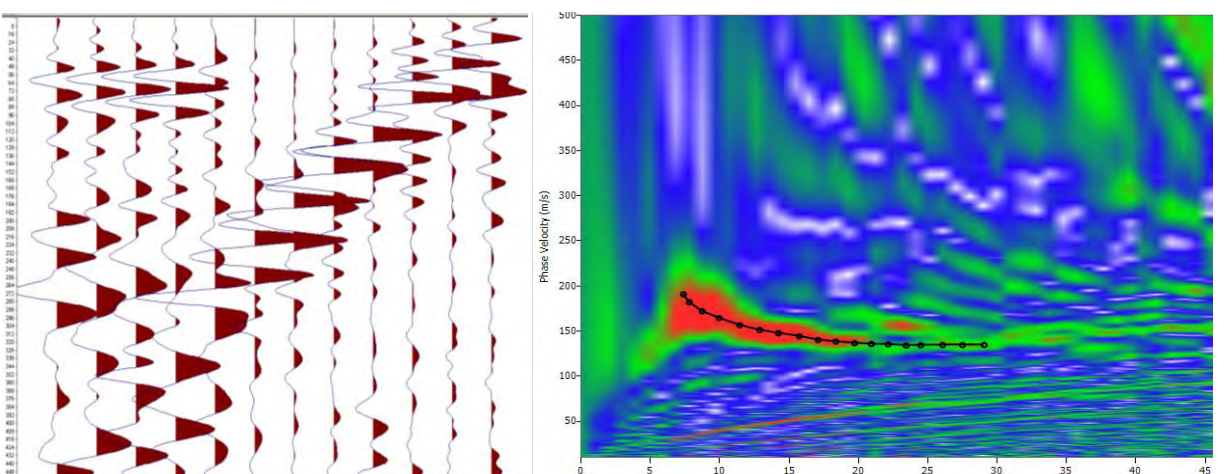


Рисунок 4.1.45 – Сейсмограмма, полученная 05.2012 и рассчитанное дисперсионное изображение.



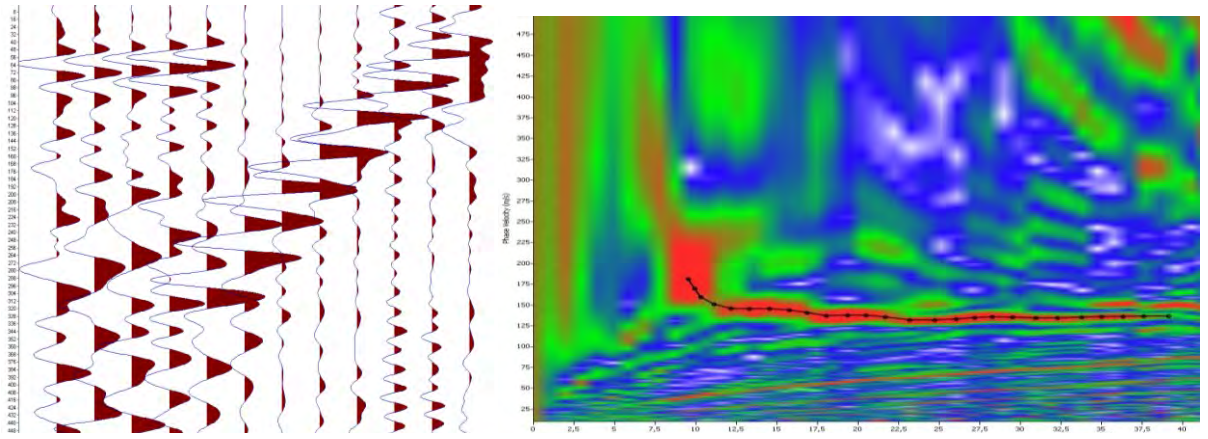


Рисунок 4.1.46 – Сейсмограмма, полученная 08.2012 и рассчитанное дисперсионное изображение.

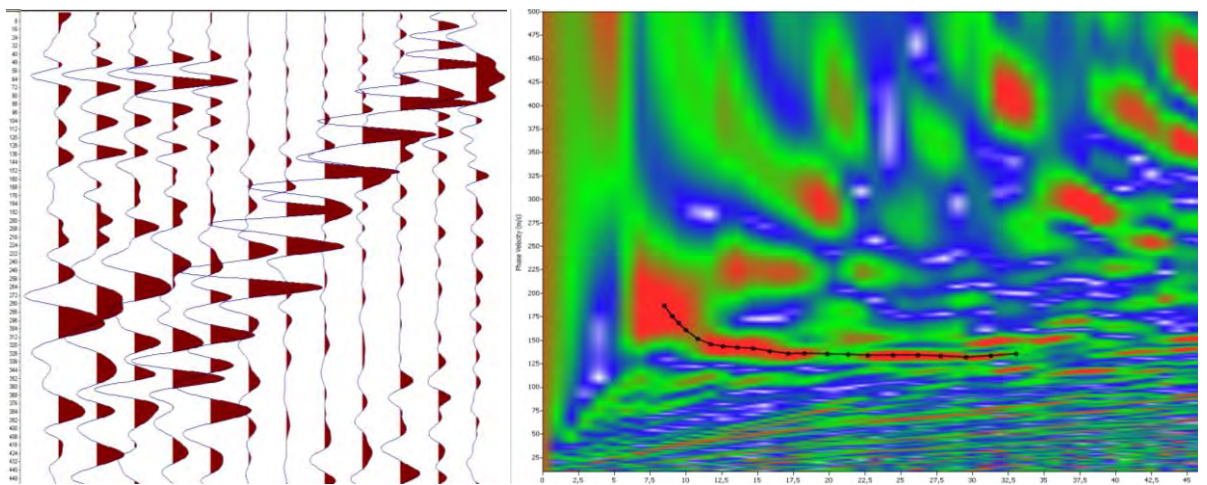


Рисунок 4.1.47 – Сейсмограмма, полученная 11.2012 и рассчитанное дисперсионное изображение.

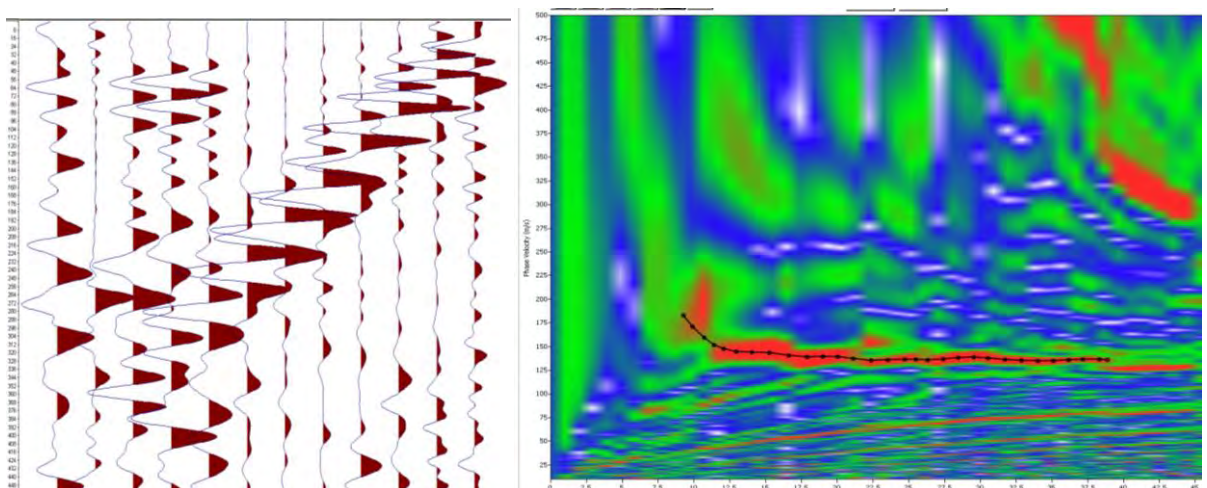


Рисунок 4.1.48 – Сейсмограмма, полученная 05.2013 и рассчитанное дисперсионное изображение.

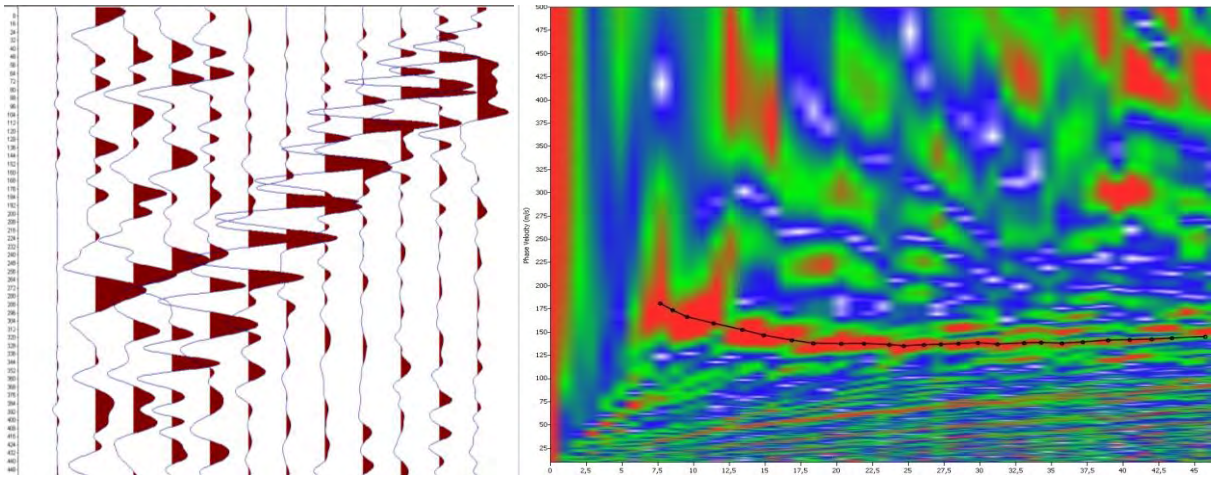


Рисунок 4.1.49 – Сейсмограмма, полученная 08.2013 и рассчитанное дисперсионное изображение.

Полученные дисперсионные кривые (рис. 4.1.42 - 4.1.49) были наложены на одну область, после чего производилось сравнение (рис.4.1.50).

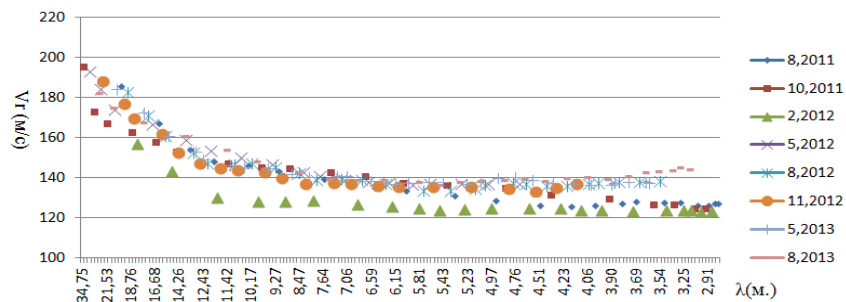


Рисунок 4.1.50 – Сводное изображение всех дисперсионных кривых.

Принимая во внимание, что в данном случае нам интересен интервал глубин 8-13 метров, который включает основные потенциальные поверхности скольжения, для последующего анализа оставим только интервал с некоторым запасом  $\lambda \sim 5-17$ м. (рис. 4.1.51).

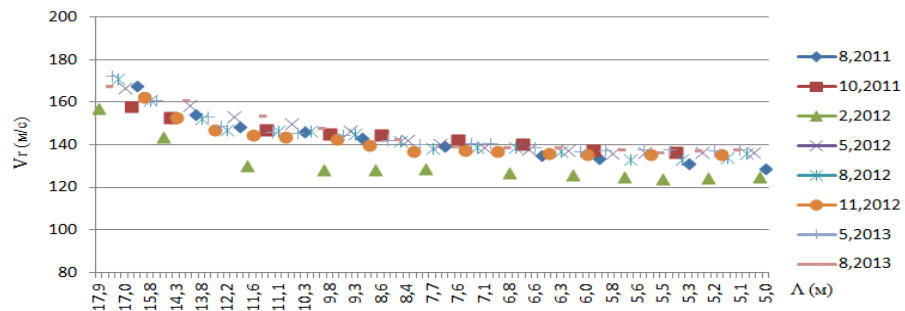


Рисунок 4.1.51 – Сводное изображение всех дисперсионных кривых в окне  $\lambda \sim 5-17$ м.

Для количественной оценки отклика дисперсионных кривых на изменения в массиве был произведен расчет отклонений дисперсионных кривых (разностных кривых), выраженных в процентном соотношении относительно кривой, характеризующей первоначальное состояние для каждой точки соответствующей  $\lambda$  - длины волны (рис.4.1.52).

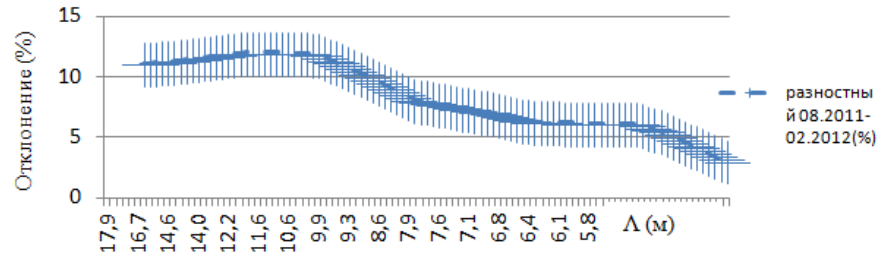


Рисунок 4.1.52 – Отклонение дисперсионной кривой, полученной 02.2012 от кривой, полученной 08.2011 (окно мониторинга 5-17м.).

Кривая 08.2011-02.2012 характеризует смещение дисперсионной кривой в интервале времени между августом 2011 и февралем 2012 года. В этот период времени происходит достаточно интенсивное снижение скоростных характеристик фазовых скоростей поверхностных волн на 12%. В высокочастотной области (наименьшие длины волн) отмечаются не такие значительные изменения (в пределах 3-6%). Наибольшие изменения скоростного режима в массиве произошли на глубине ~ 9-12м.

Аналогично разделу 4.1.1 для сравнения дисперсионных кривых был использован оконный тип мониторинга (рис.4.1.53).

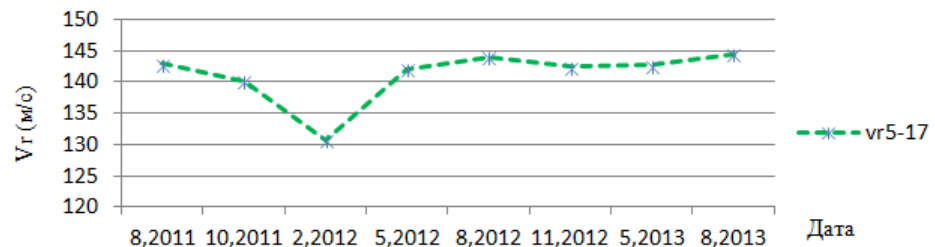


Рисунок 4.1.53 - График изменения скоростного режима  $V_r$  в мониторинговом окне 5-17м.

Получившийся график изменения скоростного режима  $V_r$  во времени можно сравнить с ранее представленным графиком изменения модуля упругости во



времени, полученного по данным проведенной традиционной сейсморазведки методом МПВ (рис. 4.1.54).

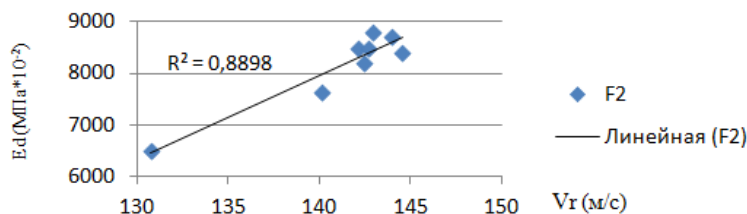


Рисунок 4.1.54 – Расчет коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$  (между параметрами  $V_r$  и данными  $E_d$ ).

Рассчитанный коэффициент достоверности аппроксимации (рис. 4.1.54) показал высокие значения  $R \sim 0,88$ , что позволяет судить о взаимокоррелируемости представленных методов.

#### 4.1.3. Выводы по результатам, полученным при мониторинговых работах на поверхности при изучении оползневых процессов

Результаты мониторинговых экспериментов, полученных на реальных оползневых склонах, показали неплохую корреляцию между данными изменения параметров, а именно: дисперсионных параметров поверхностных волн; изменением динамического модуля упругости, рассчитанного по данным традиционной сейсморазведки МПВ; данными о реальных смещениях в массиве, регистрируемых прямыми методами и данными НДС обделки тоннеля. Коэффициент достоверности между изменениями параметров  $E_d$ , рассчитанных по данным традиционной сейсморазведки МПВ и параметров изменений частотно-скоростных характеристик поверхностных волн, для первого случая составил  $R^2=0.84$ , для второго случая -  $R^2=0.88$ . Если учитывать, что для расчетов  $E_d$  и для расчета дисперсионных кривых использовался один первичный сейсмический материал в виде зарегистрированных сейсмограмм, полученные параметры, при условии состоятельности методик, должны соответствовать друг другу.

С помощью кривых отклонений отмечаются основные изменения состояния исследуемого массива. При этом достаточно удобно и информативно определяется область массива, в которой происходит изменение скоростных характеристик и соответственно изменение физико-механических свойств слагающих пород. Также методика отображений разностных кривых позволяет отслеживать динамику развития неблагоприятных глубинных горизонтов, к которым можно в случае исследования оползней отнести зону вмещающую поверхность скольжения и резервную зону как по скоростным характеристикам, так и по мощности этой зоны.

Для сравнения большого количества дисперсионных кривых, автором в ходе эксперимента предложен оконный способ анализа, который представляет собой оценку средних скоростных характеристик в определенном окне. В данном случае параметры окна задаются исходя из известных данных о расположении зон, вмещающих потенциальную поверхность смещения и резервную зону.

Динамический модуль сдвига, полученный в результате расчета на основе данных о скоростях поверхностных волн, показал существенные изменения прочностных характеристик массива в результате оползневых процессов. При этом сами оползневые деформации были подтверждены прямыми методами контроля.

#### **4.2. Результаты мониторинговых наблюдений, полученные внутри горных выработок на примере участка Петербургского метрополитена**

При разработке стратегии освоения и использования подземного пространства городских инфраструктур, а также наземного строительства, серьезное значение имеет анализ его геоэкологического состояния и влияние на физико-механические свойства грунтов (особенно генетически прочных) дестабилизирующих факторов.

Следует отметить, что подземное пространство Санкт-Петербурга и его окрестностей отличается крайней неоднородностью как структурно-тектонических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий, так характером и длительностью его контаминации.

Присутствие палеодолин в подземном рельефе кровли коренных пород во многом определяет специфичность разреза четвертичной толщи и гидрогеологической обстановки. В зависимости от подземного рельефа поверхности коренных пород мощность четвертичных отложений неравномерна: вне палеодолин она составляет 20-30м, а в тальвеговых зонах палеодолин возрастает до 120м, в пределах которых отмечается полный диапазон четвертичных стратиграфо-генетических комплексов и наличие нескольких напорных водоносных горизонтов. В погребенных долинах формируются особые условия для аккумуляции загрязнений, глубокого преобразования состава подземных вод, а также негативной трансформации песчано-глинистых отложений.

Следует отметить, что наиболее выдержанным, четко прослеживаемым по всей территории города является верхний горизонт морены последнего оледенения. Они характеризуются неоднородным гранулометрическим составом, высокой плотностью, относительно невысокой влажностью, которая обычно коррелирует с содержанием глинистой фракции и устойчивой консистенцией. Согласно ТСН 50-302-96, Санкт-Петербург, 1997 для таких типов отложений рекомендуются высокие параметры прочности и деформационной способности [115,116].

#### **4.2.1. Результаты эксперимента на участке №1 (пк181)**

Сейсмоакустический мониторинг для контроля свойств вмещающих тоннель грунтов осуществляется с 2004 года с момента, когда были запущены в эксплуатацию новые обходные аварийный участок тоннели и производится по настоящее время.

В рамках мониторинга осуществляется сейсмопрофилирование на постоянно закрепленной приемной линии для контроля степени разжижения грунтов вокруг тоннеля.

Геологи пришли к выводу, что при развитии мульды сдвижения, может происходить разжижение - разбухание глинистых вмещающих грунтов в устойчивой части массива (с естественным понижением скоростных характеристик).

Поэтому необходимо вести контроль за состоянием заобделочного пространства тоннеля в процессе его эксплуатации, чтобы избежать возможных аварийных ситуаций.

В соответствии с инструкцией: "Инструкция по геотехническому мониторингу состояния грунтов и обделки перегонных тоннелей от ст. "Лесная" до ст. "Площадь Мужества" в период эксплуатации. 2004", которая была выпущена совместно различными организациями (ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс", ООО ТЦ "Омега", ЗАО "Сооружения", НПФ "Гидрострим", НПФ "Геодизонд"), были выбраны критерии, указывающие на возникновение опасной ситуации, среди которых являлось снижение скорости поперечной волны в грунтах ниже 200 м/с.[6].

Достоверность результатов сейсмоакустического исследования методом дисперсионного анализа поверхностных волн оценивалась по полученным скоростным характеристикам методами сейсмического каротажа и сейсмодосвечивания, выполненных на участке исследования. Сравнение результатов вышеперечисленных методов показали совпадение с достаточно высокой точностью. (Отчет о межскважинном сейсмопрофиле на участке "Размыв" I линии метрополитена г. Санкт-Петербург" - ОАО "НИПИИ "Ленметрогипротранс", ООО "НИИП "Инженерная геофизика"- 2003 г.).

Скорости регистрируемых объемных волн поперечного типа в зоне расположения участка мониторинга в ближней зоне к расположению тоннеля для песков, в том числе пылеватых (подверженных разжижению), находятся в интервале 300-650 м/с, а вмещающие глинистые грунты характеризуются скоростями в интервале 500-800 м/с в зависимости от удаленности от обделки тоннеля.

На рисунке 4.2.1 приведен фрагмент "исполнительной геологии" на участке мониторинга "Размыв", который впоследствии контролируется сейсмоакустическими наблюдениями в течение более 10 лет.

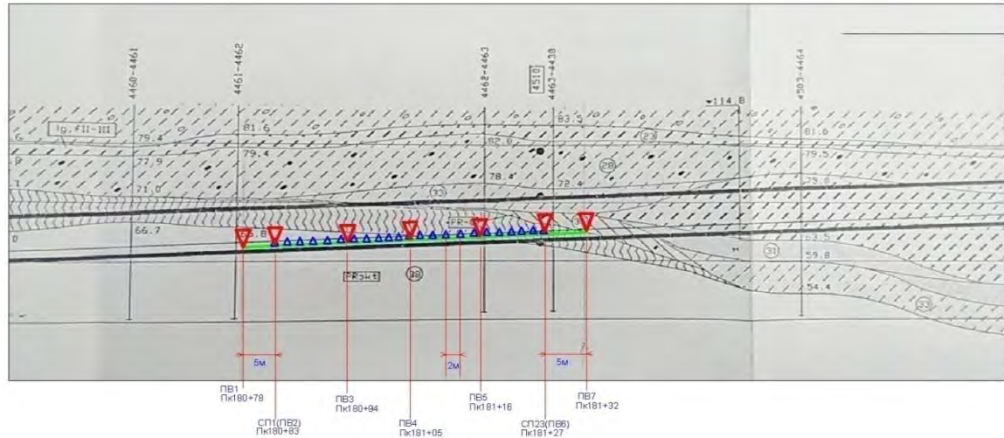


Рисунок 4.2.1- Геологическое описание (исполнительная геология) участка "Размыв" Санкт-Петербургского метрополитена. Пк180+78 - Пк181+32.

Жирными черными линиями на рисунке показаны границы свода и основания тоннеля.

Геология исследуемого участка:

Верхне-среднечетвертичные отложения. Межледниковые отложения – lg, fII-III

23- Суглинок серого и коричневатого-серого цвета, ленточный, мягкопластичной консистенции.

Среднечетвертичные отложения. Отложения московской морены- gIIms

28- Суглинок серого, зеленовато-серого, и коричневатого-серого цвета, с включениями гравия и гальки в количестве от 20 до 30%, с отдельными валунами, с гнездами песка, от тугопластичной до твердой консистенции.

Межморенные отложения- lg, fII

31- Песок серовато-коричневого цвета, мелкий, средней плотности сложения, с гнездами и прослоями суглинка зеленовато-серого цвета мягкопластичной консистенции. (Плотность = 1,9 т/м).

33- Супесь серого и зеленовато-серого цвета, слоистая, с прослоями пылеватого песка и суглинка, пластичной и твердой консистенции. (Плотность = 2,1 т/м).

Отложения переходного слоя – PR-Q

36- Глина зеленовато-серого цвета, с включениями гравия и гальки в количестве 15-20%, с отдельными валунами, с включением песчаника на глинистом

цементе весьма низкой прочности, полутвердой, реже- тугопластичной консистенции. (Плотность = 2,1 т/м).

#### Верхнепротерозойские отложения Котлинский горизонт- PR3kt

37- Глина зеленовато-серого цвета, с переменной слоистостью, с гнездами алеврита, твердой консистенции (дислоцированная глина PR3kt) (Плотность = 2,1 т/м).

38- Глина зеленовато-серого цвета, тонкослоистая, аргиллитоподобная, твердой консистенции, с тонкими прослоями глинисто-мергелистого песчаника низкой прочности (Плотность = 2,2 т/м).

Стоит отметить наличие на разрезе пылеватых песков, которые характеризуются модулем деформации порядка 18 МПа (ИГЭ 32). Именно в интервалах пересечения пылеватых песков произошел прорыв пливуна в старые тоннели перегона ст. "Площадь Мужества"- ст. "Лесная" в момент известной аварии, которая произошла в 1995 году.

На рисунке 4.2.2 показан пример сейсмограммы, которая была получена на участке исследования. На сейсмограмме прослеживаются продольные волны, распространяющиеся исключительно по высокоскоростной железобетонной обделке тоннеля и продольные волны, распространяющиеся по вмещающему массиву. Фазы поперечной волны на сейсмограмме не прослеживается, но при этом прослеживаются достаточно интенсивные фазы поверхностной псевдорэлеевской волны. При этом видимая частота одной из фаз волны рэлеевского типа приближенно равняется 250 Гц, кажущаяся скорость волны с выдержанной частотой равна порядка 1200 м/с.

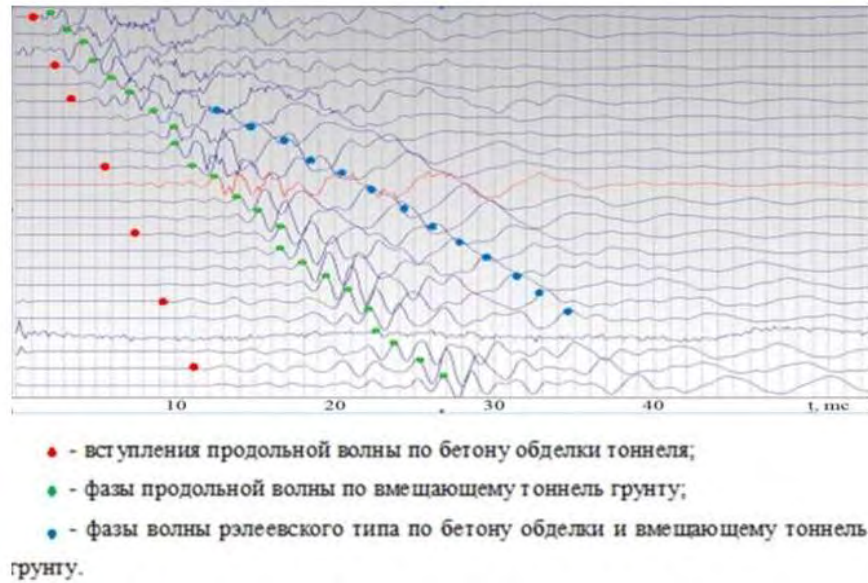


Рисунок 4.2.2 - Пример сейсмограммы полученной на мониторинговом участке (выделенные фазы волн).

На рисунке 4.2.3 показан пример сейсмотомографического разреза ( $V_p$ -продольная волна), полученного на участке мониторинга.

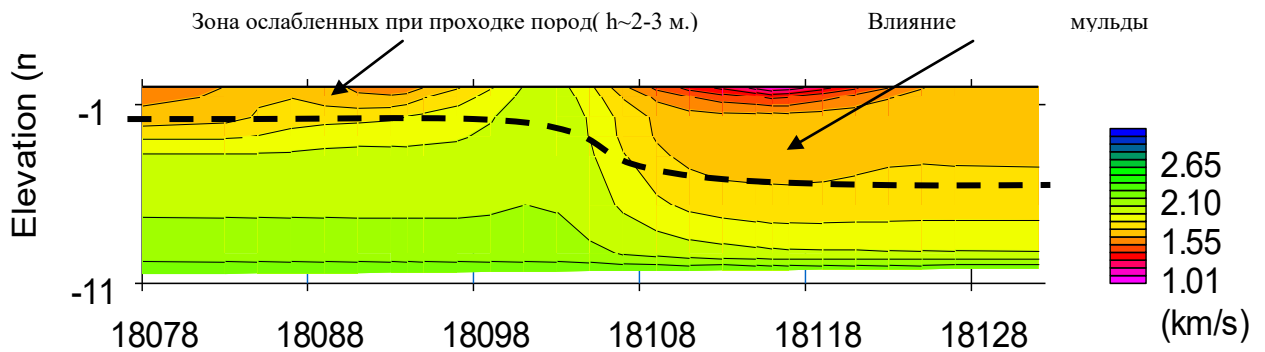


Рисунок 4.2.3 - Сейсмотомографический ( $V_p$ , продольная волна) разрез, полученный на мониторинговом участке.

Обработка полученных материалов осуществлялась с помощью модуля MASW, который присутствует во многих обрабатывающих программах, в том числе в программе RadexPro 2016 Professional. В процессе обработки на каждом этапе мониторинга по данным зарегистрированных сейсмограмм рассчитывались дисперсионные изображения, на которых аналитическим путем вручную пикировались в соответствии с инструкциями MASW дисперсионные кривые псевдорэлеевских волн. Пикирование дисперсионной кривой в данных работах осуществлялось весьма уверенно. Производилось по максимумам волнового числа и не вызывало сомнений. Стоит отметить, что при работах через высокоскоростную



обделку тоннеля дисперсионные кривые поверхностных волн получаются достаточно хорошего качества, и связано это с тем, что высокоскоростная обделка тоннеля является своего рода антиволноводом и способствует устранению большинства помех. В связи с хорошим качеством получаемого дисперсионного изображения при обработке материалов частотные фильтры не применялись, что является большим плюсом, и связано это с тем, что при фильтрации происходят всевозможные искажения первичного материала.

### **Анализ получаемых дисперсионных кривых на объекте метрополитена «Размыв» (Участок Пк 181)**

Мониторинговый профиль 181 располагается в интервале Пк180+83 - Пк181+27.

Пункты приема в количестве 23-х сейсмоприемников были расположены через 2 метра. Для данного анализа использовалась фланговая система возбуждений в пункте Пк180+83. Мониторинговые сейсмоакустические исследования методом дисперсионного анализ поверхностных волн на данном участке проводились на протяжении 6 лет с интервалом измерений полгода. Ниже представлены дисперсионные изображения, рассчитанные при каждом цикле измерений (рис.4.2.5-4.2.18). Сечение с расположением геофизического профиля показано на рисунке 4.2.4.

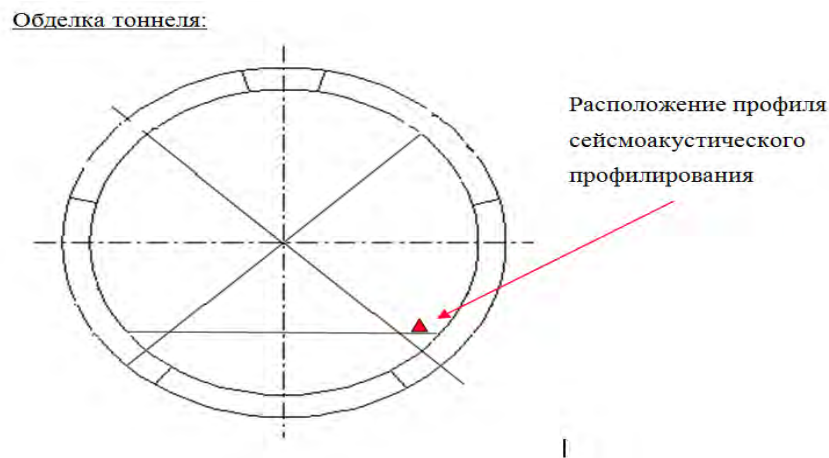


Рисунок 4.2.4 – Сечение обделки тоннеля с расположением геофизического профиля.

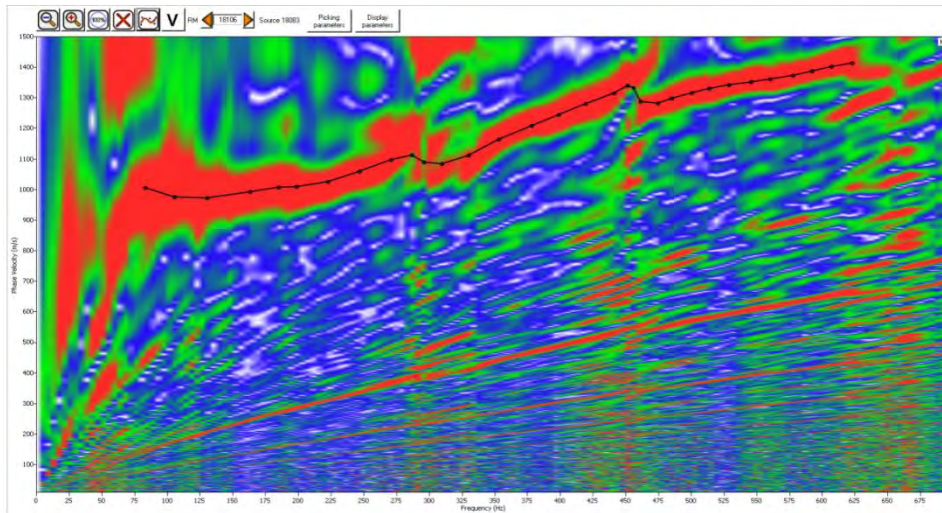


Рисунок 4.2.5 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 05.2010 г.

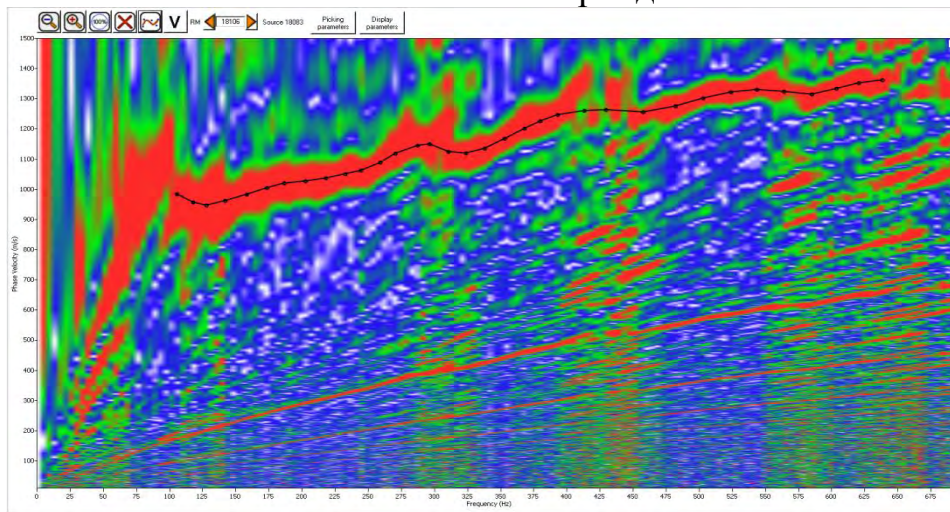


Рисунок 4.2.6 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2010 г.

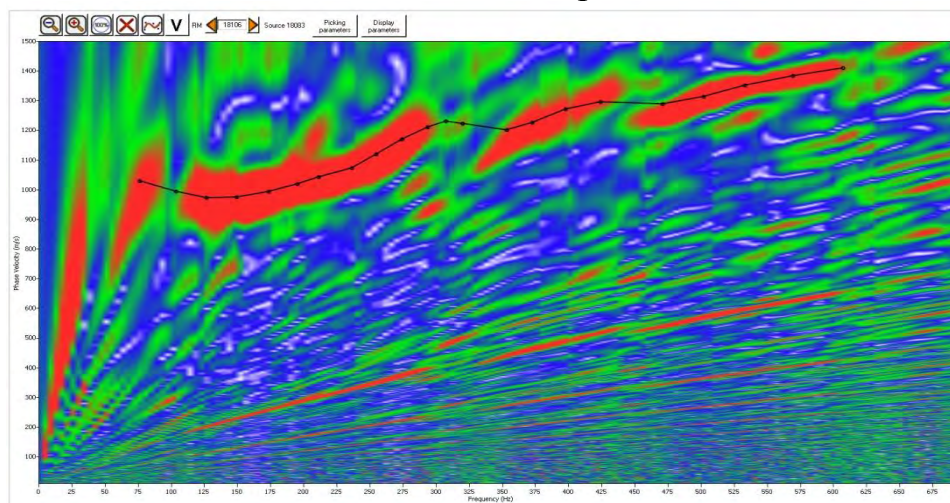


Рисунок 4.2.7 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 05.2011 г.



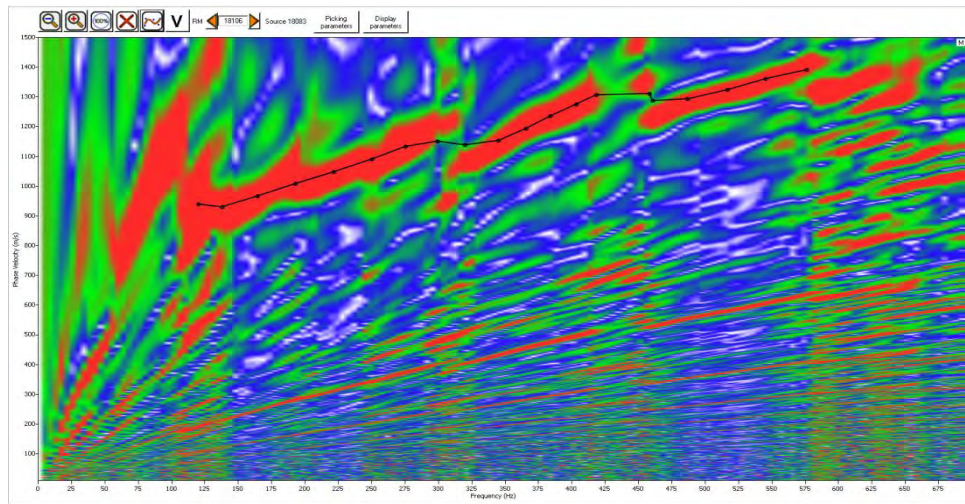


Рисунок 4.2.8 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2011 г.

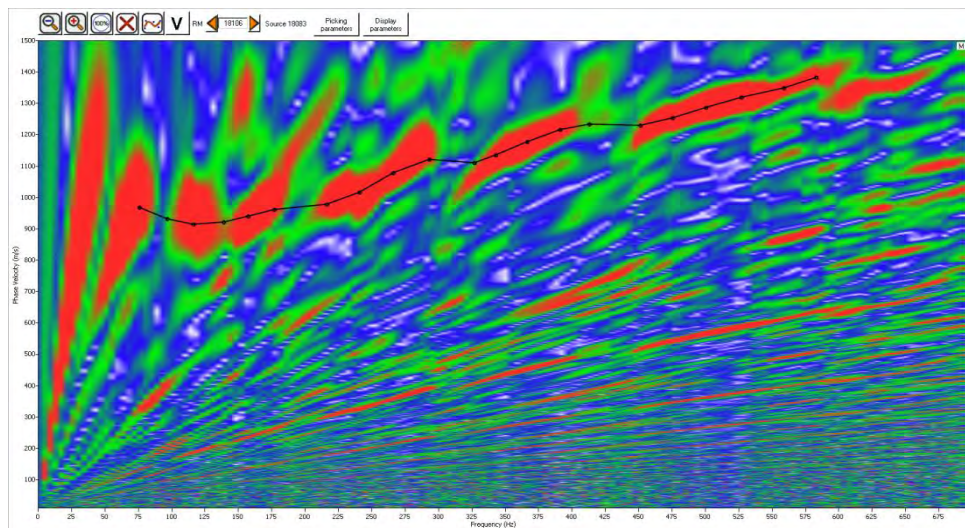


Рисунок 4.2.9 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 05.2012 г.

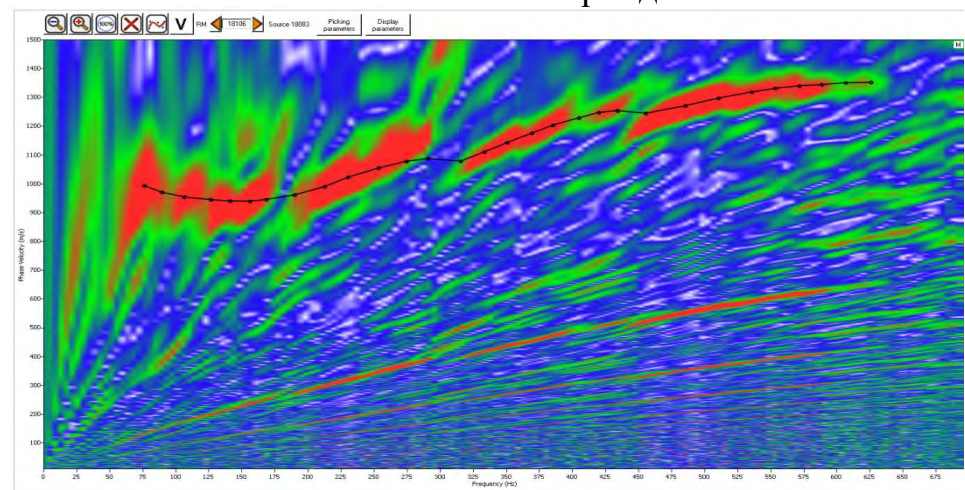


Рисунок 4.2.10 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2012 г.



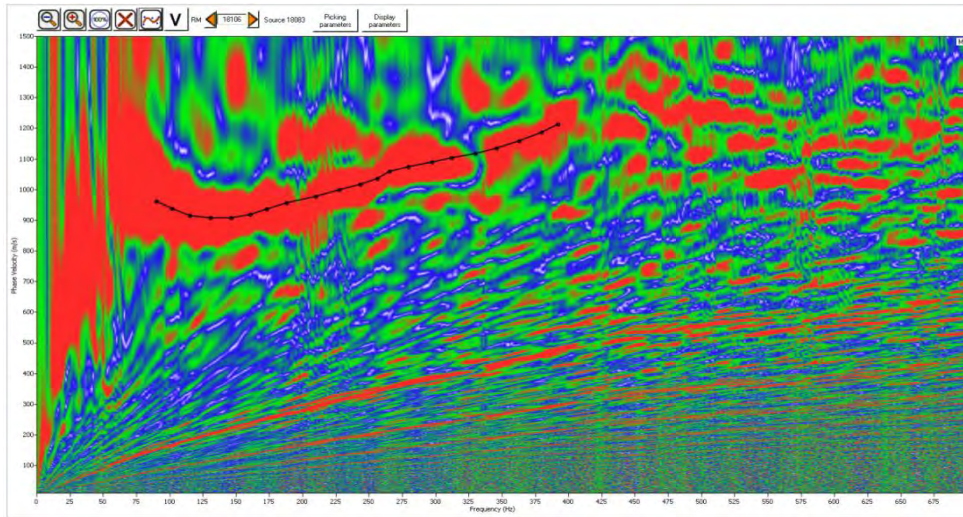


Рисунок 4.2.11 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 04.2013 г.

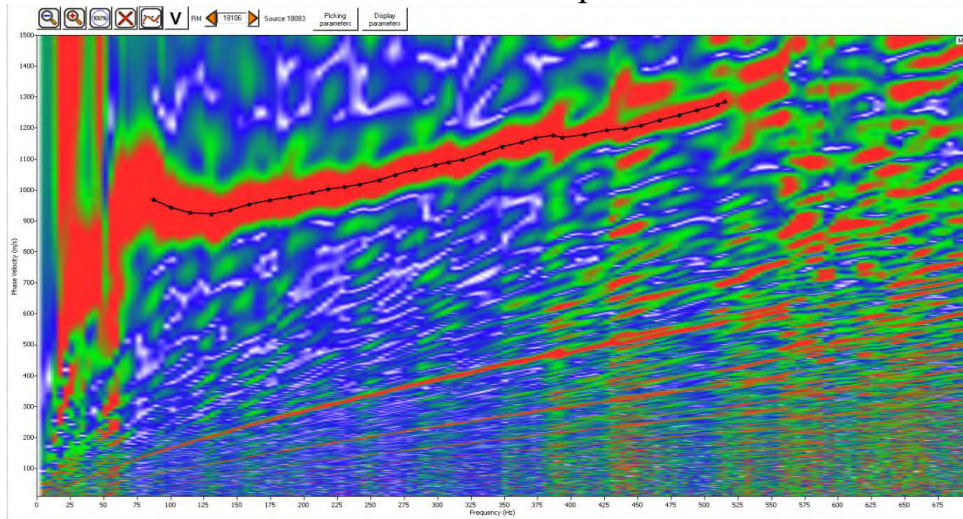


Рисунок 4.2.12 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2013 г.

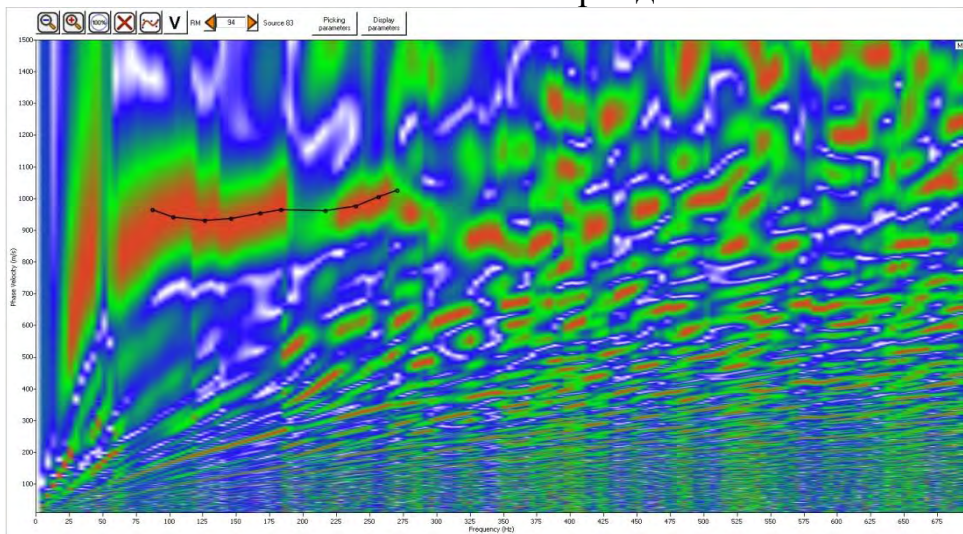


Рисунок 4.2.13 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 04.2014 г.



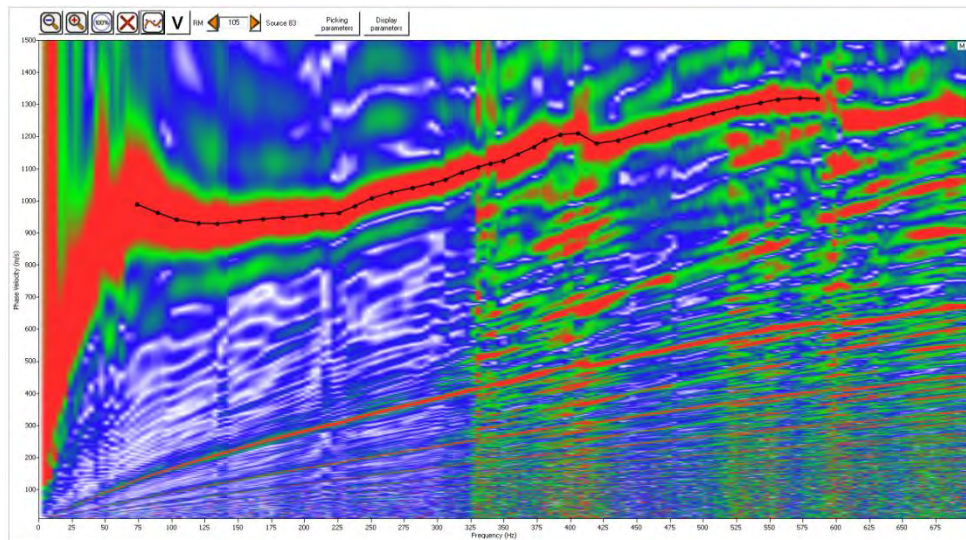


Рисунок 4.2.14 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2014 г.

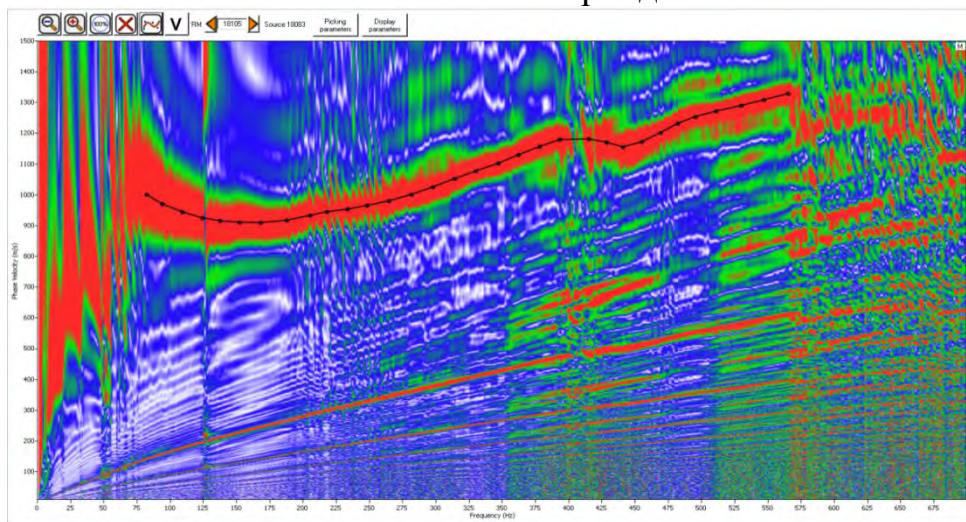


Рисунок 4.2.15 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 05.2015 г.

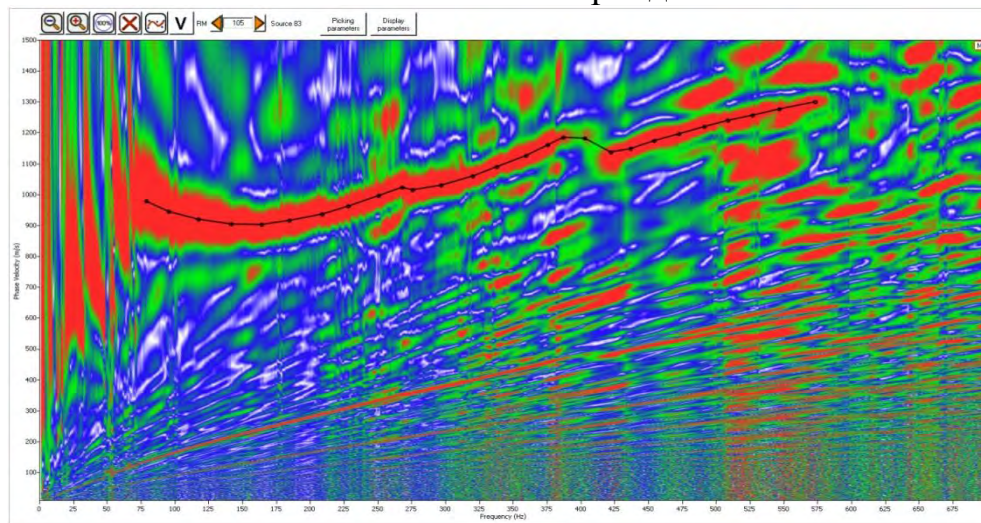


Рисунок 4.2.16 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2015 г.



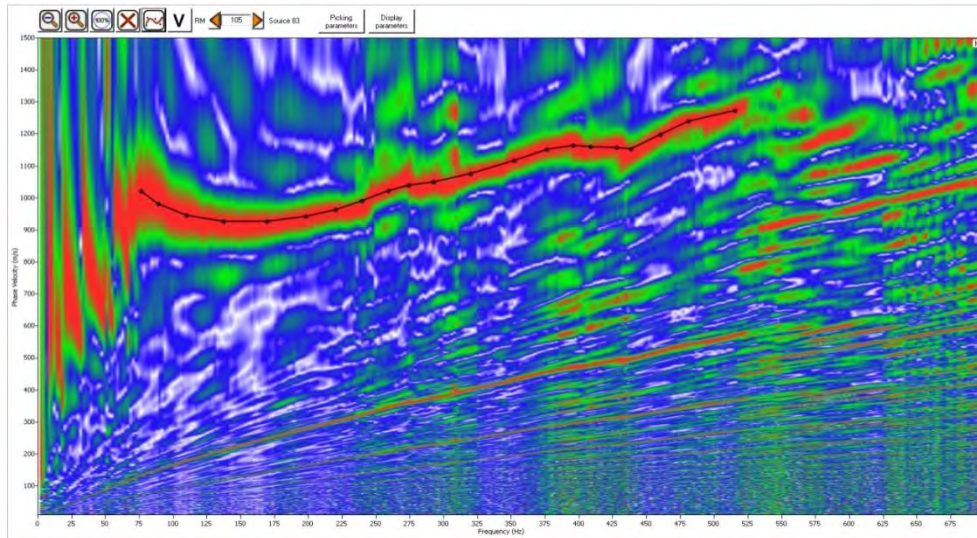


Рисунок 4.2.17 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 05.2016 г.

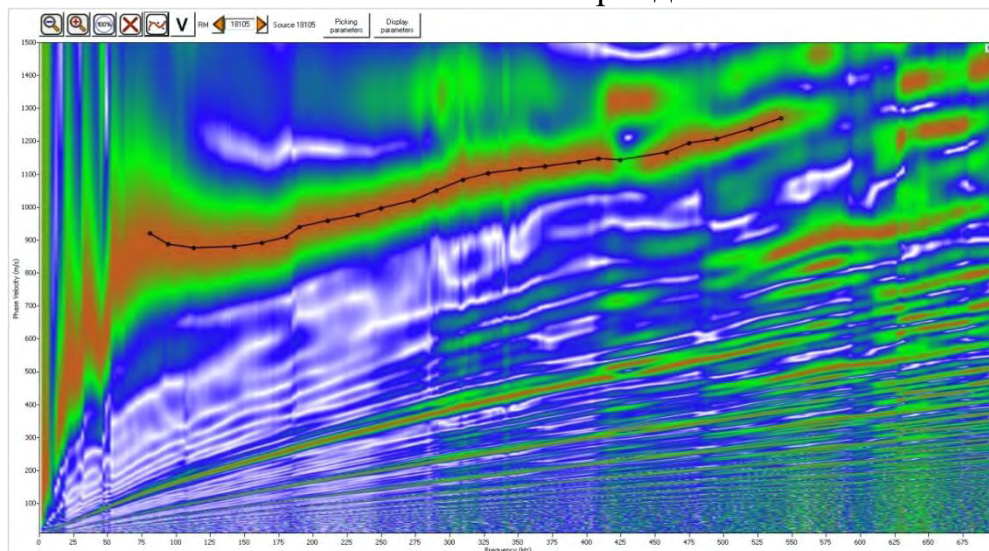


Рисунок 4.2.18 - Дисперсионное изображение, полученное на интервале Пк180+83 - Пк181+27. в период 10.2016 г.

Каждый цикл мониторинга включал работы по оценке изменений средних скоростей поверхностных волн в выбранном окне мониторинга, который соответствовал интервалу 0-5 метрам. Другими словами оценивались изменения, которые происходили в самой ближней к обделке тоннеля зоне. По результатам дисперсионного анализа для окна мониторинга строился график изменения средних скоростей поверхностных волн (рис. 4.2.19) для окна мониторинга  $\lambda \sim (0-5\text{м.})$ .

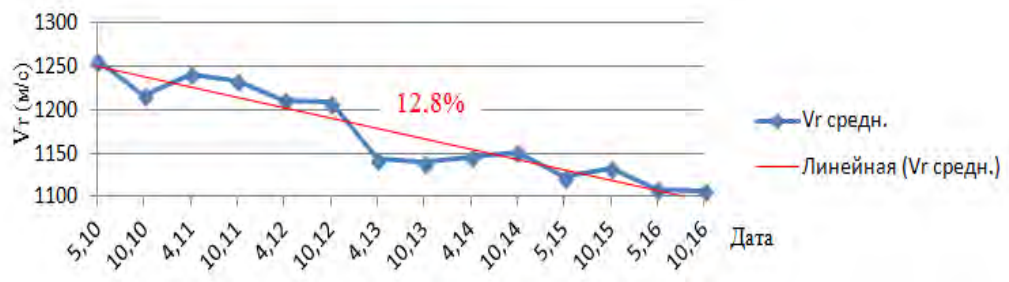


Рисунок 4.2.19 - График изменения средней скорости поверхностных волн для окна мониторинга ( $\lambda$ ) ~ 0-5 метров.

Изменение средних скоростей 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. Для того чтобы перейти к понятным геотехникам параметрам производится пересчет полученных данных в значения динамического модуля сдвига ( $G_d$ ). Для этого с помощью программы аналитического расчета  $V_s$  по известным дисперсионным кривым и известным параметрам обделки тоннеля (исполнительная документация конструкции обделки тоннеля) строится глубинный разрез распределения  $V_s$ , после чего рассчитывается график изменения  $V_s$  во времени (рис. 4.2.20).

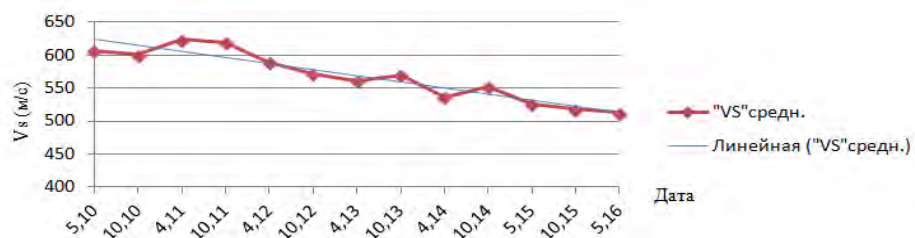


Рисунок 4.2.20 - График изменения средней скорости поперечных волн ( $V_s$ ) для окна мониторинга 0-5 метров.

Корректировка скоростей псевдорелеевских волн обусловлена тем, что данный тип волн распространяется, в первом приближении, со средневзвешенной по всем передающим данный волновой фронт разностям грунтов и материалов скоростью. Так как R-волна при своем распространении захватывает кроме вмещающих тоннель грунтов еще и бетон, увеличивающий ее скорость необходимо вводить в значение этой скорости соответствующую поправку для определения скорости волны по вмещающим тоннель грунтам. Данная поправка зависит, в



частности, от отношения мощности высокоскоростного слоя (бетона) и длины наблюдаемой волны ( $H/\lambda$ ). Таким образом, дополнительно необходимо определять видимую частоту волны релеевского типа на каждом участке, а также знать мощность бетонного слоя и его упругие характеристики ( $V_p$  и  $V_s$ ). В дальнейшем, зная скорости продольной и релеевской волны, можно рассчитать скорость поперечной волны во вмещающих тоннель грунтах.

Далее по известной зависимости рассчитывались значения  $G_d$ , и осуществлялось построение графика изменения  $G_d$  во времени (рис.3.2.21).

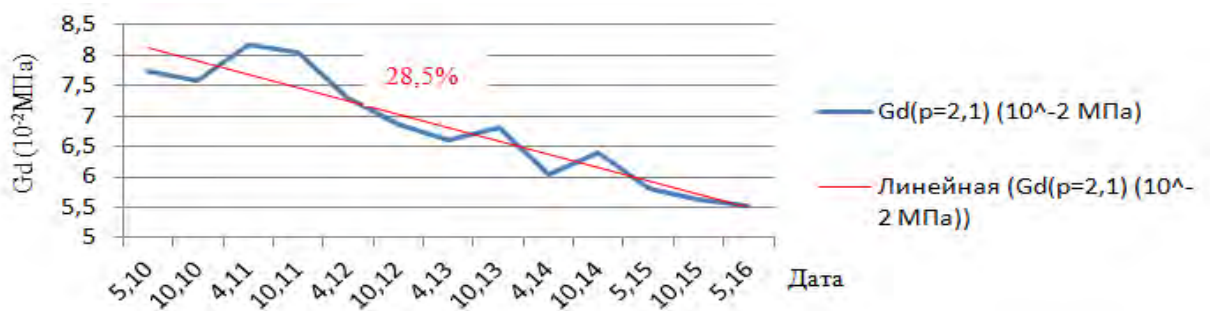


Рисунок 4.2.21 - График изменения модуля сдвига ( $G_d$ ) для окна мониторинга 0-5 метров.

В исследуемом тоннеле метро параллельно с сейсмоакустическими наблюдениями проводились наблюдения за напряженно-деформированным состоянием обделки тоннеля от статических нагрузок в плоскостях, перпендикулярной оси тоннеля и вдоль оси тоннеля (по встроенным в блоки обделки датчикам деформаций ПЛДС-400).

Измерительными датчиками были оснащены кольца на различных пикетах оси тоннеля, а в зону сейсмических исследований непосредственно входило кольцо №148 на Пк180+85,9. В каждом кольце датчиками были оснащены по четыре блока: В1, В2, С1 и С2 (всего 11 датчиков, из них: восемь штук – в направлении, перпендикулярном оси тоннеля, три штуки – в направлении вдоль оси тоннеля).

Кольца установлены в положении размещением замкового блока в щельге свода. Датчики пронумерованы в каждом кольце от №1 до №11 (условная нумерация рис. 4.2.22)

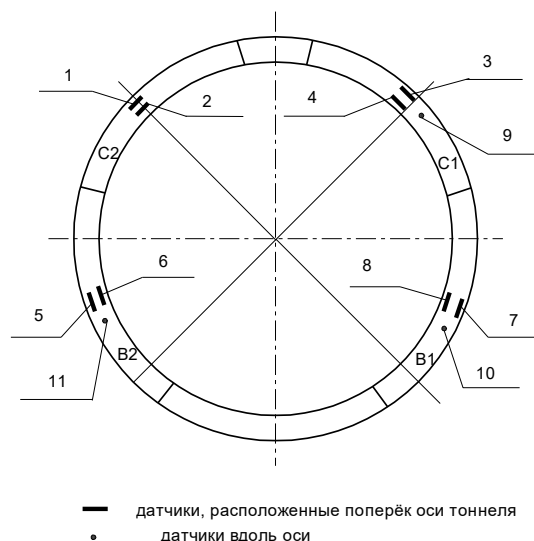


Рисунок- 4.2.22 - Схема установки датчиков в кольцах (замковый блок – вверху).

Результаты наблюдений за напряженно-деформированным состоянием обделки тоннеля представлены на рисунке 4.2.23. Детальный график изменения по датчику №6 показан на рисунке (4.2.24).

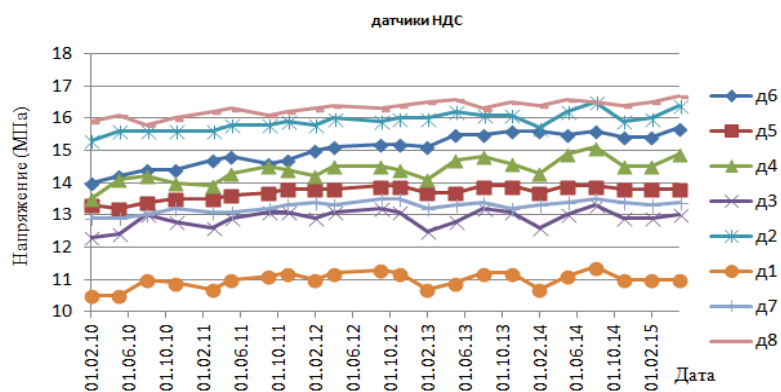


Рисунок- 4.2.23 - Изменение напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля по данным установленных на обделке тоннеля датчиков ПЛДС-400.

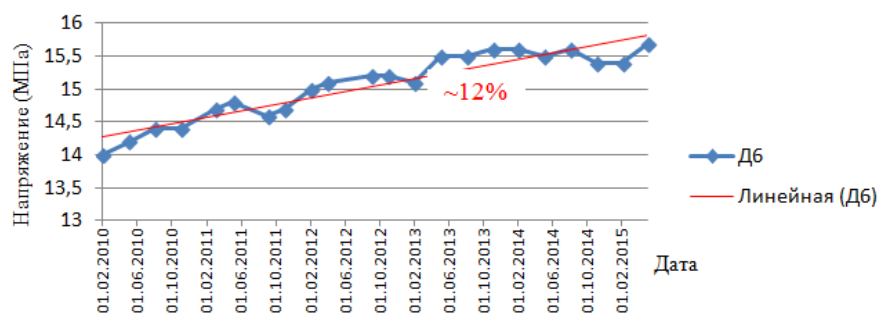


Рисунок- 4.2.24 - Изменение напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля по данным датчика №6.

Для оценки статистической взаимосвязи величин скорости поверхностных волн и значений напряжений, возникающих на обделке тоннеля, был рассчитан коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$ , который показывает степень соответствия трендовых изменений скоростных характеристик во вмещающем массиве и изменений НДС обделки тоннеля (рис. 4.2.25).

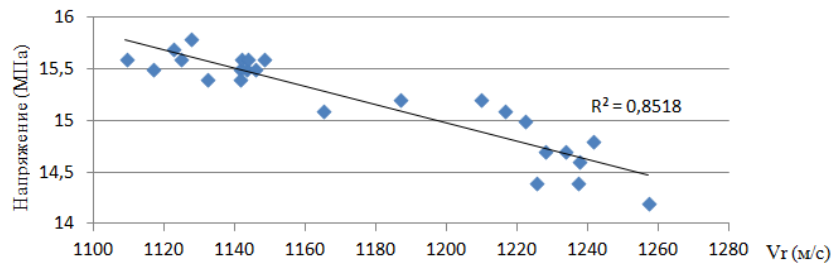


Рисунок 4.2.25 – Расчет коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$ .

Расчеты показали достаточно высокий коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 \sim 0,85$  между изменениями НДС обделки тоннеля и происходящими изменениями частотно-скоростных характеристик поверхностных волн.

#### 4.2.2. Результаты эксперимента на участке №2 (ПК185)

Мониторинговый профиль 185 располагался в интервале Пк184+94 - Пк185+48 (рис. 4.2.26). Пункты приема в количестве 23 сейсмоприемников расположены через 2 метра. Для данного анализа использовалась фланговая система возбуждений в пункте Пк185+48. Мониторинговые сейсмоакустические исследования методом дисперсионного анализа поверхностных волн на данном участке, также как и на участке ПК181, проводились на протяжении 6 лет с интервалом измерений полгода. Расположение геофизической приемной линии было аналогично участку Пк 181 (рис.4.2.4).

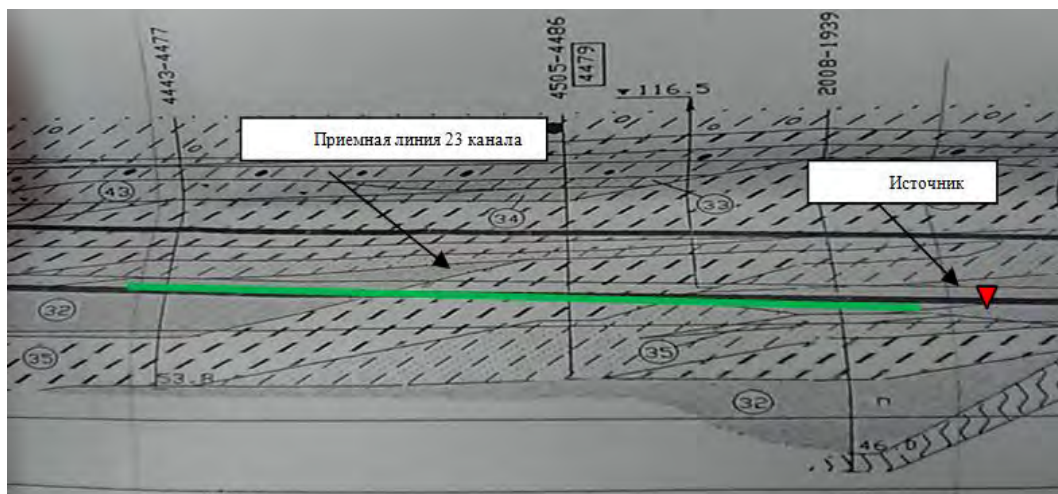


Рисунок 4.2.26 - Геологическое описание (исполнительная геология) участка "Размыв" Санкт-Петербургского метрополитена. Пк184+94 - Пк185+48. Жирными черными линиями на рисунке показаны границы свода и основания тоннеля.

Геология исследуемого участка:

Верхне-среднечетвертичные отложения. Межледниковые отложения – lg, fII-III

23 - Суглинок серого и коричневатого-серого цвета, ленточный, мягкопластичной консистенции.

Межморенные отложения-lg, fII

31 - Песок серовато-коричневого цвета, мелкий, средней плотности сложения, с гнездами и прослоями суглинка зеленовато-серого цвета мягкопластичной консистенции. (Плотность = 1,9 т/м);

32 - Песок серовато-коричневого цвета, пылеватый, средней плотности сложения, с гнездами и прослоями супеси и суглинка;

33 - Супесь серого и зеленовато-серого цвета, слоистая, с прослоями пылеватого песка и суглинка, пластичной и твердой консистенции. (Плотность = 2,1 т/м);

34 - Суглинок серого и коричневатого-серого цвета, неяснослоистый, с редкими включениями гравия, гальки и обломков кварцевого песчаника, с гнездами протерозойской глины, от тугопластичной до твердой консистенции;

35 - Суглинок зеленовато-серого и серовато-коричневого цвета, слоистый, от мягко-пластичной до твердой консистенции.

Сейсмотомографический разрез, представленный на рисунке 3.2.27, показывает структуру исследуемого массива по скорости распространения волн продольного типа ( $V_p$ - продольная волна).

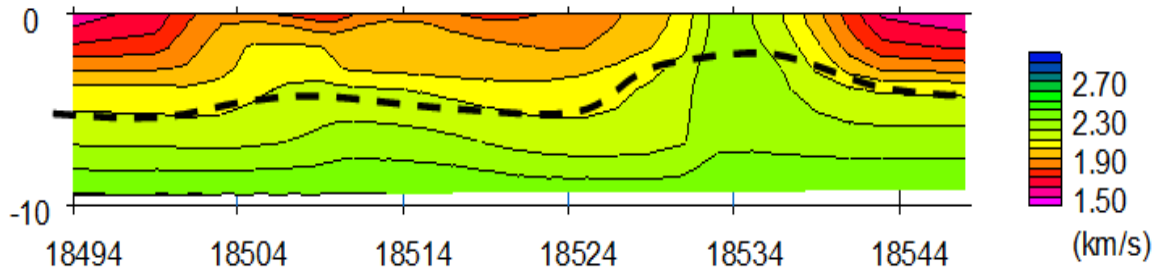


Рисунок 4.2.27 - Сейсмотомографический ( $V_p$ , продольная волна) разрез, полученный на мониторинговом участке.

На сейсмотомографическом разрезе отмечается достаточно выдержанная по горизонтали структура за исключением участка на Пк 185+34, который обусловлен выходом и переслаиванием суглинка и супеси.

Обработка полученных материалов аналогично осуществлялась с помощью модуля MASW. В процессе обработки на каждом этапе мониторинга по зарегистрированным сейсмограммам рассчитывались дисперсионные изображения, на которых аналитическим путем вручную пикировались дисперсионные кривые псевдорэлеевских волн (рис.4.2.28-4.2.41). Пикирование дисперсионной кривой при работах на данном участке также осуществлялось весьма уверенно. Дисперсионные кривые поверхностных волн получаются достаточно хорошего качества.

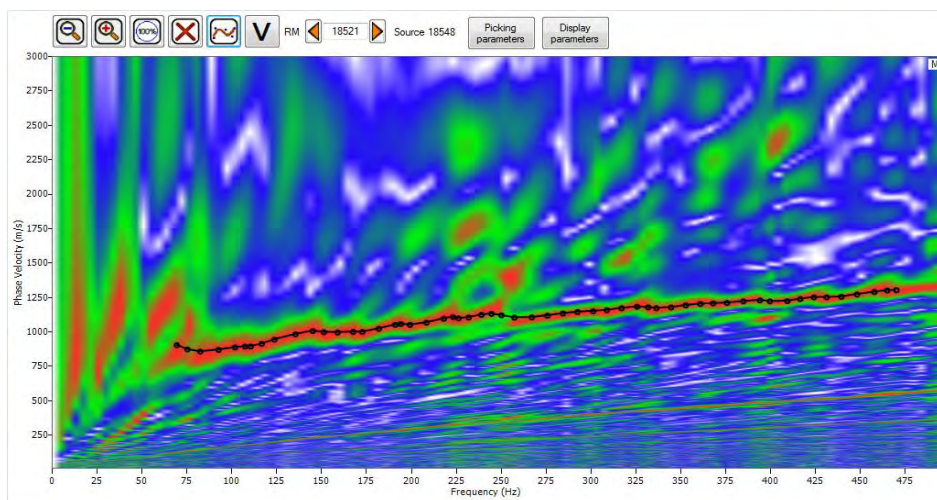


Рисунок 4.2.28 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2010 (Пк185).



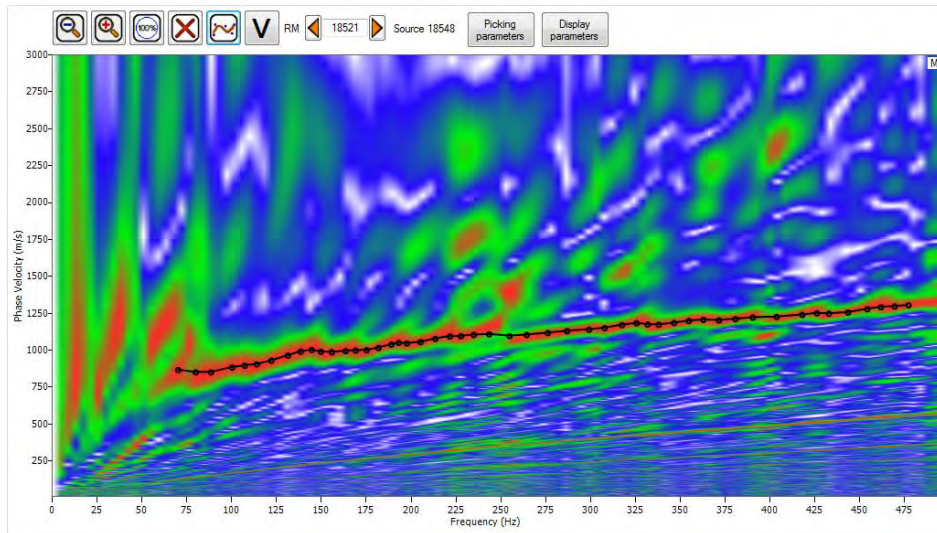


Рисунок 4.2.29 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2010 (Пк185).

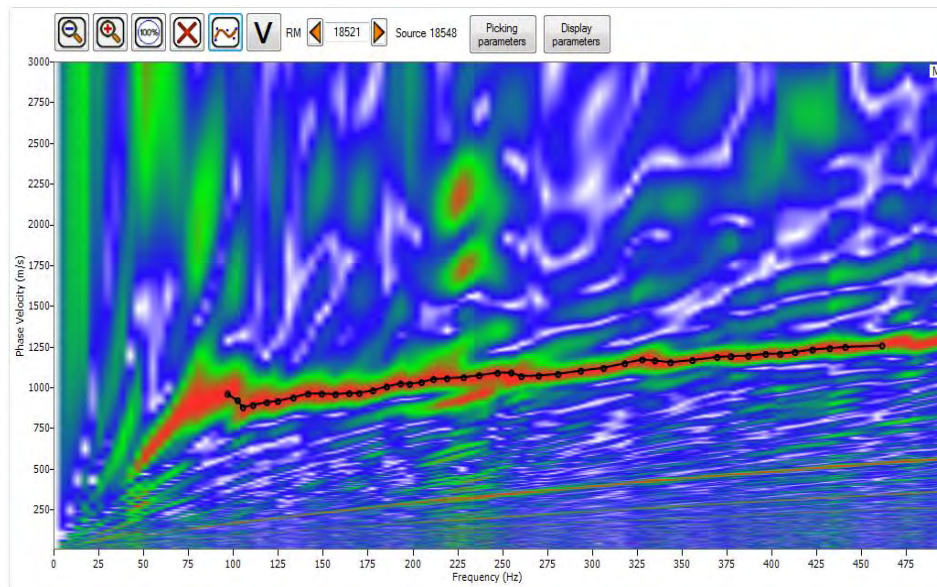


Рисунок 4.2.30 - Дисперсионное изображение полученное 05.2011 (Пк185).

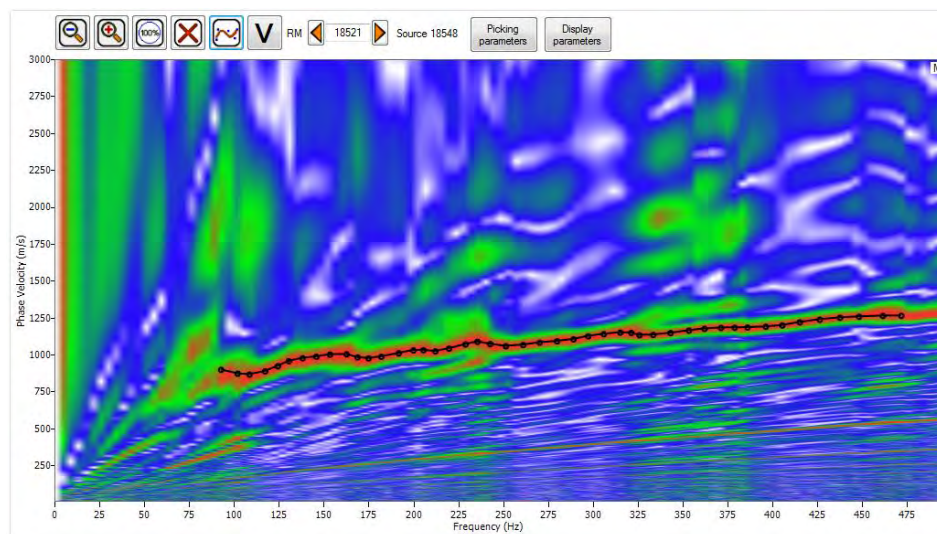


Рисунок 4.2.31 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2011 (Пк185).



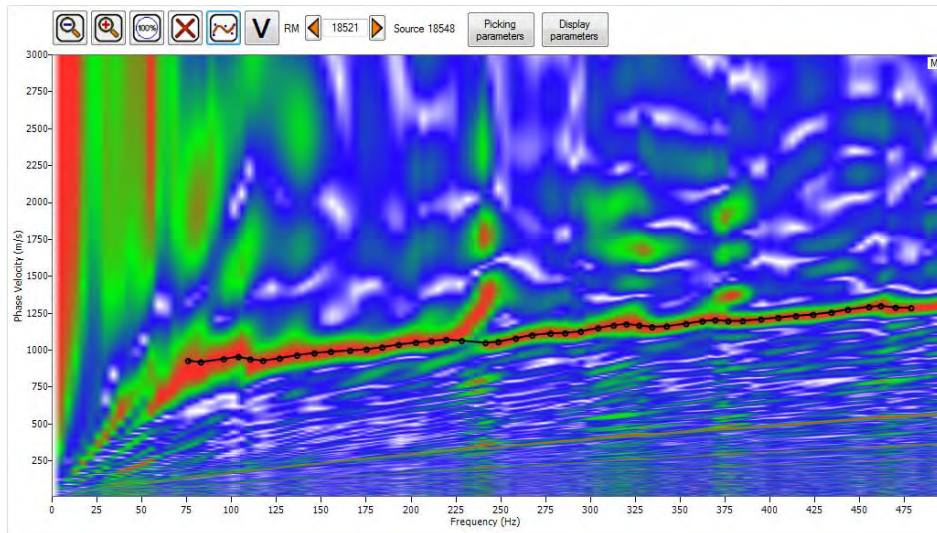


Рисунок 4.2.32 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2012 (Пк185).

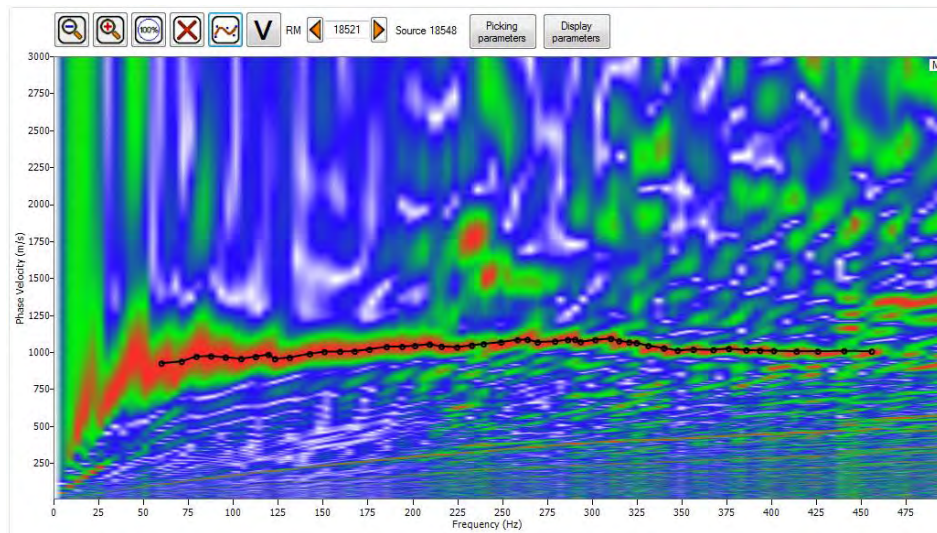


Рисунок 4.2.33 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2012 (Пк185).

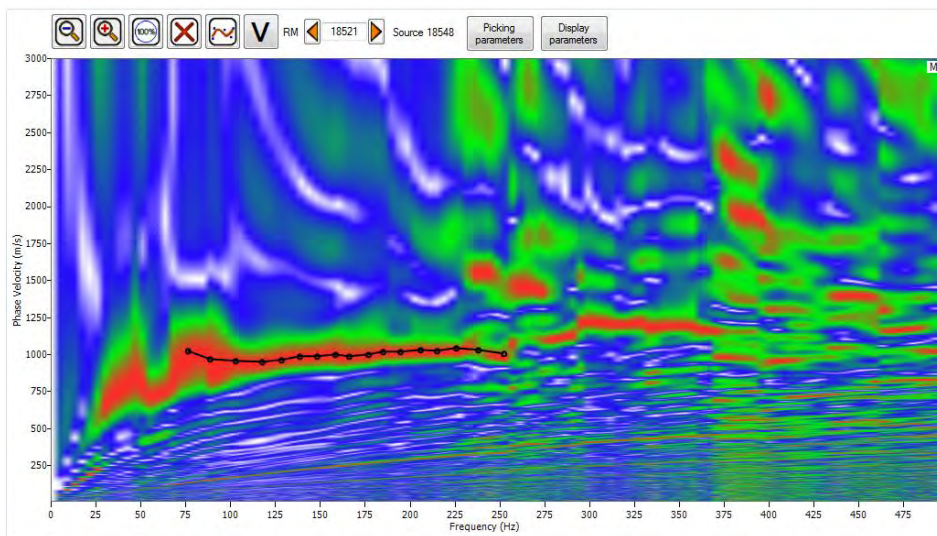


Рисунок 4.2.34 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2013 (Пк185).

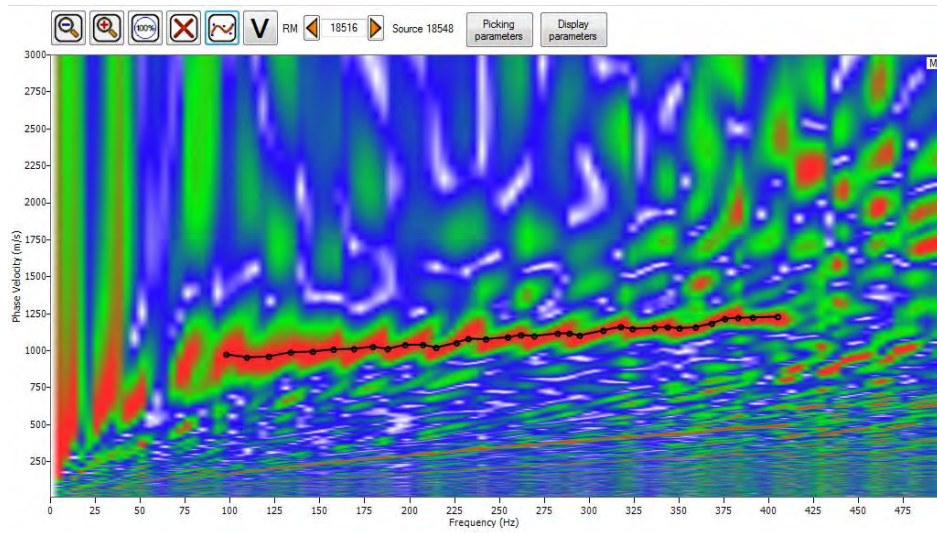


Рисунок 4.2.35 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2013 (Пк185).

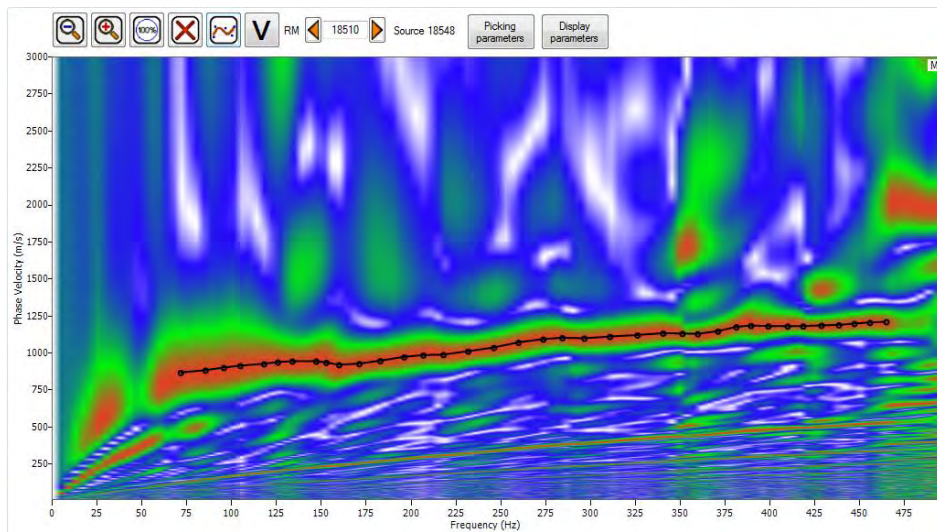


Рисунок 4.2.36 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2014 (Пк185).

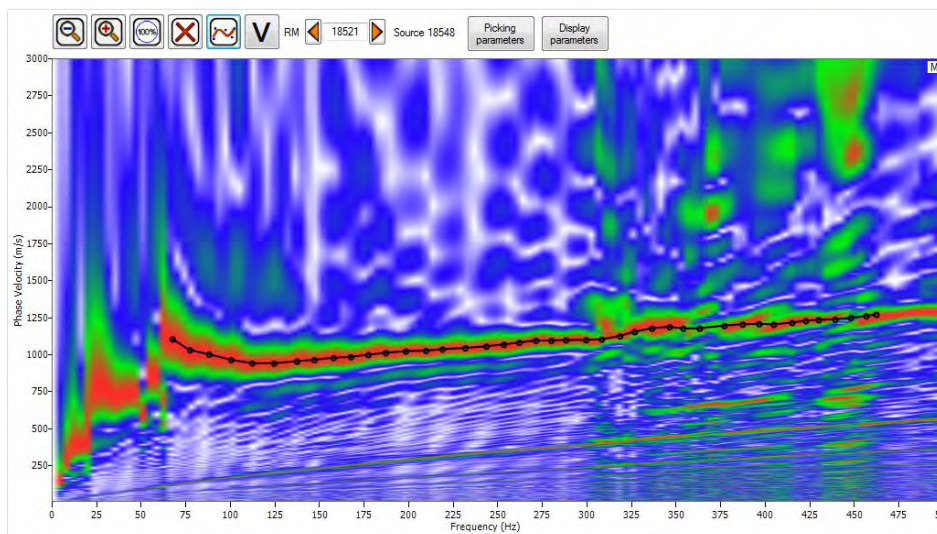


Рисунок 4.2.37- Дисперсионное изображение, полученное 10.2014 (Пк185).



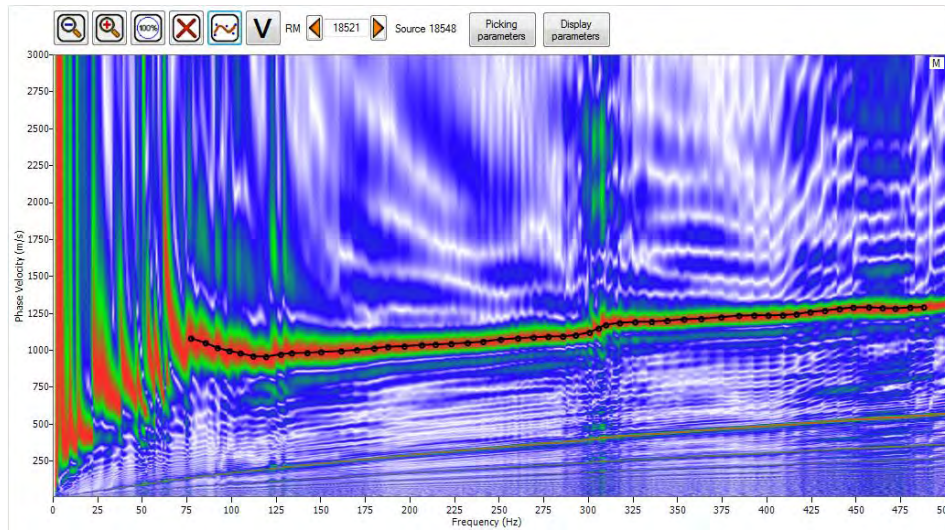


Рисунок 4.2.38 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2015 (Пк185).

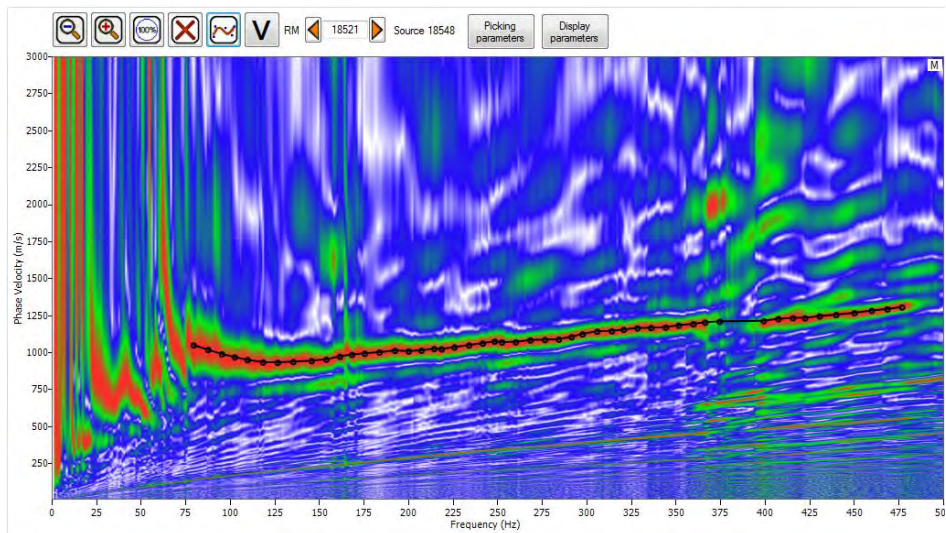


Рисунок 4.2.39 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2015 (Пк185).

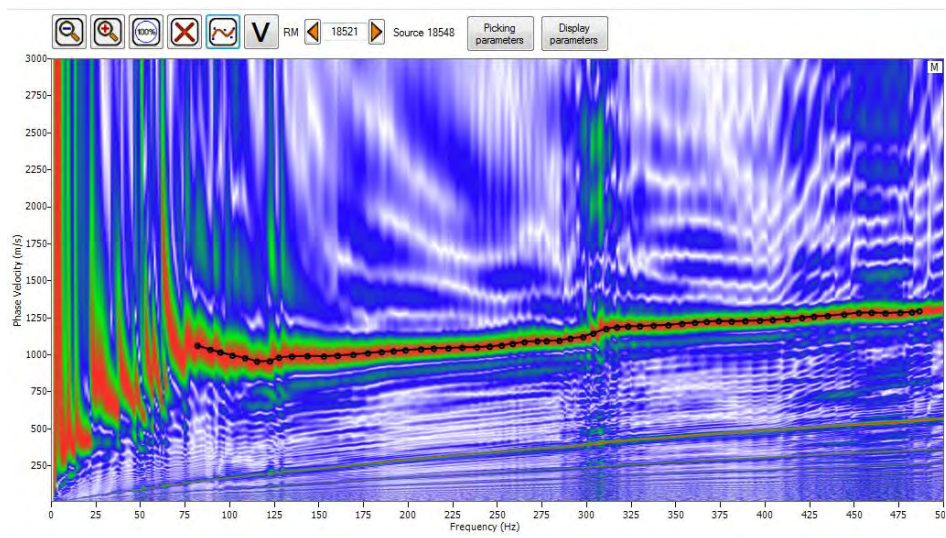


Рисунок 4.2.40 - Дисперсионное изображение, полученное 05.2016 (Пк185).

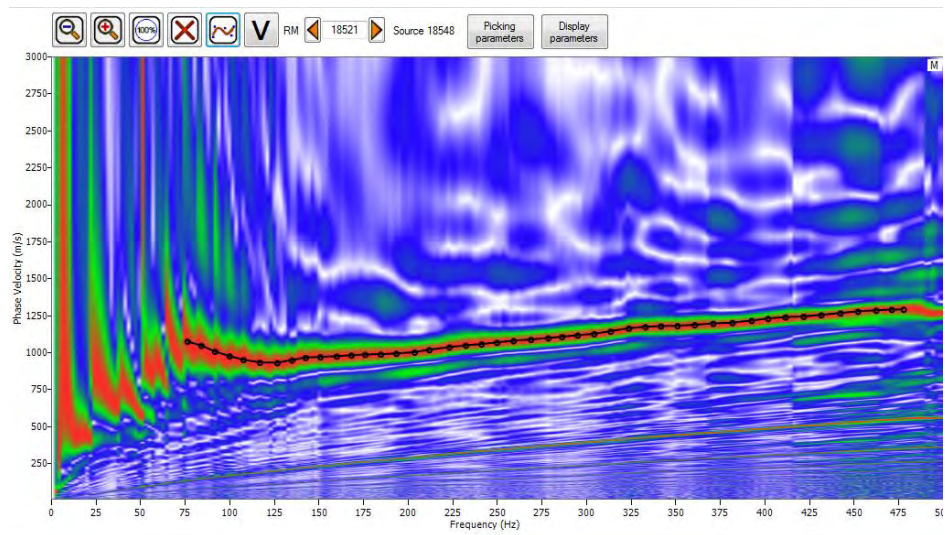


Рисунок 4.2.41 - Дисперсионное изображение, полученное 10.2016 (Пк185).

Анализ дисперсионных кривых, полученных на участке Пк185 за 6-ти летний период (рис.4.2.42), показал, в целом, достаточно стабильное состояние мониторингового участка за исключением кривых, полученных во второй половине 2012 (рис.4.2.33) года и первой половине 2013 года (рис.4.2.34). В этот интервал отмечается явное изменение дисперсии поверхностных волн, которое сопровождается снижением скоростного режима в ближней зоне заобделочного пространства. Причем, если в 2012-м году скорости в высокочастотной области кривой существенно снизились, то в 2013-м году кривая вообще «рассыпалась» в высокочастотной области. Потом произошла стабилизация массива, и кривые заняли положение близкое к средневзвешенному.

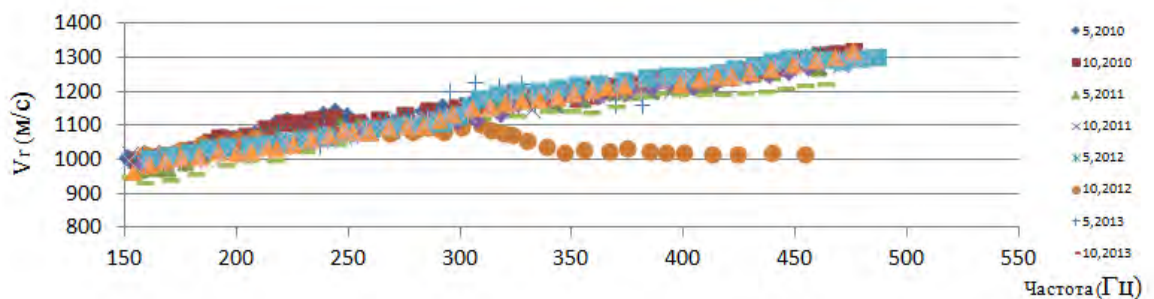


Рисунок 4.2.42 - Сводное изображение дисперсионных кривых 2010-2016гг.

В связи с тем, что количество дисперсионных кривых достаточно большое, производить их анализ неудобно, поэтому для оценки состояния ближней зоны



заобделочного пространства был применен, описываемый ранее оконный способ мониторинга. Для этого производилась выборка скоростных характеристик для 5-ти метрового диапазона длин волн, по данным которых рассчитывались среднее значение  $V_r$  для каждого цикла измерений (рис. 4.2.43).

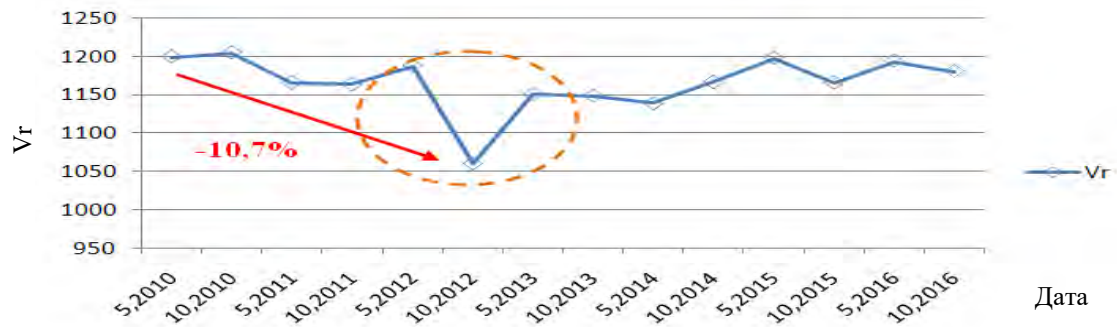


Рисунок 4.2.43 - График изменения  $V_r$  (средн.) для окна мониторинга 0-5м. в период 2010-2016гг.

На графике можно выделить период снижения скоростных характеристик на 10,7%.

Аналогично участку Пк181 на исследуемом участке (Пк185) проводились наблюдения за напряженно-деформированным состоянием обделки тоннеля с помощью встроенных в блоки обделки датчиков деформаций ПЛДС-400.

Результаты наблюдений за напряженно-деформированным состоянием обделки тоннеля представлены на рисунке 4.2.44. Детальный график изменения по датчику №1274 показан на рисунке 4.2.45.

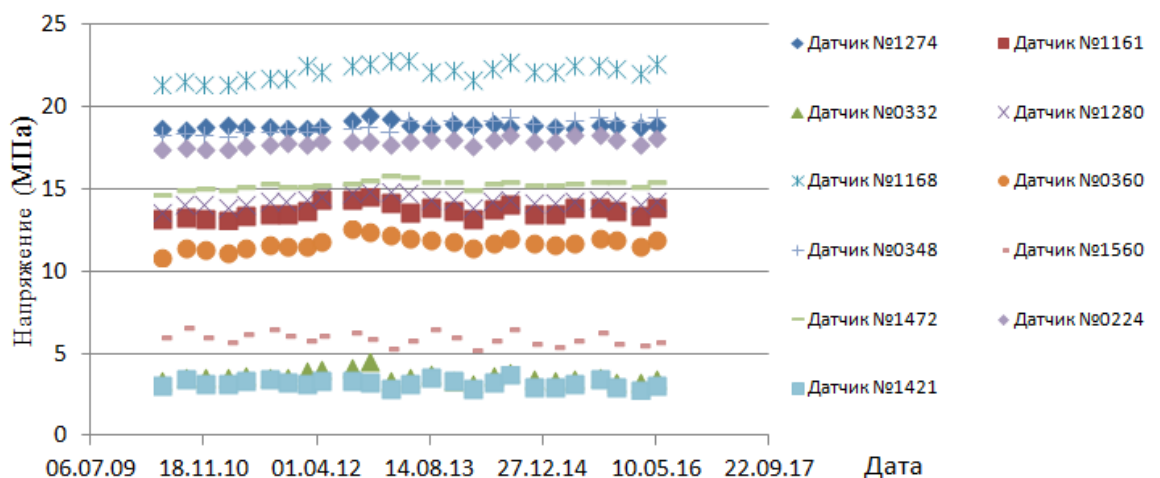


Рисунок 4.2.44 - Изменение напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля по данным установленных на обделке тоннеля датчиков ПЛДС-400.

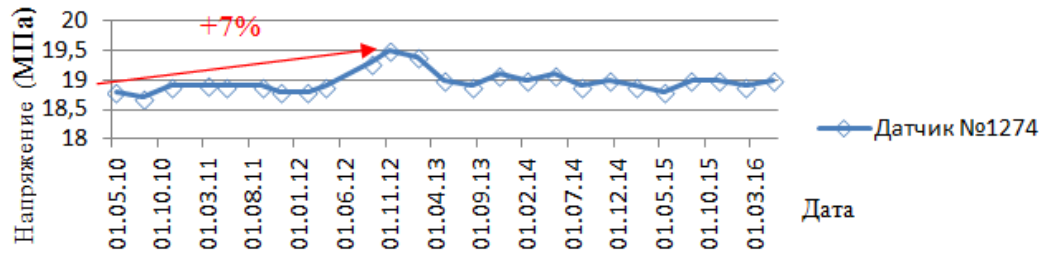


Рисунок 4.2.45 – Изменение значений напряжений на обделке тоннеля. Датчик №1274.

Для оценки статистической взаимосвязи величин изменения уровня скоростных характеристик поверхностных волн и изменения НДС обделки тоннеля был рассчитан коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$  (рис. 3.2.46).

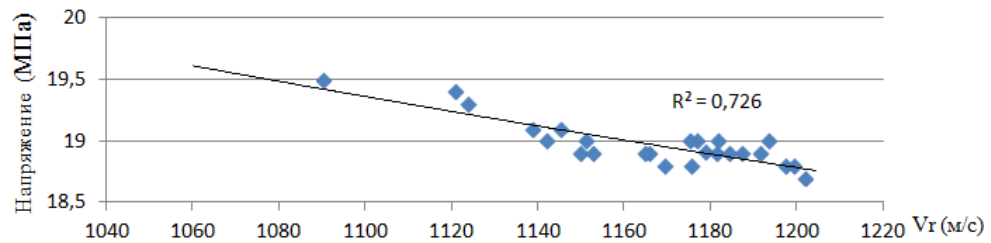


Рисунок 4.2.46 – Расчет коэффициента достоверности аппроксимации  $R^2$ .

Расчеты показали весьма неплохой коэффициент достоверности  $R^2 \sim 0,73$  между изменениями НДС обделки тоннеля и изменениями частотно-скоростных характеристик поверхностных волн.

#### 4.2.3. Выводы по результатам, полученным при мониторинговых работах внутри горных выработок

Проанализировав результаты мониторинговых экспериментов, проведенных в горных выработках, можно отметить основные моменты: 1) коэффициент достоверности  $R^2$  между данными частотно-скоростного режима ( $V_r$ ) и значениями напряжений, зарегистрированными на обделке тоннеля, находится на достаточно высоком уровне в пределах 0,72-0,85; 2) малым изменениям значений напряжений, возникающих в обделке тоннеля, которые регистрируются датчиками НДС,



соответствуют довольно значительные изменения динамического модуля сдвига, характеризующего массив в ближней зоне к обделке тоннеля.

В данном случае изменения значений напряжений изменились на 10.5%, а изменения значений модуля сдвига составили 28,5%, что указывает на высокую чувствительность метода дисперсионного анализа при решении задач по контролю состояния системы "вмещающий горный массив - тоннель".

Что касается состояния исследуемой горной выработки и вмещающего ее массива, то по данным сейсмического мониторинга методом дисперсионного анализа можно сделать следующие выводы: в грунтах вокруг тоннеля, после ввода его в эксплуатацию, за счет вибрационных воздействий от проходящих поездов и фильтрации воды вдоль тоннеля, происходило изменение физико-механических свойств, окружающих тоннель грунтов, с чем и связано падение скоростных характеристик в ближней зоне обделки тоннеля. Развитие данного процесса может иметь неблагоприятные последствия. Таким образом, учитывая, что напряжения в обделке тоннеля хоть и плавно увеличиваются, но находятся в пределах нормы, изменения в массиве на данный момент не оказывают существенного влияния на конструкции тоннеля.

На основании приведенных аргументов можно считать метод дисперсионного анализа пригодным для оценки состояния массива и предупреждения аварийных ситуаций в системе «вмещающий массив - горная выработка».

## 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 дисперсионного анализа 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 характеристик поверхностных волн и физического состояния вмещающего массива.

3. Разработана методика оперативной идентификации деформационных процессов в массиве еще на начальной стадии и дальнейшей оценке их развития по данным дисперсионного анализа поверхностных волн. Предложен удобный 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.

Предложенная методика 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, начиная со стадии упругого деформирования.

## Список литературы

1. Маковский Л.В. Проектирование автодорожных и городских тоннелей. М.: Транспорт, 1993, с.352 .
2. Власов С.Н. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов С.Н. Власов, Л.В.Маковский, В.Е.Меркин М.: ТИМР, 2000, с.101.
3. СП 14.13330.2011 Свод правил. Строительство в сейсмических районах
4. Зайнагабдинов Д.А., Быкова Н.М. Транспортные тоннели и геодинамика горных массивов. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Выпуск 5 (24), 2014. <http://naukovedenie.ru/PDF/13KO514.pdf>
5. Дорман И.Я. Сейсмостойкость транспортных тоннелей. М.: Транспорт, 1986, с.175.
6. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», Методическое руководство, 2009, с.68.
7. Шустер Р. Оползни: Исследование и укрепление / Под ред. Р. Шустера, Р. Кризека; Пер. с англ.: А.А. Варги, Р.Р. Тизделя. – М.: Мир, 1981, с.368.
8. Горяинов Н.Н., Боголюбов А.Н., Варламов Н.М., Матвеев В.С., Никитин В.Н., Скворцов А.Г. Изучение оползней геофизическими методами. М.:Недра,1987,с. 154.
9. Тер-Степанян Г.И. Глубинная ползучесть склонов и методы ее изучения Текст./ Г. И. Тер-Степанян автореф. дисс.докт.техн.наук.-Ереван,1955,с.37.
10. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра,1989, с.259.
11. Борщ-Компониец В.И. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга, 2013,с.322.
12. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М.: Недра, 1982, с.191.
13. Воронин В.С. Набрызгбетонная крепь. М.: Недра, 1980, с.1980.

14. Применение технологии набрызгбетонирования в Новоавстрийском Методе Туннелирования (NATM)/ М.М. Козерема // Геотехническая механика: Межвед. сб.научн.тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ,2009.-Вып. 83, с.181-187.
15. Величкин Е.А., Ленец П.Т. Строительство тоннелей и метрополитенов. М.: Транспорт, 1971, с.382.
16. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990, с.501.
17. Гулакян К.А., Кюнтцель В.В., Постоев Г.П. Прогнозирование оползневых процессов. М.: Недра, 1977, с.135.
18. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. Труды ВСЕГИНГЕО, под ред. Горяинова Н.Н. М.: Недра, 1992, с.256.
19. Горяинов, Н.Н., Семитко Т.С. О связях между сейсмоакустическими и физико-механическими характеристиками рыхлых пород. Труды ВСЕГИНГЕО, вып.90, 1975, с.50-59.
20. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979, с.143.
21. Кондратьев О.К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986, с.176.
22. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии М.: Московский университет. 1981. с.176.
23. Бондарев В.И., Агеев В.Н., Шмаков В.Н. Изучение статического модуля деформации грунтов в естественном залегании методом сейсморазведки. Полевые методы исследования грунтов: Материалы к совещанию, г.Рязань, 11-17 сентября, М.: ПНИИИС,1969, с.171-174.
24. Миндель И.Г. Оценка деформационных и прочностных свойств лессовых пород сейсмоакустическими методами // Полевые методы исследования грунтов: материалы к совещанию, г. Рязань, 14-17 сентября, М.: ПНИИИС, 1969.
25. Миндель И.Г. Методика сейсмоакустических исследований физико-механических свойств связанных и несвязанных грунтов//Методика геофизических исследований при инженерно-геологических изысканиях: Труды института ПНИИИС, вып.36. М.: Стройиздат, 1975, с.3-26.

26. Бондарев В.И., Шмаков В.Н., Агеев В.Н., Вербицкий Г.Г. Опыт использования сейсморазведки для определения модуля деформации дисперсных грунтов в естественном залегании. Информационный бюллетень ЦТИСИЗа №1/18. М.: Стройиздат, 1970.
27. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Основания зданий и сооружений. Часть II, Глава 15, СНиП-15-74. М.: Стройиздат, 1975, с.65.
28. Царева Н.В. Распространение упругих волн в песке. Известия АН СССР, сер. геофизическая, №9, 1956, с.1044-1053.
29. Ляховицкий Ф.М. Упругие свойства зернистых пород. Геофизические исследования. Сборник 11. М.: Издательство Московского университета, 1966, с. 82-89.
30. Козлов Е.А. О скоростях продольных волн в терригенных отложениях Известия АН СССР, сер. геофизическая, №8, 1962, с.1003-1024.
31. Назаров Г.Н. Новые данные о скоростях распространения упругих волн в грунтовых массивах. Инженерно-строительные изыскания. Сборник статей №2(27). М.: Стройиздат, 1972, с.50-59.
32. Шемшурин В.А. Физическая природа зависимости между модулем деформации и скоростями упругих волн в песчано-глинистых грунтах// Инженерно-строительные изыскания: Сборник статей, №2 (27) -М.:Стройиздат,1972.-с.59-66.
33. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Научное издание. Екатеринбург: УГГА, 1997, с.220.
34. Бондарев В.И., Агеев В.Н., Шмаков В.Н., и др. Изучение статического модуля деформации грунтов в естественном залегании методом сейсморазведки // Полевые методы исследования грунтов. Материалы к совещанию, г. Рязань 14-17 сентября. М.: ПНИИИС, 1969, с.171-174.
35. Бондарев В.И., Шмаков В.Н., Агеев В.Н., Определение статистического модуля деформации песчаных грунтов в естественном залегании с помощью сейсморазведки // Вопросы разведочной геофизики. Труды Свердловского горного института. вып.107. Свердловск: СТИ, 1957, с.85-90.



36. Бондарев В.И. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М.: Стройиздат, 1974, с.142.
37. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Яценко З.Г. Инженерная геофизика. М.: Недра, 1989, с.252.
38. Пиоро Е.В. Деформационные и акустические свойства глинистых грунтов по результатам лабораторных инженерно-геологических и ультразвуковых исследований. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук МГУ. Москва, 2014, с.220.
39. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Учебник для вузов. Тверь: АИС, 2006, с.744.
40. Горянинов Н.Н. Сейсмоакустические методы при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород (методические рекомендации). М.: ВСЕГИНГЕО, 1977-1979, с.10.
41. Бондарев В.И. О взаимосвязи сейсмических и физико-механических свойств песчано-глинистых грунтов. Изв. Вузов. Сер. Геология и разведка №2, 1983, с. 84-91.
42. Пузырев, Н.Н., Тригубов Л.Ю., Бродов Л.Ю. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М.: Недра, 1985, с.277.
43. Левшин А.Л. Поверхностные и каналовые сейсмические волны. М.: Наука, 1973, с.174.
44. Андрианова З.С., Кейлис-Борок В.И., Левшин А.Л., Нейгауз М.Г. Поверхностные волны Лява. М.: Наука, 1965, с.108.
45. Кейлис-Борок В.И. Интерференционные поверхностные волны, Изд. АН СССР, 1960, с. 195.
46. Нейгауз М.Г., Шкадинская Г.В. Метод расчета поверхностных волн Рэля в вертикально-неоднородном полупространстве. В кн.: Машинная интерпретация сейсмических волн. М.: Наука, 1966, с.121-129.
47. Haskel N.A. The dispersion of surface waves on multilayered media. – bull. Seism. Soc. Am., 1953. Vol. 43, n.1, p.17-34.

48. Thomson W. T. Transmission of elastic waves through a stratified solid. - J.Appl. Phys.,19 50,yo). 21 , p.89 – 93.
49. Heisey, J.S., Stokoe II, K.H., and Meyer, A.H., 1982, Moduli of pavement systems from Spectral Analysis of Surface Waves, Transp. Res. Rec., v. 852, WashingtonD.C, p.22-31.
50. Van der Pol C. Journal of Applied Chemistry. 1951. p.281-290.
51. Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б. Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью. Изв.АН СССР, сер.физ.Земли №4, 1976, с.24-31.
52. Alenitsyn A.G. PMM. J. Appl. Math, Mech.1963,Vol.27, p547-550.
53. Мухина И.В., Молотков И.А. О распространении волн Рэлея в упругом полупространстве, неоднородном по двум координатам. Изв. АН СССР, Физика Земли №4, 1967, с.3-8.
54. Tolstoy,I. Dispersion and simple harmonic point sources in wave ducts. J.-Acoust.Soc.Am.-27-897-1955.
55. Горелик Г.С. Колебания и волны. М.: Физматлит. 2 изд., 1959, с.572.
56. Викторов, И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука 1981, с.287.
57. Воронков. О.К. К использованию волн Рэлея для определения упругих свойств скальных пород при инженерной сейсморазведке. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Сборник научных трудов – т. 147, 1981, с.98-102.
58. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Ламба в технике. М.: Книга по Требованию, 2013, с.169.
59. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Издательство академии наук СССР, 1957, с.502.
60. Воронков, О.К., И. Маров Об определении упругих свойств пород в естественных условиях залегания в области многолетней мерзлоты. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Сборник научных трудов т. 106-1974, с.249-263.
61. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1965, с.204.

62. Azimi Sh.A., Kalinin A.V., Kalinin V.V., Pivovarov B.L. Impulse and transient characteristics of media with linear and quadratic absorption laws/ *Isvestia Physics of the Solid Earth*, AGU, 1968, p.88-93.
63. Коптев В.И. Ультразвуковой многоканальный каротаж с прижимным зондом при инженерно-геологических изысканиях. кн.: *Геоакустика*, М.,1966, с.84-94.
64. Савич, А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969, с.328.
65. Thornton E., Guza R.T. Transformation of wave height distribution // *Journal of Geophysical Research*, 1983, -Vol. 88.-C10. p.5925-5938.
66. Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H. Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion // *Journal of Geophysical Engineering. ASCE.*-1992.-Vol.118(10).- p.1529-1543.
67. Stokoe, K. H., Rix G.J., Nazarian S. II In situ seismic testing with surface waves // *Proceedings of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janiero.* - 1989. – p.331-334.
68. Nazarian S. // *Proceedings of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janiero.*, 1989, p. 331-334.
69. Kielczynski P., Pajewsky W. Inverse method for Determining the Depth of nongomogeneous surface layers in elastic solids from the measurements of the dispersion curves of group velocity of surface SH waves. *Appl. Phys*, 1989, V.A48. - p.423-429.
70. Lai, Carlo G. Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and ttenuation for Near-Surface Site Characterization / Carlo G. Lai, Glenn J. Rix, // *National Science Foundation and U.S. Geological Survey*- July 1998.
71. Park, Choon B. Multichannel analysis of surface waves / Choon B. Park, Richard D. Miller, and Jianghai Xia // *Kansas Geological Survey, University of Kansas*, 1930 Constant Avenue, Campus West, Lawrence, Kansas 66047-3726. - *Society of Exploration Geophysicists.* – 1999.
72. Malovichko A. Estimation of near-surface shear-wave velocities by SASW method in Southeast Missouri / A. Malovichko, D. Malovichko, D. Shylakov, P. Butirin, N.

Anderson // Proceedings of The 3rd International Conference on Applied Geophysics, Orlando, FL, December 8-12. - 2003. - p.11–21.

73. Решетников В.В., Сурков Ю.А. Численное исследование свойств квазилокальных плоских волн модального типа в случае тонкого низкоскоростного упругого слоя, контактирующего с упругим полупространством. Вопросы геофизики, выпуск 6-изд., СПб университета, 2004.
74. Maraschini, Margherita A new misfit function for multimodal inversion of surface waves / Margherita Maraschini, Fabian Ernst, Sebastiano Foti, and Laura Valentina Socco GEOPHYSICS, VOL. 75, NO, 4 2010, p. G31–G43.
75. Thomson W.J. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // Journal of Appl. Phys. - 1950. -Vol.21, p.89 – 93.
76. Park C.B., Xia J., Miller R.D. Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 1998, p.1377–1380.
77. Park, C.B., Miller, R.D., and Miura, H., 2002, Optimum field parameters of an MASW survey[Exp.Abs.]: SEG-J, Tokyo, May 22-23, 2002. <http://www.masw.com/files/PAR-02-03.pdf>
78. Stokoe K. H. II In situ seismic testing with surface waves / K. H. II Stokoe, G. J. Rix, S. Nazarian, // Proceedings of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio De Janiero. - 1989. – p.331-334.
79. Stokoe, K.H., Wright G.W., James A.B. and Jose M.R. Characterization of geotechnical sites by SASW method / K.H. Stokoe, G.W. Wright, A.B. James, M.R. Jose // Geophysical Characterization of Sites ISSMFE Technical Committee #10 Edited by R.D. Woods: Oxford Publishers. New Delhi. - 1999.
80. Kenneth H. Stokoe And J. Carlos Santamarina. Seismic-Wave-Based Testing in Geotechnical Engineering. "Seismic-Wave-Based Testing in Geotechnical Engineering." GeoEng 2000, p.1490-1536.

81. Массарш К.Р. Программная лекция на международной конференции по характеристике площадок строительства. 19-22 сентября 2004г., г. Порто, Португалия с.203-218.
82. Ашмарина Ю.Б. Многоканальный анализ поверхностных волн. Доклад. Санкт-Петербург 2013.
83. Бойко, О. В. Использование псевдорэлеевских волн для изучения упругих параметров пород, вмещающих тоннель, с бетонной или другой несущей обделкой / Естественные и технические науки – 2013. - №5(67) - с.162 - 167.
84. Бойко О.В. Определение упругих характеристик низкоскоростных пород перекрытых высокоскоростным слоем обделки тоннеля, по материалам сейсморазведки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» 2015, с.135.
85. Горяинов Н.Н., Каринская Р.В., Семитко Т.С. К вопросу о повышении информативности сейсмоакустических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических съемках с целью мелиорации земель. Труды ВСЕГИНГЕО, М., вып.74, 1973.
86. <http://www.masw.com/>. Сайт разработчиков метода многоканального метода анализа поверхностных волн (MASW).
87. Обработка данных, полученных по методу многоканального анализа поверхностных волн (MASW) в программе RadExPro. ООО «Деко-геофизика СК» М.: [www.radexpro.ru](http://www.radexpro.ru). Редакция 16.11.2016.
88. Дорохин К.А. Оценка устойчивости горных массивов методом анализа дисперсии поверхностных волн. М.: Инженерная геология, 2016, № 4., с. 22-28.
89. <https://author24.ru/spravochniki/fizika/> Фазовая и групповая скорости и их соотношение
90. Глухов А.А. Анциферов А.В. Современные методы математического моделирования при прогнозе геологических нарушений угольных пластов. журнал ГИАБ №8. Москва 2004г. с.119-132.

91. Глухов А.А. Азаров Н.Я. Особенности волновых полей, образуемых при возбуждении колебаний во вмещающих породах. Журнал труды РАНИМИ. Г.Донецк, 2011, с. 128-137
92. [https://ru.wikipedia.org/wiki/оконное преобразование Фурье](https://ru.wikipedia.org/wiki/оконное_преобразование_Фурье)
93. Б.-С. Жэн, Л.Ю.Лу Волны Рэля и обнаружение изкоскоростных слоев в слоистом полупространстве. Акустический журнал. 2003. Том49,№5, с. 613-625.
94. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. М.: Мир, 1987, с.448.
95. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966, с.169.
96. Дорохин К. А., Бойко О.В. Геофизические исследования оползневых процессов на участках размещения железнодорожных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень - 2013 - №4, с.247-252.
97. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Научное издание. Екатеринбург: УГГГА, 1997, с. 220.
98. Анциферов А.В., Захаров В.Н, Глухов А.А. Комплект программ моделирования процесса распространения сейсмических волн в угленосной толще // Каталог прогр. Средств / ГосФАП, М.1991, №50910000379.
99. Korn M., Stock H. Reflection and transmission of love channel waves at coal seam discontinuities computed with a finite-difference method // Geophysics. - 1982. - Vol.50. - p.171 -176.
100. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. Донецк: «Алан», 2002, с.312.
101. Thomson W.J. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium // Journal of Appl. Phys. - 1950. -Vol.21. - p.89-93.
102. Глухов А.А., Захаров В.Н., Рубан А.Д. Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей. Горный вестник, Москва, ИГД Скопинского, 1994, с.16-18.
103. Дорохин К.А. Контроль состояния оползневого склона по изменениям скоростей сейсмических волн в массиве. Тверь: журнал Каротажник.№1 2014г №1, с. 3-12.



104. Дорохин К.А. Оценка устойчивости массива горных пород комплексом геофизических и геомеханических методов. М.: Межрегиональная общ. Организация Евро-Азиатское геофизическое общество. Материалы конференции: инженерная, угольная, рудная геофизика- 2015, с.71-75.
105. Дорохин К.А. Оценка устойчивости массивов горных пород сейсмоакустическими методами. Сборник трудов 2-й Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого. М.: ИПКОН РАН, 2016, с.53-57.
106. СНиП 22-01095, приложение Б. Геофизика опасных природных воздействий.
107. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1984, с.80.
108. СП 11-105-97 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства.
109. Бойко О.В. Определение упругих характеристик низкоскоростных пород, перекрытых высокоскоростным слоем обделки тоннеля, по материалам сейсморазведки. Статья в сборнике трудов конференции Инженерная, угольная и рудная геофизика- 2015. М.: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество, 2015, с.168-174.
110. Dorokhin K. Estimation of stability of rock massif by the method of seismic exploration. 7-th EAGE Saint-Petersburg international conference and exhibition: understanding the harmony of the earth's resources through integration of geosciences. Saint-Petersburg, 2016, p.788-792.
111. Дорохин К.А. Контроль состояния оползневого склона по данным изменения скоростей сейсмических волн в массиве. М.: Науки о Земле. 2013. № 2-3, с.56-62.
112. 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 Северокавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя. М.: Геофизические исследования, 2013, т.14., №4., с.5-22.

113. 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. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи. М.: Физика земли. 2014, №4, с. 120.
114. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A., Isaev Y.S., Dorokhin K.A. Some problems of landslide monitoring using satellite radar imagery with different wavelengths: case study of two landslides in the region of greater sochi. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 2014. T. 50. №4, с.576-587.
115. Норова Л.П. Особенности формирования и трансформации физико-механических свойств моренных отложений в разрезе Санкт-Петербурга// Реконструкция городов и геотехническое строительство 2000. - №1 -С.89-94.
116. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В. Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Развитие городов и геотехническое строительство, выпуск №13/2011 с.24-72.
117. Захаров В.Н. Разработка методологии и обоснование критериев прогнозирования состояния горного массива сейсмоакустическими методами при подземной угледобыче. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Люберцы, 2003, с. 346.
118. Глушко В. Т., Ямщиков В.С.. Яланская А. А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. М.: Недра, 1987, с.278.
119. Протодьяконов М.М., Чирков С.В. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. М.: Наука, 1964.
120. Ардашев К.А. и др. Методика изучения трещиноватости осадочных горных пород применительно к решению задач управления горным давлением. Труды ВНИМИ, сб.51. 1964.

121. Куваев И.Н. Особенности методики изучения и характеристики трещиноватости массива горных пород для оценки его устойчивости. Труды ВНИМИ, сб. 32, 1958.
122. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства.- М.: Недра, 1989, с.446.
123. Силаева О.И. Исследование с помощью ультразвука скоростей распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении. Труды ИФЗ АН СССР. 1962. N 27.
124. Гурвич И.И. Сейсморазведка, изд. третье. М.: Недра, 1975, с.408.
125. ОДМ218.2.006-2010 Рекомендации по расчету устойчивости оползнеопасных склонов (откосов) и определению оползневых давлений на инженерные сооружения автомобильных дорог.