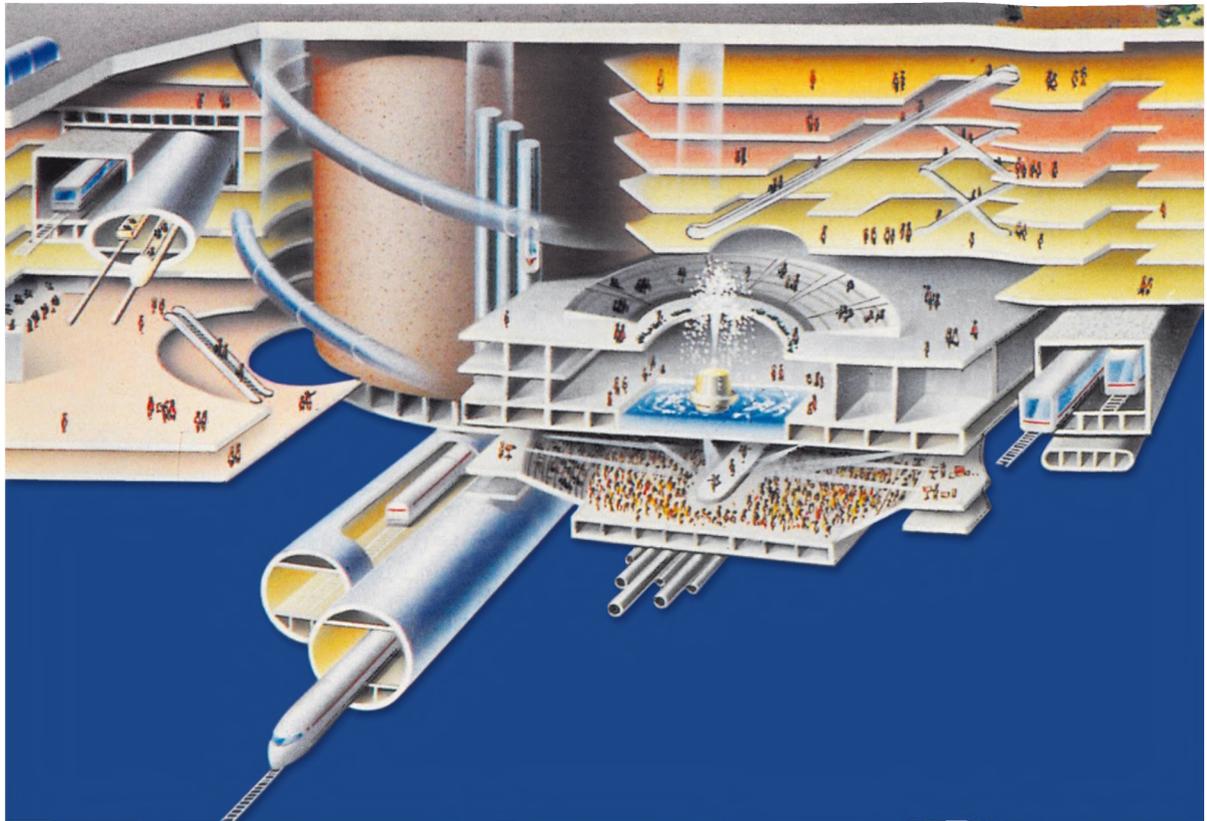


С. А. Татаркин

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ



ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ

РАЗВИТИЕ
ГОРОДОВ И
ГЕОТЕХНИЧЕСКОЕ
СТРОИТЕЛЬСТВО

ТЕТРАДЬ №6

www.georec.spb.ru

Ст. н. с., к.т.н. Татаркин С.А.

**СОВРЕМЕННЫЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В СТРОИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ**

Научно-техническая информация

Приложение к Интернет-журналу
«Реконструкция городов и геотехническое строительство»

Тетрадь №6
Интернет: www.georec.spb.ru

Санкт-Петербург
2007

УДК 69.059.32 + 624.15

Татаркин С.А.

Современные геофизические методы в строительной практике / СПб.; М.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2007. – 100 с.

ISBN 5-9900771-2-2

© С. А. Татаркин, 2007

© НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1. Взаимосвязь сейсмических (физических) и физико-механических характеристик грунта	6
2. Недостатки статистической обработки данных физико-механических и сейсмических характеристик грунта традиционными методами стационарных процессов	9
2.1. Вейвлет-преобразования, как эффективный инструмент исследования нестационарных (сейсмических) процессов в приповерхностных слоях грунта	10
3. Современные физико-математические сейсмические модели грунта и сред, близких к нему	11
4. Экспериментальные исследования физических явлений при сейсмопрофилировании грунта и обработке сигнала методами вейвлет-анализа	17
4.1. Волновое распространение в приповерхностных слоях грунта, слоистость и резонансные частоты, зоны фокусировки лучей, каустики и зона конвергенции лучей (лучевое представление)	17
4.2. Грунт, свая как многозвенный колебательный контур, характеризующийся параметрами мод и их форм.	18
4.3. Исследование дисперсии звука в приповерхностных слоях грунта, сваях, фазовая и групповая скорости	22
4.4. Исследование дифракционных (конических) волн	22
4.5. Исследования прочностных характеристик подземных сооружений (коллекторы, тоннели метро и др.)	27
4.6. Исследование влияния вибродинамического воздействия механизмов по забивке свай, поездов метро, транспорта	29
4.7. Оценка размеров неоднородностей (шероховатости), определение границ слоёв и слабых зон в грунтах	29
4.8. Оценка глубины обнаружения (для глубин до 30-50 м) и классификации неоднородностей естественного и техногенного происхождения	36
4.9. Исследование характеристик анизотропии грунта	36
5. Геологическая интерпретация результатов, критерии распознавания волн	38
6. Аппаратура, метрология, моделирование	42
7. Практическое применение комплексных сейсмоакустических методов в обследовании зданий и сооружений	44
7.1. Определение прочностных характеристик свай и дефектов в них	44
7.2. Определение прочностных характеристик обделки тоннеля метро и состояния вмещающего грунта на участке «Размыв»	52
7.3. Площадь Конституции, обследование здания 24, корп. 1, 2, 3	57
7.4. Обследование административного здания по ул. Фрунзе, д. 18	61
7.5. Мониторинг канализационного коллектора на ул. Савушкина, кв. 62	65
7.6. Мониторинг магистрального канализационного коллектора Водоканала	69
7.7. Выявление причин аварийной ситуации растительных камер («бочек») солодовенного завода в Усть-Славянке при забивке свай	79
7.8. Обследования здания Синода	82
7.9. Исследования причин аварии высоковольтного маслонаполненного кабеля на набережной Обводного канала	86
7.10. Мониторинг нефтепродуктопровода на реке Б.Охта	93
8. Методы электроразведки, георадар	94
8.1. Применение методов электроразведки для определения характеристик слабых водонасыщенных грунтов	94
8.2. Применение электромагнитных волн для обследования	94
Заключение	97
Список литературы	98

ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике строительства развитых в экономическом отношении стран с каждым годом увеличивается доля реконструкции зданий и сооружений. Это относится и к С. Петербургу. Уплотняется городская застройка, осваивается подземное пространство – строятся подземные сооружения, намечается строительство высотных зданий. В связи с этим ужесточаются требования к неравномерным осадкам. При этом важным требованием является сохранение исторических памятников, сохранение дорогостоящей внутренней отделки. Возникают сложные геотехнические проблемы, требующие своего решения. Опыт инженерно-геологических изысканий в городе показывает сложность условий, недостаточную точность исходных данных при обеспечении этих требований.

Кроме того, традиционные геотехнические методы в таких условиях имеют определенные ограничения при применении. При реконструкции старых зданий, расположенных вблизи глубоких выработок (в частности, наклонных тоннелей метро, новых линий метро) происходит изменение положения грунтовых вод, вынос тонкодисперсных частиц грунта (суффозия) при водопонижении, вибрационное воздействие от движущегося транспорта и, как следствие, виброуплотнение грунта основания, либо его разуплотнение. Все эти факторы в теоретических расчётах осадок не могут быть учтены, а инженерно-геологические изыскания зачастую выполнить невозможно.

В условиях плотной городской застройки возможно бурение ограниченного числа геологических скважин. Отбор монолитов (образцов с ненарушенной структурой) из водонасыщенных тиксотропных супесей затруднён, а из песков пылеватых водонасыщенных почти невозможен. При ведении наблюдений (мониторинга) за подземными сооружениями, коллекторами и др. доступ для их визуального обследования практически невозможен.

Таким образом, проводимые исследования традиционными методами не в полной мере обеспечивают необходимый уровень надёжности исходных данных о грунтах для принятия проектных решений при строительстве, реконструкции зданий и мониторинге подземных сооружений.

Одним из способов повышения надёжности геотехнических решений является применение комплексных геофизических методов. К достоинствам

методов инженерной сейсмологии и акустики следует отнести: возможность изучения массивов пород дистанционно без нарушения их структуры, изучение массивов грунта с разной степенью детальности, возможность проведения измерений непрерывно в пространстве и во времени (мониторинг). В то же время методы сейсморазведки, применяемые для больших глубин, не всегда эффективны на малых глубинах с учётом особенностей приповерхностных слоёв грунта и городской застройки. Обычно кинематические методы используют расчётные модели распространения звука на основе лучевой акустики. В приповерхностных слоях грунта существуют сильные интерференционные волны и дисперсия скорости, что связано с дифракционными явлениями. Они не учитываются лучевой акустикой, что приводит к ошибкам в интерпретации. Динамические методы в условиях небольших строительных площадок имеют ограничения по числу устанавливаемых приёмников и недостаточно помехоустойчивы.

В данной работе предлагается использовать кратномасштабный анализ (вейвлет-спектры) в методе поверхностных волн с учётом обменных волн (многократно отражённых). Они позволяют обнаруживать дифракционные волны небольшой интенсивности и в определённой мере устранить отмеченные выше недостатки. Однако, учитывая сложность проблемы, целесообразно использование всех сейсмических методов в комплексе.

Предлагаемые модели грунта, использованные для анализа, основаны на применении хорошо исследованных процессов в аналогичных средах и физических принципах динамики строительной механики. В целом следует заметить, что использование геофизических методов только тогда повышает информативность исходных данных, когда они имеют физическое обоснование и применяются совместно с традиционными методами инженерно-геологических изысканий (бурением скважин, лабораторными исследованиями проб грунтов, статическим зондированием и др.), т.е. на основе сейсмической стратиграфии. По результатам этого анализа можно оценить физико-механические характеристики грунта и их изменения. Попытки некоторых геофизиков представить результаты измерений и интерпретации, как альтернативу геологическим изысканиям, представляются сомнительными.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Северо-западное отделение Российского общества механики грунтов и геотехнического строительства (РОМГГиФ), Технический Комитет 38 «Взаимодействие оснований и сооружений» международной ассоциации ISSMGE и ЗАО «НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект» предлагает Вашему вниманию книгу к.т.н., старшего научного сотрудника Татаркина С. А. «Современные геофизические методы в строительной практике».

Предлагаемая тематика весьма актуальна в связи с активизацией реконструкции городов России и в том числе таких крупных мегаполисов как Москва и Санкт-Петербург.

Международный опыт использования геофизических методов в строительстве свидетельствует о больших возможностях этих методов для решения широкого круга вопросов, для которых традиционные методы просто не приемлемы. Система современного сопровождения сложного строительства, особенно в условиях плотной городской застройки, требует большой информативности на всех этапах реализации Проекта. Объекты высотного и подземного строительства в городах можно отнести к 3-ей, высшей категории геотехнической сложности, т.е. к разряду повышенного риска. Мне как специалисту – геотехнику представляется, что без использования современных геофизических методов достаточно сложно обеспечить безопасное строительство, как самих объектов, и сохранить окружающие строения. Особенно трудно оценить влияние стоящихся объектов на подземные инженерные сети и тоннели метро. В тоже время ведение работ

по прокладке тоннелей метро оказывает воздействие на окружающую территорию. Современные системы численного математического моделирования сложных строительных и реконструкционных ситуаций требуют постоянной проверки результатов расчёта в натуральных условиях. Совпадение данных расчётов и фактически изменённых значений лучшей проверкой любого теоретического метода. Здесь немаловажную роль играет геофизика, позволяющая на протяжении длительного времени давать необходимую информацию.

Важна и система диагностики состояния как вновь возведенных, так и старых существующих конструкций, попадающих в зону риска

Отдельные вопросы, поднятые в настоящем издании, проблемны и часто дискуссионны, но такая постановка, как правило, вызывает повышенный интерес и активизирует читателя.

Предлагаемая работа достаточно популярно излагает основы геофизических методов для целей строительства, и она может быть использована широким кругом строителей и научных сотрудников. Она будет полезна и студентам строительных ВУЗов и факультетов.

Работа публикуется в авторской редакции.

Д.т.н., профессор, Лауреат Государственной премии РФ, зав кафедрой «Основания и фундаменты» ПГУПС (бывший ЛИИЖТ), научный руководитель ЗАО «НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект»

В.М.Улицкий

1. ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ (ФИЗИЧЕСКИХ) И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛОГИЙ. ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАБОТ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

Эффективность сейсмоакустических методов в инженерной геологии в конечном итоге зависит от того, насколько тесно сейсмические свойства пород связаны с инженерно-геологическими особенностями объекта, т.е. с рядом его признаков. К основным признакам относятся: вещественный и фазовый состав пород, характер связей между элементами твёрдой фазы и величина действующих напряжений. Сейсмические свойства пород в определённой степени зависят от минерализации и химического состава воды или льда, содержащихся в порах трещин (в случае рыхлых песков аналогом трещин являются точки контакта между зёрнами, степень цементации). При этом с увеличением минерализации воды, скорости распространения волн возрастают, а с ростом количества солей во льду – уменьшаются. Кроме того, эти свойства зависят также от температуры твёрдомёрзлых пород, поскольку её изменение влияет на сейсмические свойства льда. Однако другие факторы и, в первую очередь, характер структурных связей и фазовый состав пород влияют значительно больше. Сейсмические свойства существенным образом зависят от характера структурных связей. Скальные породы обладают жёсткими связями, в крупнообломочных и песчаных связях отсутствуют, в глинистых преобладают вводно-коллоидные связи. В скальных породах наблюдаются наиболее высокие значения скоростей и низкие коэффициенты затухания, в крупнообломочных и песчаных наоборот. Для глинистых отложений характерны относительно высокие скорости продольных волн, высокие коэффициен-

ты затухания и низкие скорости поперечных волн. Свойства пород существенно зависят от соотношения твёрдой, жидкой и газообразной фаз. Нередко по отношению к длинным волнам породы выступают как квазианизотропные среды со свойствами, различными по разным направлениям, для которых характерна дисперсия скорости. Существенно влияет свойство пустотности, пористости (в большей степени это относится к техногенным изменениям в структуре грунта). Особое место в приповерхностных слоях грунта занимает фазовая и групповая скорости.

При использовании сейсмических методов для определения физико-механических характеристик значение имеет величина исследуемого объёма грунта. Глубина захвата грунта зависит от длины волны и силы цели отражающего слоя. При распространении волны по пути длиной ℓ , активный объём грунта составляет $Q = \pi \ell (0,25 \lambda)^2$, т.е. диаметр цилиндра исследованного объёма приблизительно равен половине длины волны ($\lambda/2$). Исходя из этого, для инженерной геологии метод поверхностных волн предпочтительней традиционных методов (ОГТ, МОВ), поскольку между излучателем и приёмником достаточны малые расстояния (3-7 м), а значит малые объёмы, что легче исследовать.

С помощью сейсмических методов можно определить динамические модули упругости Юнга, которые вычисляются по формулам теории упругости. Однако на практике использование прямых

расчётных формул затруднено вследствие сложности процесса.

Для скальных пород установлена чёткая зависимость между динамическим и статическим модулями Юнга. Для трещиновато-пористых пород эти зависимости выражены следующим образом:

$$\frac{1-k_n}{v_{pm}} + \frac{k_n}{v_{pz}}, \text{ где } v_p, v_{pm} \text{ и } v_{pz} - \text{ скорости про-}$$

дольных волн в трещиновато-пористой породе, твёрдой фазе (минеральный скелет) и заполнителе пустот;

k_n – коэффициент пустотности. Для неводонасыщенных песчано-глинистых грунтов используется следующая зависимость

$E_{\text{стат}} \approx 0,064 + 28,5 \text{ кгс/см}^2$, (погрешность 10-15%). Для определения прочностных характеристик используется так же функциональная связь. Для песчано-глинистых грунтов величина сцепления $c = 38 \cdot 10^{-5} G + 0,087 \text{ кгс/см}^2$. G – динамический модуль сдвига.

Особое внимание заслуживает связь сейсмических и физико-механических характеристик грунта при воздействии на него статических, медленно меняющихся и динамических нагрузок. Процессы, возникающие в грунтах под действием этих нагрузок, были описаны А. Шашкиным.

Слабые водонасыщенные глинистые грунты представляют собой дисперсную структурированную систему с коагуляционным типом структурных связей, способную при их нарушении под внешним воздействием переходить из твёрдобразного состояния в жидкообразное. Переход из твёрдобразного состояния к жидкообразному определяется степенью нарушения структурных связей. Применяя метод аналогии к описаниям сейсмических свойств грунта можно сказать следующее. В приповерхностных слоях грунта существует сильная дисперсия звука. Твёрдые грунты обладают малыми коэффициентами рассеивания, поглощения энергии, фокусировкой лучей, повышенными скоростями распространения простых волн и характеристикой направленности отражательной способности при анизотропии грунта (квазианизотропии при сильной слоистости). Жидкообразные (слабые) грунты обладают сильными поглощающими свойствами, большим коэффициентом рассеяния и малыми скоростями распространения волн.

В слабых грунтах происходит нарушение структурных связей в определённом объёме. Доля нарушенных связей в единице объёма равна

$$P = \frac{n[P]}{N}, \text{ где } n - \text{ число нарушенных связей, } N$$

– общее число связей,

$[P]$ – среднеарифметическая вероятность нарушения связей.

С точки зрения сейсмоки эта оценка определяется амплитудными и фазочастотными характеристиками сигналов, а так же спектром, обусловленным зоной фокусировок лучей (зонами Френеля). В этой же работе показано, что в механике грунтов коэффициент Пуассона и модуль деформации вычисляются через коэффициенты бокового давления и относительной сжимаемости.

Изменение коэффициента бокового давления влияет в первую очередь на деформации формоизменения. С точки зрения сейсмических свойств эта деформация формоизменения может быть описана спектральными характеристиками отражённых сигналов от литологических слоёв в пределах зоны Френеля, либо типом деформации как «петля гистерезиса» (т.е. усталость грунта, накопление деформаций).

В общем случае указанные характеристики имеют нормальный закон распределения случайных величин, где дисперсия характеризует постепенность перехода грунта из твёрдообразного тела в состояние жидкообразной среды.

Если дисперсия стремится к нулю, то по достижению градиентом напора и девиатором напряжений своих центральных значений, этот переход становится скачкообразным. Определение указанных характеристик происходит в лабораторных условиях и имеет погрешности. В то же время эти характеристики можно измерить, описывая грунт сейсмическими свойствами.

Деформация формоизменения структуры грунта особенно чувствительна к частотно зависимой фазовой скорости. Наиболее точно она может быть измерена при использовании прохождения волн, охватывающих малые объёмы грунта, т.е. методами поверхностных волн. Формоизменение грунта (нарушение структурных связей) адекватно изменению коэффициентов поглощения, рассеяния энергии и изменению во времени спектральных характеристик зоны Френеля. Другими словами, слежение за изменением спектральных характеристик во времени соответствует изменению дисперсии (переход грунта из твёрдообразного состояния в жидкообразное). Математическое ожидание соответствует резкому изменению спектральных характеристик, что связано, по-видимому, с резким нарушением структурных связей в грунте. Резкое изменение высокочастотных компонент спектра сигналов соответствует началу расструктурирования грунта в малых объёмах и служит предвестником аварийной ситуации. Изменения коэффициента бокового давления и относительной сжимаемости соответствуют изменению характеристик направ-

ленности отражающих участков грунта в зоне Френеля, а их отсутствие – преобладанию текучих свойств в грунте. В результате можно сделать следующее заключение.

Оценка параметров напряжённого состояния массивов грунта может решаться двумя методами. Первый заключается в измерении и вычислении абсолютных значений характеристик грунта. При этом используются ранее полученные тарировочные зависимости между традиционными геотехническими статическими и динамическими сейсмическими характеристиками. Второй метод заключается в измерении относительных величин для данной площадки и привязки их к характеристикам опорных слоёв грунта (морена, протерозой), определённым традиционными геотехническими методами. По нашему мнению ввиду малой статистики использование первого метода на данном этапе затруднено. Значительно более эффективно использование второго метода, поскольку измерения относительных характеристик достаточно точны.

В зарубежных странах в последнее время широко используется взаимосвязь сейсмических характеристик грунтов и их физико-механических свойств.

В Европе создан специальный Международный геофизический Комитет № 10 (председатель профессор К.Р. Массарж, Швеция). В работе участвуют учёные-геофизики Европы, США, Японии и др. стран. Регулярно проводятся конференции по обмену опытом. В Швеции под руководством К.Р. Массаржа создан специальный полигон для тестирования аппаратных и программных средств геофизики. На последнем совещании Комитета № 10 в Португалии (г. Порто) в 2004 г. выступил К.Р. Массарж с программной лекцией. В ней обобщается опыт ведущих зарубежных учёных по исследованию грунтов строительных площадок геофизичес-

кими методами. Анализируются концепции, с помощью которых описываются деформационные свойства мелкозернистых нормально уплотнённых грунтов. Основываясь на комплексном анализе результатов полевых и лабораторных сейсмических исследованиях, можно определить модуль деформации при её небольшом уровне и спрогнозировать изменение этого показателя при увеличении деформации сдвига. Показано, что скорость деформации при сейсмическом тестировании и небольшой величине деформаций невысока и сравнима с показателями, полученными в обычных геотехнических лабораторных тестах. Начальные показатели кривой напряжённо-деформированного состояния (низкий уровень деформации сдвига) можно определить на основании сейсмических тестов, а конечные показатели (высокий уровень) – в ходе обычных испытаний на сдвиг. Практическое применение данной концепции проиллюстрировано на конкретных примерах.

Специальный раздел в геофизике посвящён применению вейвлет-анализа при обработке сейсмических сигналов. В США создан мобильный программно-аппаратный комплекс, включающий вейвлет-анализ, для оценки в поверхностных слоях грунта физико-механических параметров, поиска неоднородностей, разуплотнений и т.д.

В Голландии совместно с установкой статического зондирования грунта используются геофоны и обработка, реализующая вейвлет-анализ.

В РФ недостаточно уделяется внимания геофизическим исследованиям в приповерхностных слоях грунта в интересах инженерной геологии и строительства.

В исследованиях принимают участие лишь немногочисленные учёные. Среди них к.т.н. Вадачкоря О., к.т.н. Строкин Ю., к.т.н. Баданин А., к.т.н. Ронин А., к.т.н. Лавров И.(НИИОСП). к.т.н. Бойко о., к.т.н. Рослов Ю. и др.

2. НЕДОСТАТКИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ФИЗИКО-МЕХНИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ. АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ГРУНТЕ, УЧЁТ ТРЕНДОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ

При обработке результатов определения физических свойств грунта ввиду различного рода ограничений используются данные сравнительно небольшого количества проб. Это не позволяет надёжно оценить статистические характеристики, зачастую они не соответствуют критерию Колмогорова. В то же время инженерно-геологические условия г.С.Петербурга сложные. С поверхности залегают слабые сильно и неравномерно сжимаемые водонасыщенные грунты. На их физико – механические характеристики существенное влияние оказывают техногенные процессы, наличие палеорусел, проявления геотектоники, а на залегающие глубже отложения протерозоя – гляциодислокации. Интервал пространственной корреляционной функции физико-технических характеристик грунтов может составлять несколько метров. Описать этот нестационарный процесс сложно.

При использовании традиционных методов сейсморазведки в приповерхностных слоях грунта в условиях плотной городской застройки решение задачи так же усложняется. В кинематических методах не учитывается дисперсия скорости звука, свойства волновода с минимумом скорости на глубине, что увеличивает погрешность измерений первых вступлений и др. В динамических методах не учитывается интерференция волн, велики помехи от неопознанных неоднородностей и подземных инженерных сетей. Метод поверхностных волн недостаточно исследован. Поэтому применение вейвлет-анализа в методе поверхностных волн при сочетании с традиционными методами позволит

повысить информативность определяемых характеристик.

Не существует единой методологии, в рамках которой можно анализировать нестационарные процессы любого типа. Поэтому для анализа нестационарных процессов приходится разрабатывать специальные методы, применимые только к отдельным типам таких процессов. Обычный подход заключается в введении гипотезы о специфическом характере стационарности изучаемого процесса, который рассматривается как результат воздействия некоторых детерминированных факторов на стационарный процесс. Детерминированный фактор является некоторым трендом, имеющим физическое обоснование. После вычитания тренда можно анализировать процесс методами стационарных процессов. Часто бывает, что вычисление тренда само по себе несёт полезную информацию. Для амплитудно-временных реализаций нестационарных сигналов, получаемых при просвечивании среды характерны следующие зависимости:

$x(t) = a(t) + u(t)$, $x(t) = a(t) \cdot u(t)$, $x(t) = u(tn)$, где $u(t)$ – реализация стационарного случайного процесса $u(t)$, а $a(t)$ – заданная функция, в точности повторяющаяся для каждой реализации, т.е. тренд. Такие элементарные нестационарные модели можно комбинировать или обобщать, добиваясь лучшего соответствия реальным физическим условиям.

Подбор модели детерминированной составляющей, основанный на физических явлениях, позволяет применить те или иные математические

преобразования для устранения тренда и получения новой информации и далее применить обычные методы анализа. Например, при выполнении анализа с учётом дисперсии скорости звука в волноводе необходимо применить вейвлет-анализ, поскольку скорость звука частотно зависима.

Для выявления амплитудной модуляции обычно применяется динамический спектр, преобразования Гильберта, биспектр и т.д. Комбинации этих видов анализа повышает информативность обработки.

2.1. Вейвлет-преобразования, как эффективный инструмент исследования нестационарных (сейсмических) процессов в приповерхностных слоях грунта для выявления неоднородностей естественного и техногенного происхождения

При наличии неоднородностей в грунте, дефектов в подземных конструкциях, частотно – модулированный отражённый сигнал в условиях дисперсии становится резко нестационарным. Меняется его форма в зависимости от соотношения высоко-частотной и низко частотной зоны Френеля и размеров неоднородностей. Локально во времени изменяется задержка и частота с изменением релаксационных характеристик среды. Вейвлет – преобразование имеет преимущество перед преобразованием Фурье за счёт наличия свойства локальности у вейвлетов. Вейвлет – преобразование расчленяет сигнал на отдельные частотные компоненты, что даёт возможность изучать каждую из этих компонент с разрешением, соответствующим её масштабу. Благодаря этому свойству вейвлеты могут «сфокусироваться» на резких перепадах сигнала (изменение фаз при отражении от границ, смена

типа дисперсии и т.д.). Если Фурье – анализ имеет постоянную полосу анализа, то вейвлет можно рассматривать как фильтр с постоянной относительной полосой пропускания. Это позволяет в условиях нестационарности сигнала существенно повысить помехоустойчивость при выделении признаков, связанных с неоднородностью грунта и дефектами в подземных конструкциях. Необходимо подбирать тип вейвлетов в зависимости от типа нестационарности сигнала и априорных физико-математических моделей. Для использования того, или иного типа вейвлетов (Добеши, Шеннон, Морлет и др.) и подбора коэффициентов необходимо определить целевые волны в соответствии геологическими условиями и адаптировать программные средства. Применение предварительной фильтрации также на основе принципов вейвлет-анализа позволяет получить дополнительный выигрыш в помехоустойчивости.

3. СОВРЕМЕННЫЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРУНТА И СРЕД БЛИЗКИХ К НЕМУ, УЧИТЫВАЮЩИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ГРУНТА (ЭФФЕКТ ВОЛНОВОДА, ЗОНЫ ФОКУСИРОВКИ ЛУЧЕЙ, ДИФРАКЦИЯ, ФАЗОВАЯ СКОРОСТЬ И ДР.). ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛОГИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ГРУНТЕ

Распространение звука в грунте можно математически описать в виде решений волнового уравнения с учетом граничных условий и особенностей среды. Существует два теоретических подхода к решению волнового уравнения. Первый из них базируется на лучевой сейсмоакустике. В основе ее лежат представления о лучах, определяющих область пространства среды, в которую попадает энергия сигнала, излучаемая источником, т. е. лучевых картин (диаграмм). По результатам измерений параметров волн и сопоставление их с расчетными траекториями определяются неоднородности в среде.

Второй подход (вторая форма решения) основывается на теории нормальных волн, согласно которой распространение описывается характеристическими функциями, называемыми модами (нормальными волнами). Каждая из них представляет решения волнового уравнения. Разделение простых волн происходит в спектральной области. Модели лучевой сеймики грунта широко используется при поиске полезных ископаемых (т.е. для глубинной сейсморазведки в полевых условиях при отсутствии промышленных помех). В городе в ограниченных условиях используются традиционные методы лучевой сейсмоакустики, томография, ПВ и ОГТ, основанные на измерении характеристик преломленных и отраженных волн с использованием этой модели. Однако, эти модели не учитывают

ряд физических явлений, происходящих в приповерхностных слоях грунта до глубин 30-50 метров. К ним относятся дисперсия и частотно зависимая фазовая скорость, влияющая на затухание энергии, интерференция волн в условиях волновода и связанные с ней при многократном отражении от границ каустики, зона конвергенции, наличие всплесков дифракционных (конических) волн от неопределённых неоднородностей и др.

Поэтому в этих условиях более подходящими являются модели Бреховских, Клея, Толстого, Гуревича, Гамильтона, Лайтхилла, Сакса, Пао, Притчетта, Урика, Пекериса, Брэгга. Рассмотрим их.

Данными авторами выявлены причины дисперсии волн. Основными причинами ее является рассеяние и поглощение энергии в среде с конечной добротностью. Дисперсия является основной причиной различия фазовой и групповой скорости (под фазовой скоростью понимается скорость перемещения горба волны или какой либо другой фазы) в направлении распространения. Под групповой скоростью понимается скорость переноса энергии между точками пространства. При волноводном распространении звука в среде ввиду многократных отражений от границ образуются интерференционные волны. В этих условиях хаоса волн бессмысленно их разделять по скорости. Поэтому принято считать, что существует фазовая (частотно зависимая) и групповая скорости.

Модели П.Притчетта, Лайтхилла, Сакса и Пао.

Авторами выведено выражение для определения этих скоростей.

$$V_{гр} = \frac{d\omega}{d\chi} V_{ф+х} \frac{dV}{d\chi},$$

где $V_{гр}$ – групповая скорость, $V_{ф}$ – фазовая скорость, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота, $\chi = 2\pi/\lambda$ – волновое число. После преобразований

$$V_{гр} = V_{ф} / (1 - \chi \frac{dV_{ф}}{d\omega})$$

групповая скорость больше

фазовой, а различие этих скоростей связано с геологическими характеристиками грунта.

С точки зрения обработки нестационарных процессов сигнал содержит амплитудно и частотно модулированные компоненты. Индексы модуляции связаны с особенностями неоднородностей. П.Притчеттом проведены эксперименты, подтверждающие необходимость при обработке результатов учитывать дисперсию скорости звука.

Предложенные модели могут быть использованы наиболее эффективно для приповерхностных слоёв грунта, где дисперсия более выражена.

Модель Д. Урика

В работах Д. Урика исследуются релаксационные процессы и поглощение звука в грунтах. Релаксационные процессы возникают из-за того, что необходимо конечное время для реакции среды на изменение давления, т.е. возвращение среды в первоначальное состояние. Модели сейсмоакустических релаксационных процессов бывают нескольких типов: структурная релаксация имеет место при условии, что звуковая волна вызывает изменение структуры жидкости; химическая релаксация включает диссоциацию ионов, которая периодически изменяется благодаря сжатию и растяжению, обусловленная звуковой волной. Эти процессы являются причиной поглощения энергии звука (инфразвука-сеймики). Релаксация частотно зависима.

Для получения частотной зависимости, обусловленной эффектом релаксации, в законе Гука добавляется член, зависящий от времени

$$\lambda\rho = C2\lambda\rho + b \frac{d(\lambda\rho)}{dt},$$

где b – постоянная, C –

скорость, $\lambda\rho$ – изменение плотности, $\lambda\rho \equiv \lambda\rho_0$ в момент $t=0$, $\lambda\rho = p_{\text{оexp}}(-t/\tau\rho)$, $\tau\rho \equiv b/c^2$ – время релаксации процесса, $\lambda\rho$ зависит от числа активно участвующих в процессе молекул и является функцией давления, температуры и др. При выводе волнового

уравнения используют модифицированный закон Гука, который учитывает гармоническую зависимость от времени $\exp(i\omega t)$ и пространственную зависимость p_s . Экспоненциальный коэффициент поглощения после решения уравнения даёт:

$$\alpha_e = \frac{\omega^2 \tau_p c_p}{rc^2 (1 + \omega \tau_p^2)},$$

где ω – частота, $c_p = (c\sqrt{2} [(1+\omega 2\tau_h^2) / ((1+\omega 2\tau_h^2)^{1/2} + 1)]^{1/2})$, т.е. фазовая скорость зависит от звуковой частоты и частоты релаксации. Таким образом, она зависит от дисперсии в среде. Коэффициент поглощения, обусловленный релаксационным процессом будет

$$\alpha_{тр} = \frac{A f_r f^2}{f^2 + f_p^2} \text{ дБ/расстояние.}$$

$A = 8,68(\pi/c)F$, F – часть молекул, принимающих участие в процессе релаксации.

Величина потерь за период колебаний

$$\frac{a_p}{f} = A \frac{f \times f_p}{f^2 + f_p^2}$$

Это выражение имеет макси-

мум при $f = f_p$. Физический смысл процесса состоит в следующем. Если период звуковой волны много больше времени релаксации, то внутренние перестройки успевают следовать за звуковым полем и тогда нет значительных потерь энергии за период. Эти малые потери так же будут в случае, когда период звуковой волны много меньше $\tau\rho$ и внутренние изменения не успевают произойти.

В ряде работ показано, что частотно-зависимое явление релаксации обусловлено диссоциацией молекул ионов, в частности $MgSO_4$, $B(OH)_3$.

Проведенные исследования установили, что существует дисперсия, обусловленная геометрией волновода и релаксационными свойствами грунта.

Сейсмические модели на основе теории нормальных волн (мод). Связь спектральных характеристик отраженных сигналов с физико-механическими свойствами грунта.

Метод аналогии в интерпретации.

Анализ волнового уравнения в условиях приповерхностных слоях грунта показал, что решение задач распространения сигналов можно осуществить на основе теории нормальных волн (мод) с использованием динамических аналогий. Эти аналогии дают возможность перенести разработанные и апробированные в других колебательных системах методы на малоисследованные объекты – приповерхностный слой грунта. Доказана аналогия

между электрическими, механическими, сейсмоакустическими системами, поскольку формально они описываются одними и теми же уравнениями динамики. Из них следует, что трение, масса и жесткость (податливость) определяют движение физических тел так же, как сопротивление (импеданс), индуктивность и емкость определяют электрический ток, акустическую жесткость. Изучение механических колебательных систем сводится к определению изменений во времени линейной скорости распространения волн после того, как в среде произошло возмущение (ударом как источником возбуждения). Среда представляется как многозвенный контур, последовательно соединенных механических элементов. Каждый из контуров обладает своей добротностью, резонансной частотой и антирезонансом. В соответствии с добротностью контуры имеют полосу пропускания частот. Имеются полосовые фильтры, фильтры нижних и верхних частот. Скорости определяются спектральными характеристиками. Решение механического уравнения системы состоящей из массы, механического поступательного сопротивления упругого элемента имеет вид экспоненты. При распространении сигнала происходит его отражение от границы или препятствий (дефектов, трещин) на пути. При отражении от неоднородностей меняется фазовая скорость. На частотах, равных половине длины волны, происходит резонанс (максимум амплитуды).

Модель Л.Бреховских-К.Кляя-А.Толстого.

В условиях слоистых сред для напряжённого состояния грунта используется следующая формула:

$$\psi = \frac{2\pi i}{h} \sum_{l=0}^{\infty} chb_l z_0 cpbz H_0^{(1)}(x_l r);$$

$$b_l = \frac{i(l-1/2)\pi}{h};$$

$$hx_l = h(b_l^2 + r)^{1/2} = [(rh)^3 - (l+1/2)^2 \pi^2]^{1/2},$$

где $l = 0, 1, 2, \dots$; $r = 2\pi/\lambda$; h – глубина залегания слоя; z_0 – глубина нахождения источника; z – глубина размещения приёмника; $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода.

Каждая мода может быть представлена соответствующей парой плоских волн, падающих на границы под углом β и распространяющихся зигзагообразно путём последовательных отражений. Связь между углом скольжения β и номером моды n для акустически мягкой поверхности и жёсткого отражающего слоя определяется соотношением

$$\sin \beta = (n - \frac{1}{2})\lambda/d.$$

Более высоким модам соответствуют более крутые углы скольжения. Моды, для которых угол скольжения эквивалентной плоской волны меньше критического, будут распространяться с относительно низким затуханием. Поскольку углы изменяются с номером моды, нормальные волны будут распространяться с разными фазовыми скоростями.

Распространение сигнала в многослойной грунтовой среде происходит в результате волноводных эффектов. В случае, когда излучатель и приёмник находятся на поверхности земли, волновые колебания не могут рассеиваться по всем направлениям и остаются в пределах приповерхностного канала. В этой зоне сигнал распространяется на большие расстояния путём последовательных отражений по траекториям, представляющим дуги окружностей между точками касания лучей поверхности земли. Лучи, исходящие под малыми углами, остаются в слое, при больших углах – рассеиваются. Ниже зоны канала существует зона тени. Тень не является абсолютной, т.к. в неё проникает сигнал, рассеянный поверхностью и диффундирующий из канала в связи с особой природой нижней границы. Оба этих процесса обуславливают утечку звука из канала, её величина определяется коэффициентом утечки (дБ/м), который выражает затухание захватываемого каналом сигнала. Коэффициент утечки изменяется в зависимости от неровностей поверхности, толщины канала, градиента скорости звука ниже залегающего слоя и частоты сигнала. При этом интенсивность сигнала в пределах слоя с глубиной постепенно уменьшается и резко падает при пересечении нижней границы слоя и перехода в зону тени. На очень низких частотах прекращается захватывание сигнала. Это происходит, когда частота 1-й моды (волновая теория), т.е. длина волны, становится слишком большой, чтобы уместиться в канале. Максимальная длина волны

$$\lambda_{\max} = \frac{8}{3} \sqrt{2} \int \sqrt{H(r)} N(H) dz,$$

где $H(r)$ – показатель преломления на глубине r в канале, $N(H)$ – показатель преломления на нижней границе канала. Эту особенность можно использовать при определении границ литологических слоев для уточнения геологических данных.

В случае, когда скорость распространения продольных волн в подстилающем слое грунта (V_{p2}) больше скорости этих волн (V_{p1}) в выше залегающем слое, т.е. $V_{p2} > V_{p1}$, при углах падения α больше критического угла i_{pp} , коэффициент отражения от

границы между этими слоями сильно возрастает. Распространяющаяся внутри слоя монотипная продольная волна при каждом акте отражения от этой границы ослабляется лишь незначительно. Вся энергия, излучаемая источником, перераспределяется между кратными монотипными и обменными волнами и переносится ими, т.е. канализируется внутри слоя. Этот слой с пониженными значениями скорости называют волноводом. При этом необходимо учитывать следующее. В результате наложения различных типов волн, в зависимости от отношения длины волны к мощности слоя, расстояния от источника излучения до границы слоя, расстояния от источника до точки наблюдения, возникают суммарные (интерференционные) волны, плавно и закономерно распределённые в некоторой области среды. Скорость распространения интерференционных волн, образующих ряд устойчивых групп, отличается от скорости простых волн и зависит от длины волны. Эти группы волн называют модами. Вследствие интерференции простых волн, прошедших разными путями внутри слоя, скорость каждой монохроматической составляющей зависит от длины волны, т.е. возникает дисперсия фазовой V_{ϕ} скорости. Различают нормальную дисперсию, когда скорость V_{ϕ} возрастает с увеличением длины волны, и аномальную, когда скорость V_{ϕ} убывает с увеличением длины волны. Во всех случаях дисперсия скорости приводит к растяжению первоначальной импульсной волны в пространстве – удлинению графика колебаний. При нормальной дисперсии вблизи переднего фронта волны концентрируются длинноволновые составляющие.

График амплитудно-временных колебаний характеризуется убыванием со временем видимых периодов; при аномальной дисперсии видимые периоды возрастают. Другими словами возникает частотная модуляция периодов волны. Для описания волн в целом применяют групповую скорость, т.е. скорость огибающей всего волнового пакета.

Модели Брэгга, Вульфа, Гуревича, Боганика.

В работах этих авторов исследуются дифракционные (конические) волны.

Распределение интенсивности отражённых (вторичных) волн в среде имеет особенности в том случае, когда отражающая граница не плоская. Это характерно для напластования четвертичных отложений. Изменение фациального состава грунтов вдоль по простиранию слоёв приводит к изменению интенсивности наблюдаемых дифракционных волн вследствие постепенного изменения условий их распространения.

Если через α обозначить угол падения плоской падающей волны, а через α_n – угол отражения для монотипной волны, то связь между ними

$$\sin \alpha_n = \sin \alpha \pm n \frac{\lambda}{l}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots, \lambda - \text{длина}$$

волны, l – расстояние между границами.

Различным значениям целых чисел соответствуют незеркально-отражённые

(побочные) волны различных порядков. Образование побочных волн на шероховатой отражающей границе сходно с образованием дифрагированных

световых, рентгеновских волн на дифракционных решётках в квантовой механике.

При отражении от выпуклой границы расхождение волны возрастает по сравнению с расхождением в случае плоской границы. Наоборот, при вогнутой границе наблюдается уменьшение расхождения. Таким образом, по сейсмоотрассе расхождение либо отсутствует, либо имеет отрицательную величину. При этом возникает пересечение соседних лучей и образуется сложное интерференционное колебание, не поддающееся расчёту лучевым способом. Геометрическое место пересечения соседних лучей называют каустикой.

Наиболее полно изучен случай, когда периодичность отражающей границы приблизительно равна длине волны. Иногда такую границу называют шероховатой геометрически, либо физически. При скорости распространения волн в подстилающем слое большей, чем в вышележащем, после нескольких сот отражений от границы между ними, возникают каустики и дивергенция лучей. Каустика – это частичное когерентное (синфазное) сложение энергии лучей на разных частотах, а конвергенция – полное когерентное сложение. Амплитуды сигнала в этом случае увеличиваются на 20-30 дБ (до 30 раз) относительно уровней при экспоненциальном затухании. В условиях приповерхностных слоёв грунта эти модели можно использовать для выделения дифракционных волн, определения границ слоёв, состояния свай в грунте (дефектоскопия), определения коэффициента анизотропии.

Модель Е. Скучика.

На примерах колебаний стержней автором показано, что конец стержня представляет собой объёмный резонатор. Амплитуда колебаний на концах его может увеличиваться до 80 раз по сравнению амплитудой проходящих по стержню волн. Амплитуда колебаний стержня в точке возбуждения есть сумма падающей волны и бесконечного множества отражённых, прошедших расстояние 1, 2l, 4l и т.д. волн, амплитуда которых удваивается.

Амплитуда

$$A = \frac{F}{Z} (1 + 2e^{-i2kl} + 2e^{-i4kl} + \dots) = \frac{F}{iZ} \operatorname{ctg} kl,$$

где F – сила, Z – импеданс, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны, l – длина стержня, $i = \sqrt{-1}$

$$\frac{F}{A} = z_i \operatorname{tg} kl - \text{механический импеданс.}$$

Он является механическим аналогом сопротивления электрической цепи и характеризуется амплитудно-частотной характеристикой с резонансными максимумами и антирезонансами. Они определяются значениями $\operatorname{ctg} kl$. Для максимумов $\operatorname{ctg} kl = \infty$,

$$kl = v\pi, v = 0, 1, 2. \text{ Для антирезонансов } \operatorname{ctg} kl = 0, kl = (2v + 1) \frac{\pi}{2}, \text{ где } v = 0, 1, 2,$$

Характеристический импеданс есть геометрическое среднее между резонансным максимумом и антирезонансным минимумом на частотной кривой скорости возбуждения. С учётом потерь $Z = Z(1 + \frac{i\eta}{2} + \dots)$.

Резонансные кривые для продольных, поперечных и изгибных колебаний аналогичны за исключением диапазона частот ниже первых резонансов продольных колебаний. Также имеются различия в собственных частотах контуров. При дальнейшем распространении колебаний импульсы продольных волн затухают, а амплитуда дополнительных импульсов, появляющихся при отражении сигнала, увеличивается. В результате при определённых фазовых соотношениях их амплитуды складываются и появляются зоны фокусировки с максимумами амплитуд (в акустике это явление называется каустикой, а при полном сложении импульсов на всех частотах – конвергенцией).

Поперечные колебания описываются дифференциальным уравнением четвёртого порядка. Решение представляется в виде бегущей волны.

$$\sum = A e^{j\kappa x + j\omega t},$$

где A – амплитуда, $j = \sqrt{-1}$, $\kappa = \frac{\omega}{c_\phi}$, ω – частота,

$$c_\phi = \alpha \sqrt{\omega}, \alpha^4 = \frac{EJ}{m}, E - \text{модуль деформации, } J - \text{момент инерции, } m - \text{масса.}$$

График фазовой скорости имеет вид прямой линии с наклоном, равным $\sqrt{\omega}$.

Решение этого уравнения в круговых и гиперболических функциях имеет вид: $\xi = A[\operatorname{ch}k + \operatorname{cos}kx - \frac{\operatorname{ch} - \operatorname{cos}kl}{\sin kl - \sin l} (\operatorname{sh}kx + \operatorname{sin}kx)]$, κ – волновое число = $\frac{2\pi}{\lambda}$.

Это решение содержит собственные частоты и формы колебаний. Выражение, описывающее форму резонансной кривой поперечных колебаний, после умножения на \sqrt{kl} практически такое же, что и для продольных, за исключением области, лежащей ниже первых резонансов. Кроме того, продольные колебания (первые гармоники) выше по частоте, чем поперечные. Далее частоты перекрываются.

В этой модели приводятся аналогии между электрическими (сейсмоакустическими) и механическими колебательными системами.

Сопротивление механического контура на резонансной частоте связано с его добротностью $Q = \frac{\omega_0 M}{R}$, где ω_0 – резонансная частота, M – масса,

R – сопротивление вне резонанса, либо величиной потерь η , которая обратно пропорциональна добротности. Потери энергии, обусловленные трением, выражаются через коэффициент затухания амплитуд колебаний контуров после прекращения

действия силы $\delta = \frac{\omega_0 \eta}{2}$, а логарифмический декремент затухания Λ определяется как отношение двух соседних максимумов. $\Lambda = \delta(t_2 - t_1)$; разность $t_2 - t_1$ – период затухающих колебаний; т.е. эти параметры обусловлены трением и силой сцепления.

В механическом колебательном контуре при возбуждении его ударом возникает внешнее и внутреннее трение. Внешнее трение определяет смещение и его производными по времени. Таково трение скольжения, трение, связанное с реакцией на звуковую колебательную систему. Оно зависит от массы и частоты. Внутреннее трение определяется деформацией элементов податливости. В твёрдом теле и соответственно в грунте существует два типа деформаций: изменение объёма и сдвиг. Соответственно имеются и два вида внутреннего трения, обусловленные изменением объёма и сдвиговыми деформациями, независимыми друг от друга. Существует несколько видов деформаций. Классический вид внутреннего трения – жидкостное трение. Потеря энергии за период колебаний

пропорциональна коэффициенту потерь и частоте. Другой вид деформации – гистерезис (эффект накопления деформаций). Гистерезис характеризуется остаточной деформацией ξ_r податливого элемента, остающейся после снятия внешней силы, т.е. деформация запаздывает по фазе относительно внешней силы. Постоянная гистерезиса $\eta_n = \frac{\xi_r}{\xi}$, ξ

– максимальное смещение. На низких частотах и пластических течениях материалов η_n – пропорционально времени действия силы, а коэффициент потерь $\eta = \text{const}$, $T = \frac{P}{\omega}$ (P – некая постоянная). И,

наконец, деформация является функцией времени и связана с нарушением внутренних молекулярных связей и внутреннего равновесия. Если на систему действует внешняя сила, то деформация приближается к своему предельному значению по экспоненте. Постоянная экспоненты соответствует времени релаксации напряжений τ . Тогда $\xi = F K(1 - e^{-t/\tau})$, где F – частота, K – ёмкость. Этот вид деформации аналогичен расструктуриванию грунта при вибро-воздействии.

В заключении можно сказать, что использование модели возможно для исследования свойств грунта для малых глубин с помощью поверхностных волн. Модель можно использовать при определении прочностных характеристик в фундаменте, сваях, надземных части зданий, а также и в грунте.

Модель В. Болотина (группа авторов).

Авторами рассмотрены модели распространения в твёрдых средах приповерхностных классических волн Релея, Лява и Стоунли. Волны Релея с вертикальной поляризацией, распространяются без дисперсии. Волны Лява с горизонтальной поляризацией, распространяются с дисперсией скорости. Существование этих волн возможно лишь при добавлении к полупространству анизотропного упругого слоя толщиной h , характеристики которого отличаются от характеристик полупространства. Волны Стоунли возникают на границе двух жёстко связанных упругих полупространств.

Решение волновых уравнений соответствуют динамическим уравнениям Ляме для 2-х компонент вектора (U_1, U_2).

$$U_1 = A \cos[S_1(h_1 + x_3)] \exp[ik(x_1 - c_1 t)]$$

$U_2 = A \cos(S_1 h) \exp[ik(x_1 - c_1 t) - S_2 x_3]$, где h – толщина слоя, c_1 – скорость волны сдвига,

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega - \text{частота.}$$

$$S_1 = \sqrt{\omega^2 / c_1^2 - k^2}; \quad S_2 = \sqrt{k^2 - \omega^2 / c_2^2}; \quad x_3, x_1 -$$

координаты, c_1 – скорость в исследуемом слое, c_2 – скорость в подстилающем слое.

Различные корни уравнения при заданной частоте соответствуют волнам Лява различных номеров. Число их тем больше, чем больше величина $h \omega / c_1$.

$$\text{Фазовая скорость } c = \omega / k \quad (k = \frac{2\pi}{\lambda}), \quad c_t = \sigma \omega / \sigma k$$

– групповая скорость. Как видно из формул скорости зависят от толщины слоя.

Эта модель относится к волноводному типу распространения энергии в приповерхностных слоях грунта при наличии подстилающего слоя.

Анализ приведенных сейсмических моделей и их использование для решения вопросов инженерной геологии показывает следующее.

1. При наличии сложной слоистой толщи с резко отличающимися по акустическим характеристикам грунтами (морена, песчаные прослои, отложения протерозоя) обобщённая модель распространения сейсмических сигналов для приповерхностных слоёв может быть представлена в виде суперпозиции (сложения) волноводов.
2. В условиях волноводов для приповерхностных слоёв характерно наличие частотно зависимых многократно отражённых от границ литологических слоёв интерференционных волн, затрудняющих разделение простых волн по временным и амплитудно-временным характеристикам сигналов.
3. В то же время в этих условиях характерно распространение поверхностных волн типа Рэлея, Лява, Стоунли, а так же дифракционных волн. Дифракционные волны и волны Лява обладают свойствами дисперсии скорости звука и характеризуются фазовой и групповой скоростью как частотно зависимые величины.
4. Дисперсия скорости звука зависит от геометрии слоёв (волноводов), неоднородностей внутри слоя, релаксационных свойств грунта и описывается спектрально-временными пространственными характеристиками отражённых сигналов.
5. Особенности волноводного эффекта могут быть использованы для определения параметров неоднородностей и оценки физико-механических характеристик грунта, а также необходимо учитывать при составлении схемы измерений абсолютных уровней вибраций.
6. Использование той или иной модели позволит адаптировать программные средства для обработки сигналов и измерению признаков.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИИ ГРУНТА И ОБРАБОТКЕ СИГНАЛА МЕТОДАМИ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

4.1. Волноводное распространение в приповерхностных слоях грунта, слоистость и резонансные частоты, зоны фокусировки лучей, каустики и зона конвергенции лучей (лучевое представление)

Многочисленные эксперименты в приповерхностных слоях грунта с использованием вейвлет-анализа показали, что эта среда обладает всеми признаками суперпозиции волноводов и является сложной многоконтурной колебательной системой с частотной характеристикой полосового фильтра каждого из них. При наличии волновода с глубиной осью звука лучи пересекаются на поверхности. Вблизи таких участков происходит большое усиление сигнала. Эти участки называются каустиками, зонами конвергенции или зонами фокусировки. В случае каустик происходит частичное сложение сигналов в фазе, а для зон конвергенции - полное сложение. С точки зрения динамики строительной механики на этих участках строительных площадок по пространству существуют максимумы динамических коэффициентов воздействия механизмов на грунт основания. По аналогии с оптикой интенсивность звука в этих областях зависит от длины волны, количества фокусируемой энергии и от совершенства фокусировки. Величина отклонения амплитуды от закона цилиндрического распространения определяется

$$a_f \approx \frac{2\pi}{\lambda} r \frac{\cos\gamma}{4}, \text{ где } \lambda - \text{длина волны, } \theta - \text{угол}$$

входа лучей, определяющий размеры лучевой трубки с постоянной интенсивностью, r , γ – полярные координаты точки приёма лучей относительно фокуса линзы. Как видно пространственный

период фокусировки лучей (a , следовательно и изменяется и коэффициент динамичности) зависит от целого ряда факторов. Это сильно влияет на измерения уровней вибраций при расстановке сейсмоматчиков в зоне Френеля. Поэтому этот факт необходимо учитывать при выборе схемы измерений.

В тоже время эффект волновода позволяет решить обратную задачу, а именно, по обнаруженным зонам конвергенции можно определить вертикальную стратификацию скорости звука, а, значит, и физические свойства грунта в подстилающих волноводных слоях. Наиболее ярко это выражено, если сейсмотрасса пролегает над глубинным коллектором или тоннелем метро. В этом случае положение каустик и зон конвергенции свидетельствует о распределении скорости звука в оболочке коллектора совместно с соколеблющейся массой грунта.

Достаточно представительные экспериментальные данные были получены в разных геологических условиях и районах города. Они показали, что зоны конвергенции существуют в зависимости от характеристик подстилающего слоя (ниже оси). Величина амплитуд, частота и период их появления зависят от изменения этих условий. На рис. 5.1.1. приведены амплитудно-временные характеристики отражённых сигналов, на рис. 5.1.2. вейвлет-спектры дифракционных волн, которые соответствуют начальным участкам сигнала.

В ряде случаев наблюдаются двойные зоны конвергенции. В соответствии с моделью К. Клея и

Эти зоны соответствуют начальному прямоугольному участку графика изменения скорости с глубиной. Это явление можно использовать для определения характеристик подстилающего слоя (ниже оси канала). В спектрах сигналов наблюдались резонансные частоты. Они характеризовали мощность литологических слоев и их изменения. Затухание энергии на определенных частотах было связано с утечкой энергии из канала. В большинстве случаев границы волноводов определялись морской или протерозоем, как слоев с наибольшей

акустической жесткостью. Экспериментально показано, что для условий волновода с определенного расстояния характерен спад энергии по цилиндрическому закону. Это необходимо учесть в расчетах. Заметим, что отражения от слабых озёрно-ледниковых слоёв практически не видны. Их можно выделить только в случае применения автоматической регулировки усиления, настроенной на нужную глубину. Эта процедура проводилась в отдельных, частных случаях. Другие свойства описаны ниже.

4.2. Грунт, свая как многозвенный колебательный контур, характеризующийся параметрами мод и их форм.

Определение границ и мощностей литологических слоёв грунта, определение сплошности свай

Применение вейвлет-анализа позволило разделить спектр сигнала на отдельные колебательные контуры. Эти контуры соответствовали литологическим слоям с характеристиками фильтров полосовых частот. В соответствии с этим при возбуждении сейсмических волн и их приеме на малых расстояниях (5-7 метров) в пределах зон Френеля грунт можно представить как многоконтурную, многозвенную колебательную систему, которая определяется характеристическим механическим импедансом. Его параметры: резонансные частоты контуров, антирезонансы, среднегеометрическая амплитудно-частотная зависимость между ними, добротность контуров, декремент их затухания определяют мощность литологических слоев их границы, соотношение упруго-пластических свойств слоя, слабые места, неоднородности. Отдельно объясним явление антирезонанса с точки зрения квантовой механики. Литологическая толща грунтов с неоднородностями представляет собой контуры и комбинации диэлектриков, металлов, полупроводников, изоляторов, через которые многократно проходит возбуждаемый импульс. В любом из них существуют электроны. В разных типах этих веществ концентрации ионов различны. В некоторых из них в энергетических зонах нет ни одного энергетического уровня. Эти недоступные для электронов области называются энергетическими щелями или запрещёнными зонами (зонами Бриллюэна). Иначе говоря, существуют определённые зоны значений энергии, для которых решений волнового уравнения нет. Таким образом, на границе зон Бриллюэна, энергетическое поле имеет разрывы. Комбинация решений волнового уравнения $K = \pm \pi/a$, где a – расстояние между отражателями, даёт

стоячие волны разных энергий. Это различие обусловлено потенциальной энергией взаимодействия электронов с ионами на границе раздела слоёв с различными физико-механическими характеристиками. Различие в потенциальной энергии слоёв грунта с неоднородностями ведёт к разрыву энергетического спектра при $K = \pm \pi/a$, т.е. в спектре отражённого сигнала образуются минимумы-антирезонансы. Это явление называют потерей полуволны при отражении, т.е. скачок фазы. Таким образом, скачок фазы в вейвлет-спектре позволяют определить зону Бриллюэна – границу литологических слоёв грунта. При слежении за минимумами в спектре возможно определение расструктурирования грунта или дефектов в подземных сооружениях. Толщина слоя определяется как $\lambda/2$. Декремент затухания определяет соотношение упруго-пластических свойств различных слоев грунта (см. рис 5.2.1.).

Аналогичные явления наблюдаются и в сваях в грунте. Сигнал в свае при возбуждении колебаний также представляет собой характеристику многозвенного контура. Каждое звено соответствует механическим колебательным контурам: арматура, арматура плюс бетон внутри ее, защитный слой, вся свая в целом, свая плюс соколеблющаяся масса грунта по боковой поверхности и под острием.

На рис. 5.2.2. приведен вейвлет-спектр сигнала в свае (тип Шеннон, 1-1,5), где на различных поддиапазонах видны механические колебательные контуры, их декременты и т.д. Эти характеристики можно использовать при оценке сплошности свай.

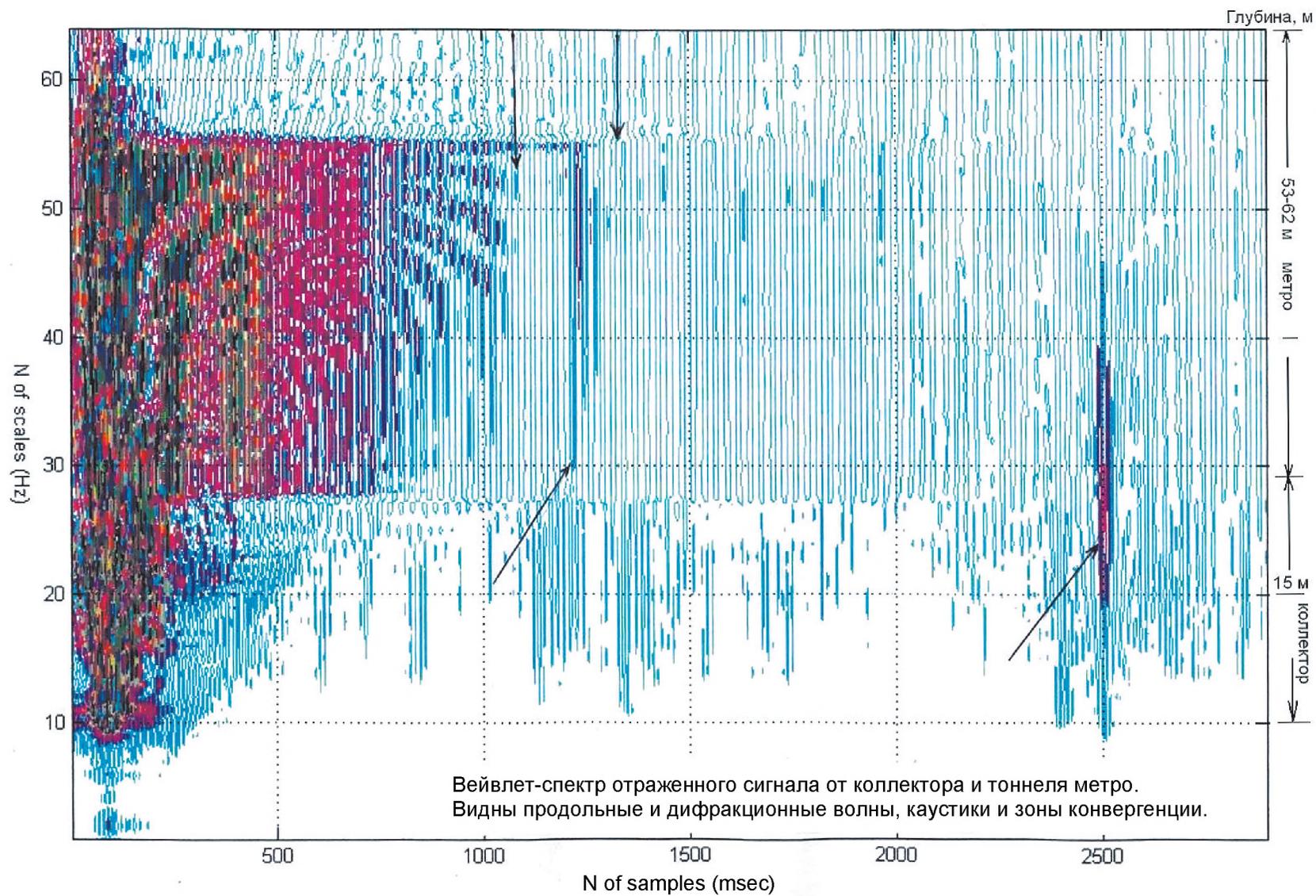
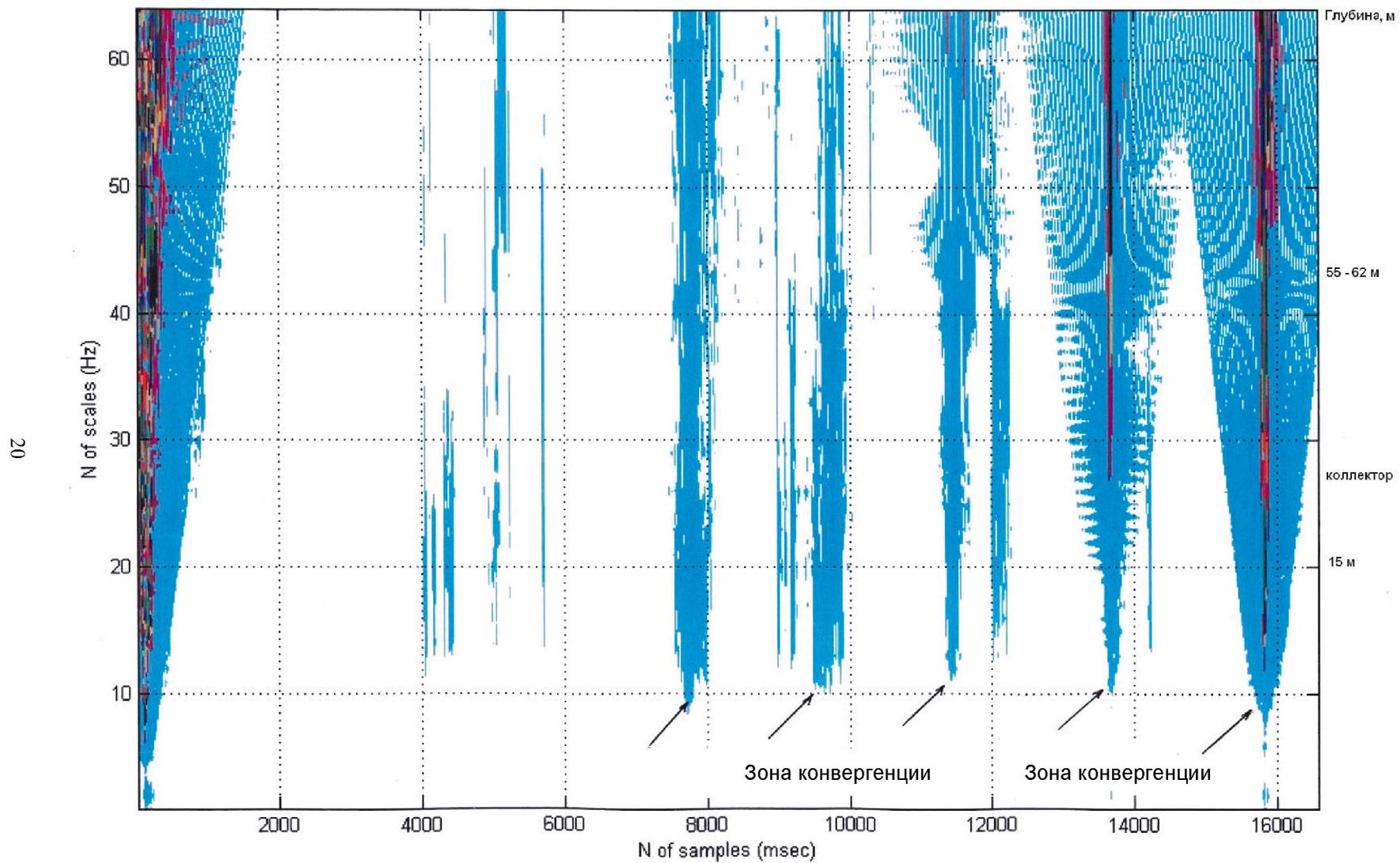


Рис. 5.1.1



С. А. Тамаркин

Рис. 5.1.2
 Вейвлет-спектр сигнала отраженного от грунта и от коллектора.
 Каустики и зоны конвергенции.

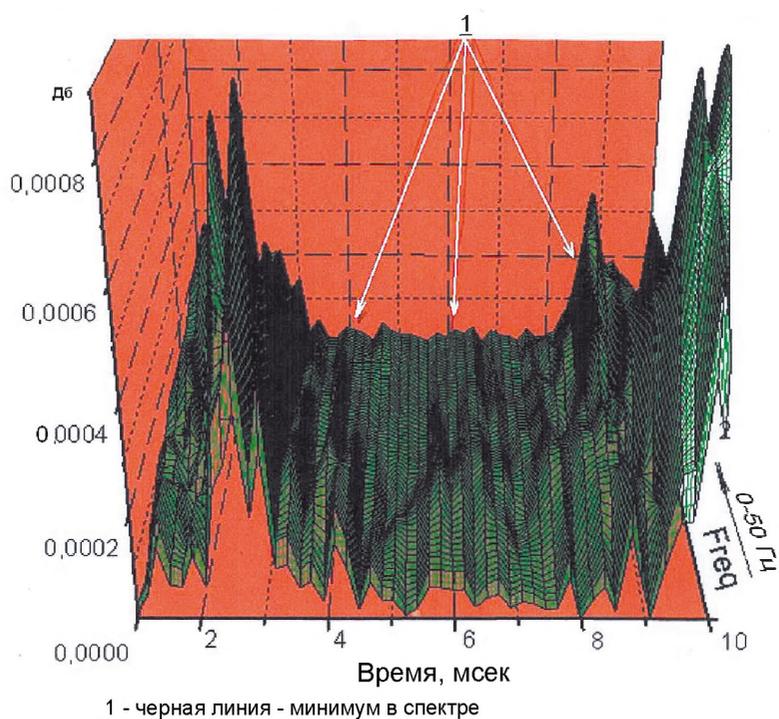


Рис. 5.2.1 Изменение фазовой скорости в грунте и коллекторе.

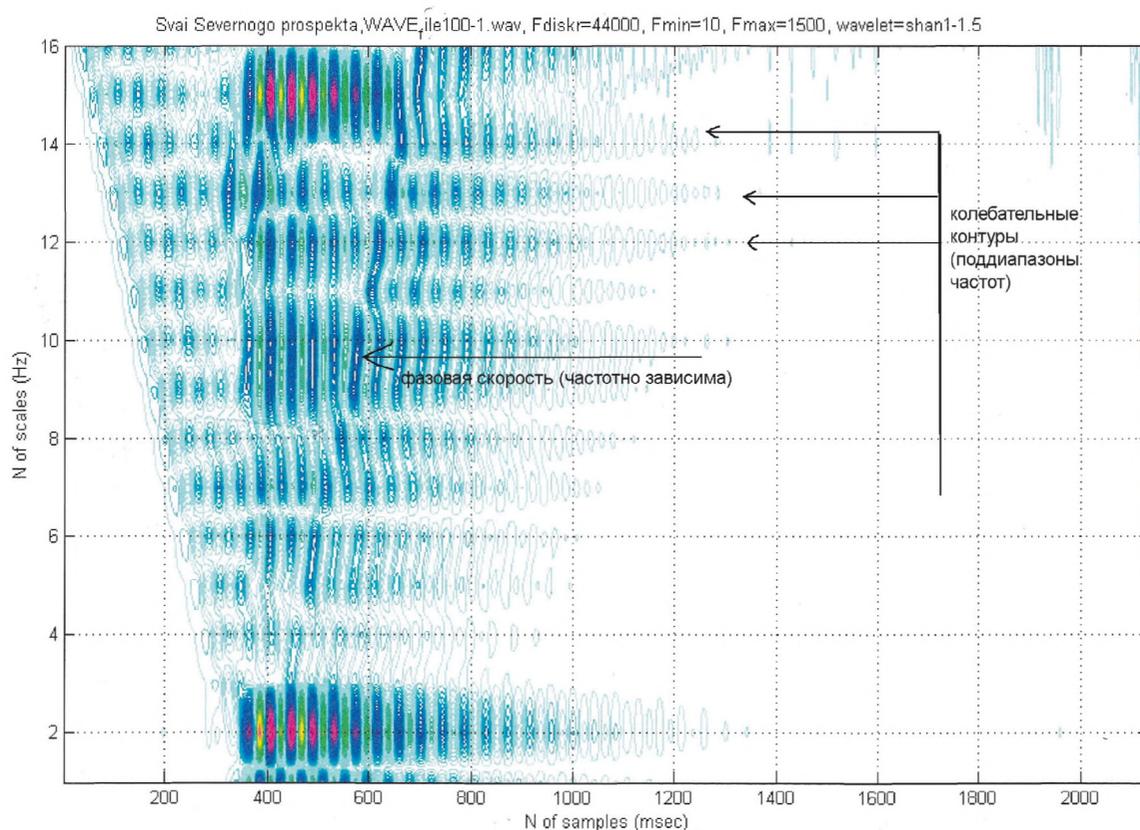


Рис. 5.2.2 Вейвлет-спектр отраженного сигнала в свае. Видны колебательные контуры, соответствующие конструкции (защитный слой - ультразвук, арматура, соколеблющаяся масса грунта по боковой поверхности и т.д.)

4.3. Исследование дисперсии звука в приповерхностных слоях грунта, сваях, фазовая и групповая скорости

Измерения в приповерхностных слоях грунта, а также сваях показали, что сигналы распространяются с дисперсией в соответствии с геометрией волновода. Для определения физических характеристик грунта измерения выполнялись по трассам длиной 50-60 м. Два датчика КД-12 устанавливались непосредственно на грунт на расстоянии 5-7 друг от друга и попеременно переставлялись по трассе. Колебания возбуждались ударом кувалды по металлической подставке на грунте. Далее выполнялось усиление сигнала, АЦП и обработка информации в ноутбуке с использованием пакета вейвлет-анализа. Диапазон частот 1-100 Гц (до 200-600 Гц). Разрешающая способность по частоте - 0,5 Гц. Фиксация результатов на принтере в системе координат амплитуда-частота-время. При измерении свай один датчик устанавливался рядом с оголовком, второй – на оголовке. Датчики КД-39. Диапазон частот 10-22 КГц. На рис. 5.3.1. приведены вейвлет-спектры сигнала для железобетонной сваи заводского изготовления, длиной 16 м, сечением 40х40 см, бетон

В-25. На рис. 5.3.2. приведена амплитудно-временная характеристика, на рис. 5.3.3. - спектр Фурье отражённого сигнала.

Множественно отражённые сигналы от конца сваи видны в виде всплеска интенсивности. Скорость продольных волн 3600 м/с, средняя скорость

поперечных волн 2300 м/с. Частота резонанса 1 КГц поперечных волн соответствует половине длины волны. Эти данные соответствуют модели Е. Скучика.

В грунте так же проводились измерения дисперсии скорости. Результаты приведены на рис. 5.3.4. По оси ординат отложена скорость м/с, по оси абсцисс – частота Гц. Рисунки соответствуют различным схемам расположения приёмников на трассе и системам измерений: пр. 1- пр. 2, пр.1-пр. 3, пр. 1- пр. 4. Фазовая скорость изменяется от 50-100 до 250 м/с и выше для частот 5-250 Гц. На частотах ниже 50 Гц скорость резко возрастает. На рис. 5.3.5. приведены вейвлет-спектры приповерхностных волн в грунте в зоне «Размыв» по ул. Карбышева. На входе этого вида обработки была использована взаимно корреляционная обработка с целью более чёткого выделения задержек в приходе отражённых сигналов по различным волнам и лучам. В представленной интерференционной картине чётко выделяются косые наклонные линии поперечных (сдвиговых) волн, что соответствует частотно зависимой фазовой скорости. В результате можно сделать суждение о том, что фазовая скорость и её изменения может быть использована в качестве признака, характеризующего физико-механические параметры грунта и для определения неоднородностей.

4.4. Исследование дифракционных (конических) волн

Эксперименты были проведены в центре города по трассе в приповерхностных слоях грунта. Сейсмотрасса располагалась над коллектором Водоканала, находящемся на глубине 14-15 м (диаметр 2 м). На рис. 5.1.2. приведены результаты вейвлет-анализа отражённых сигналов от коллектора. По временной оси наблюдается несколько периодических фокусировок лучей (максимальных амплитуд, «всплесков», обусловленных множественными отражениями между коллектором и поверхностью земли). Амплитуда последнего отражения максимальна. Внутри зон наблюдается чередование минимумов и максимумов спектральной плотности в определённой последовательности (концентрические эллипсоиды). Согласно этой модели в случае наклонной плоскости отражателя вместо концентрических окружностей наблюдаются эллипсоиды,

что зависит от наклона коллектора. Интерференционная картина спектра соответствует нескольким колебательным контурам на частотах вейвлетов Шеннона 50-60, 40-50, 20-40 Гц. Частое чередование минимумов и максимумов через 20-30 Гц соответствует сдвиговым волнам. Эти признаки позволяют сделать суждение о том, что выделенные волны соответствуют модели Брэгга, Вульфа, Бреховских, Клея и Толстого и являются дифракционными (коническими). Дифракционные волны возникают на границах волновода, а также в случае неоднородности по пути прохода сейсотрассы. Аналогичное явление наблюдается при исследовании отражённых сигналов от конца свай в грунте. На рис. 5.4.1. приведены амплитудно-временные характеристики отражённых сигналов от конца забивных и буронабивных свай. На них видно, что

так же наблюдаются зоны конвергенции с периодичностью, обусловленной прохождением волн от оголовка до острия сваи туда и обратно. Всего было исследовано несколько десятков свай и трасс на различных площадках. Параметры дифракционных

волн (глубина амплитудной модуляции, идентичность или ее отсутствие) характеризуют неоднородности, дефекты в фундаменте, свае, надземных конструкциях зданий и т.д.

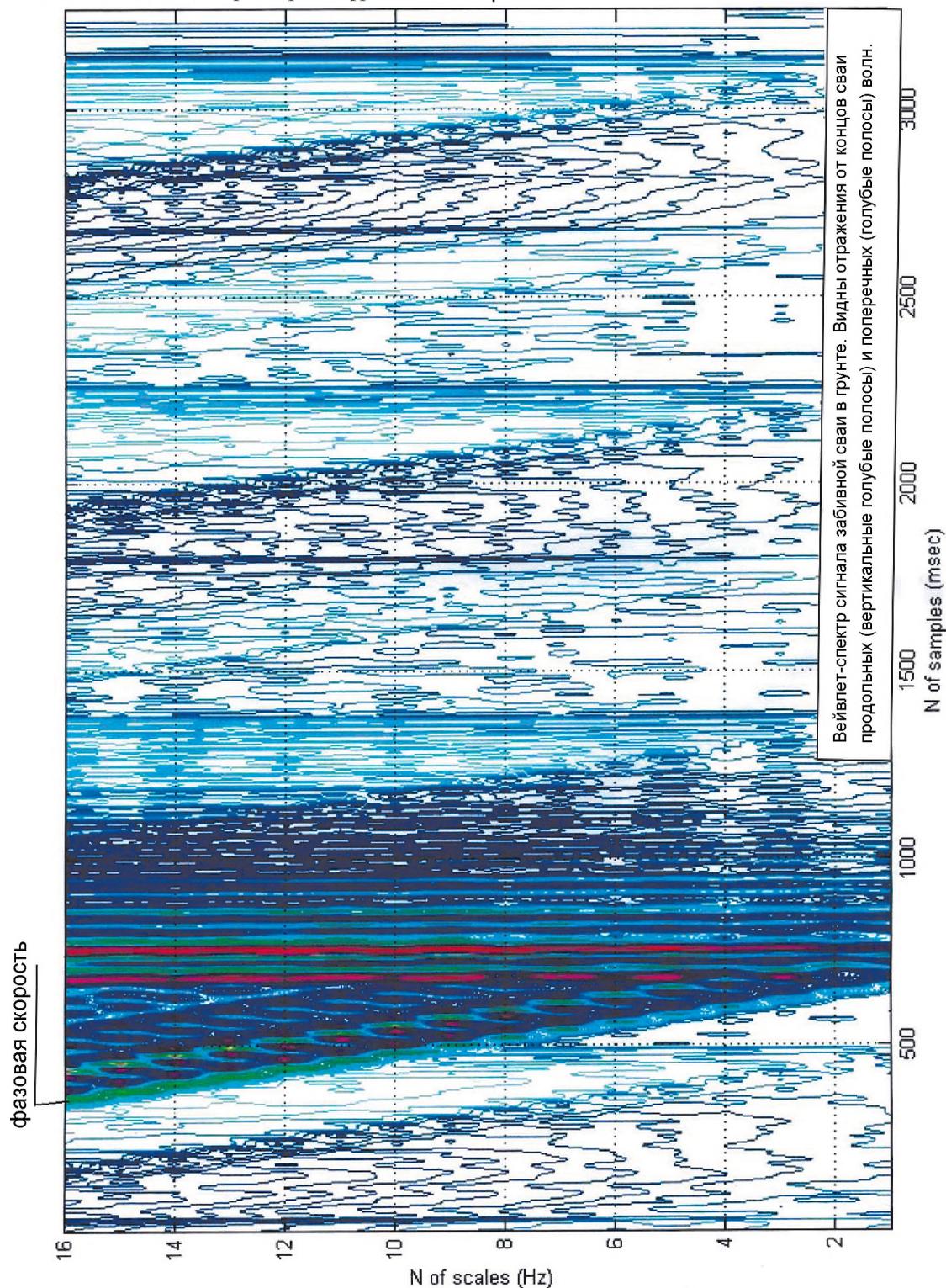


Рис. 5.3.1

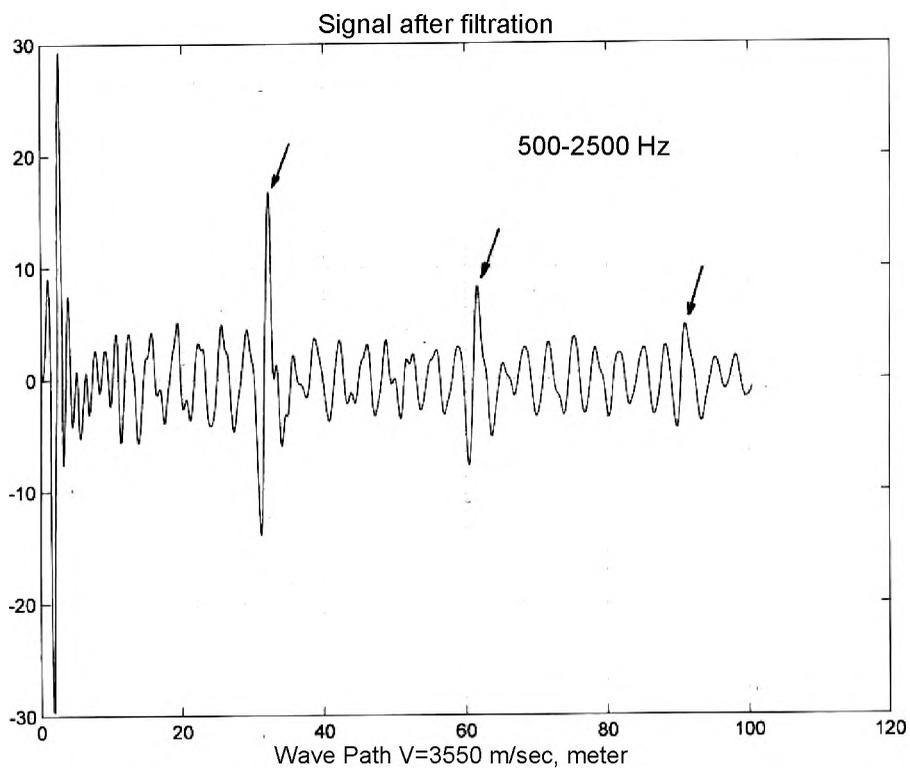


Рис. 5.3.2

Амплитудно-частотная характеристика сигнала забивной сваи L=16 м. Свая на земле, на брусках. Видны отражения от конца сваи (двойной проход).

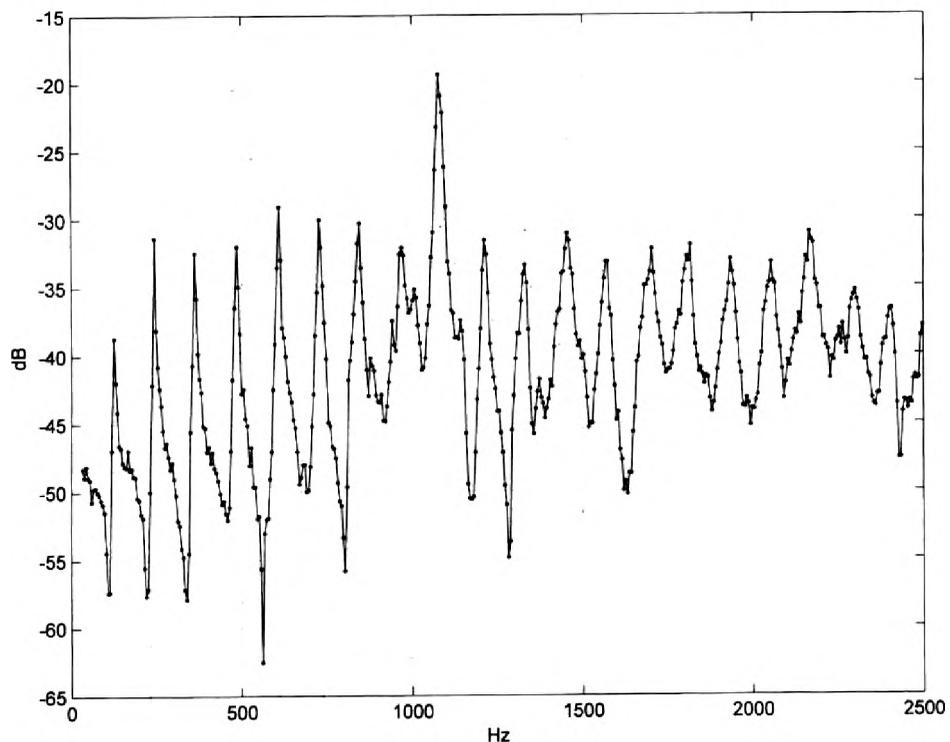


Рис. 5.3.3

Спектр поперечных волн в свае. Виден резонанс. Свая лежит на земле, на брусках.

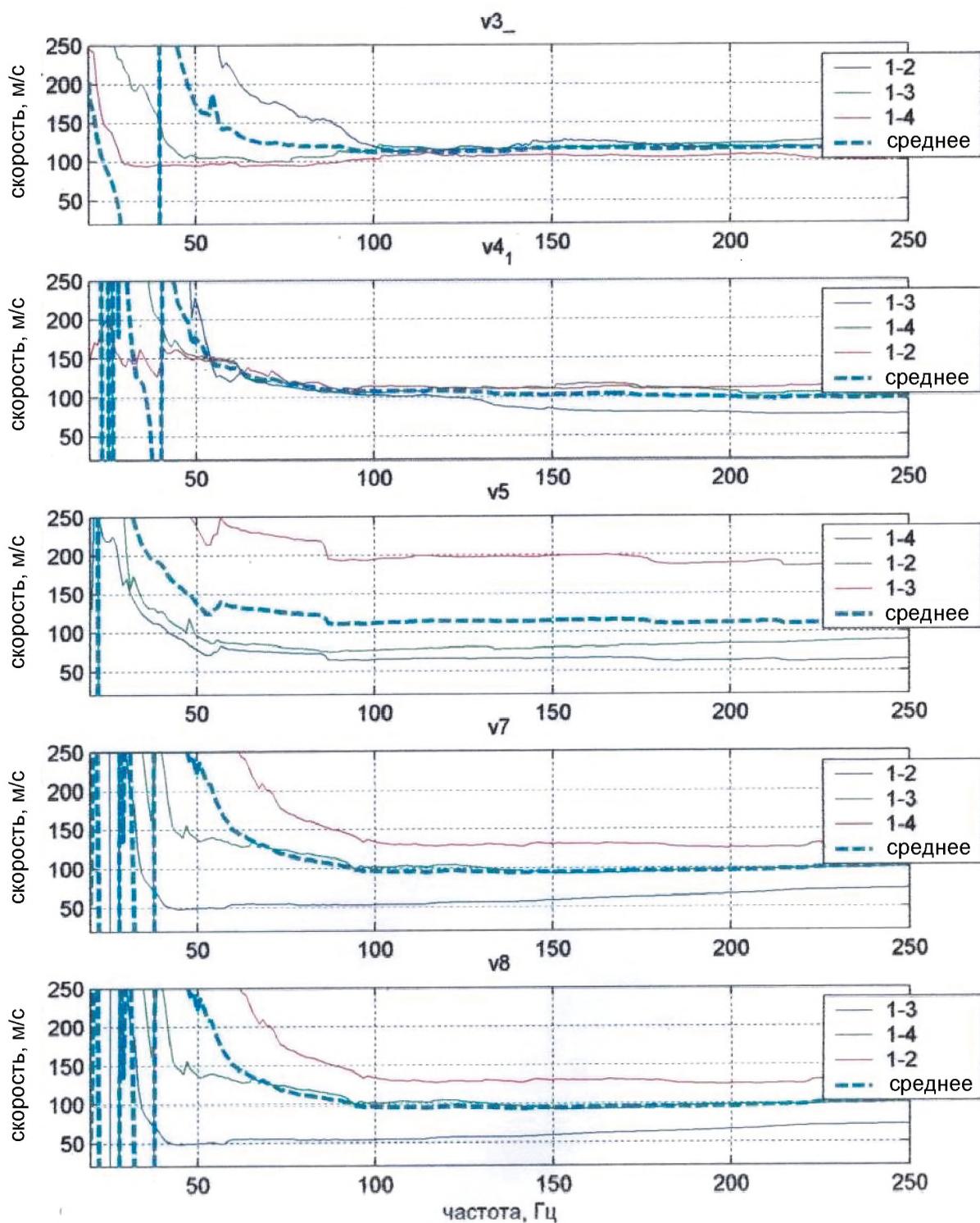


Рис. 5.3.4

Дисперсия скорости между приемниками на трассе.

V3-V8 - трассы, 1-2, 1-3, 1-4 схема расположения приемников по трассе.

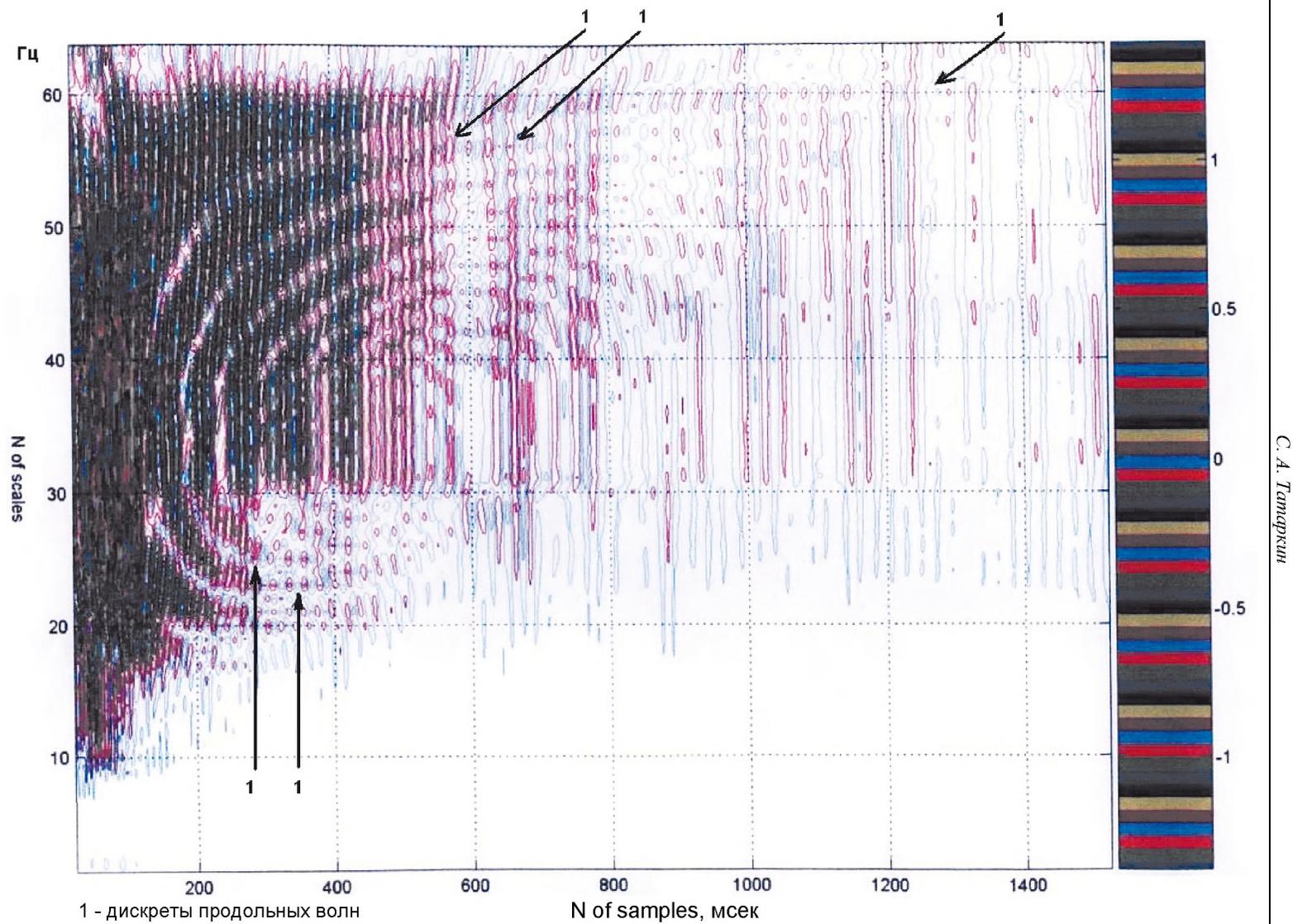


Рис. 5.3.5

Вейвлет-спектр. Изменение фазовой скорости отраженного сигнала.

4.5. Исследования прочностных характеристик подземных сооружений (коллекторы, тоннели метро и др.)

Обследование целостности обделки канализационных коллекторов и тоннелей метро можно проводить с дневной поверхности методами поверхностных волн. Схема измерений состояла в следующем. Благодаря повышенной помехоустойчивости метода удалось выделить простые волны из отражённых сигналов: продольные, поперечные и дифракционные (наименее интенсивные). Далее измерялись их параметры и интерпретировались прочностные характеристики исследуемых сооружений.

Рассмотрим процесс формирования указанных целевых волн в эхо-сигнале от коллектора, как тонкой цилиндрической оболочки. Сложные неоднородности, например, обделка канализационного коллектора, тоннеля метро и слой грунта соколеблющейся массы, создают отражённые сигналы в результате нескольких процессов. В любых конкретных условиях схемы выполнения измерений, характеризующейся определенной частотой отражённого сигнала и ракурсом прихода лучей, доминирующими оказываются один или два процесса.

а) Наиболее простым и ясным для понимания является зеркальное отражение (продольные волны). Согласно выражению, полученному Рэлеем,

сила отражателя цели $C_{ц} = 10 \lg[(1082) \frac{a^6}{\lambda^4}]$, где a – радиус сферы, λ – длина волны.

б) Другим процессом является рассеивание лучей на неровностях поверхности, у которых радиусы кривизны малы или соизмеримы с длиной волны. В случае тоннеля метро и коллектора во время их строительства таких неровностей образуется много и они вызваны возникающим дисбалансом в выемке грунта при проходке подземных выработок. В случае, когда несколько рассеивателей преобладают над всеми остальными, могут возникнуть «светлые пятна», «блики», которые можно наблюдать в огибающей сигнала. Следует заметить, что в данных условиях эксперимента свойства грунтов обладают сильной анизотропией, обусловленной проявлениями палеотектоники – разломами и их последствиями, «плывуном», что может усугубить «блики» и сделать их более ярко выраженными. Эти сигналы (поперечные и дифракционные волны) как бы создают характеристику направленности отражателя – тоннеля метро, коллектора. Изменения характеристики направленности отражённого импульса от отражателя – тоннеля метро с соко-

леблющейся массой грунта могут быть признаком изменения релаксационных свойств грунта.

в) При падении сигнала на большую сферу – тоннель метро, коллектор и распространении его в обделке в виде волн сжатия, сфера реагирует различными способами. Во-первых, возникает вторичное эхо, которое формируется несколько позже, чем зеркально отражённое от передней стенки поверхности; во-вторых – на поверхности сферы возникают изгибные колебания, и, в случае совпадения длины такой волны с длиной волны в грунте, возникает резонанс. Эти волны деформации обтекают сферу с некоторой, присущей им скоростью (для железобетона – 2,5-4 км/сек) и вносят свой вклад в отражённый сигнал. Составляющие этих волн возбуждают различные моды колебаний в обделке тоннеля и увеличивают силу цели. Их вклад в результирующую силу цели зависит от ракурса и добротности системы или постоянной демпфирования данной моды колебаний. Поскольку излучает система «обделка тоннеля – соколеблющаяся масса грунта», то слежение за изменениями частоты этих колебаний может дать информацию – признак возможного расструктурирования грунта в этом слое по трассе.

г) Экспериментально подтверждено, что существуют «ползущие» дифрагированные волны. Эти волны, возникающие на краю зоны геометрической тени, распространяются вокруг сферы и порождают излучение их во всех направлениях. Ползущие, дифрагированные волны являются причиной осцилляции обратного рассеивания с периодом, соответствующим зонам Френеля. Они возникают в случае, когда имеются участки с регулярной периодической структурой в соответствии с формулой Брэгга – Вульфа. Эта амплитудная модуляция представляет собой семейство симметричных парабол, чередующихся максимумов и минимумов спектра, периодически повторяющихся по частоте и во времени. Изменение этой дифракционной картины в спектре принятого сигнала соответствует изменению фазовой скорости, и, следовательно, изменению прочности, сплошности слоёв грунта или целостности обделки.

д) При сложении зеркально отражённых, дифрагированных волн и изгибных колебаний конструкции возникает низкая частота биения. Слежение за изменением этой частоты может быть использовано для установления дефекта.

Таким образом, в качестве признаков целостности обделки коллектора и др. можно использовать степень идентичности частот резонансов и фазовой скорости в отраженных сигналах в течение времени. Экспериментально было подтверждено наличие этих целевых волн и идентичность пара-

метров при отражении от коллектора, тоннелей метро. Возможность их использования целесообразна при мониторинге с помощью методов идентификации во времени. Примеры приведены в п.8.5 и п.8.6.

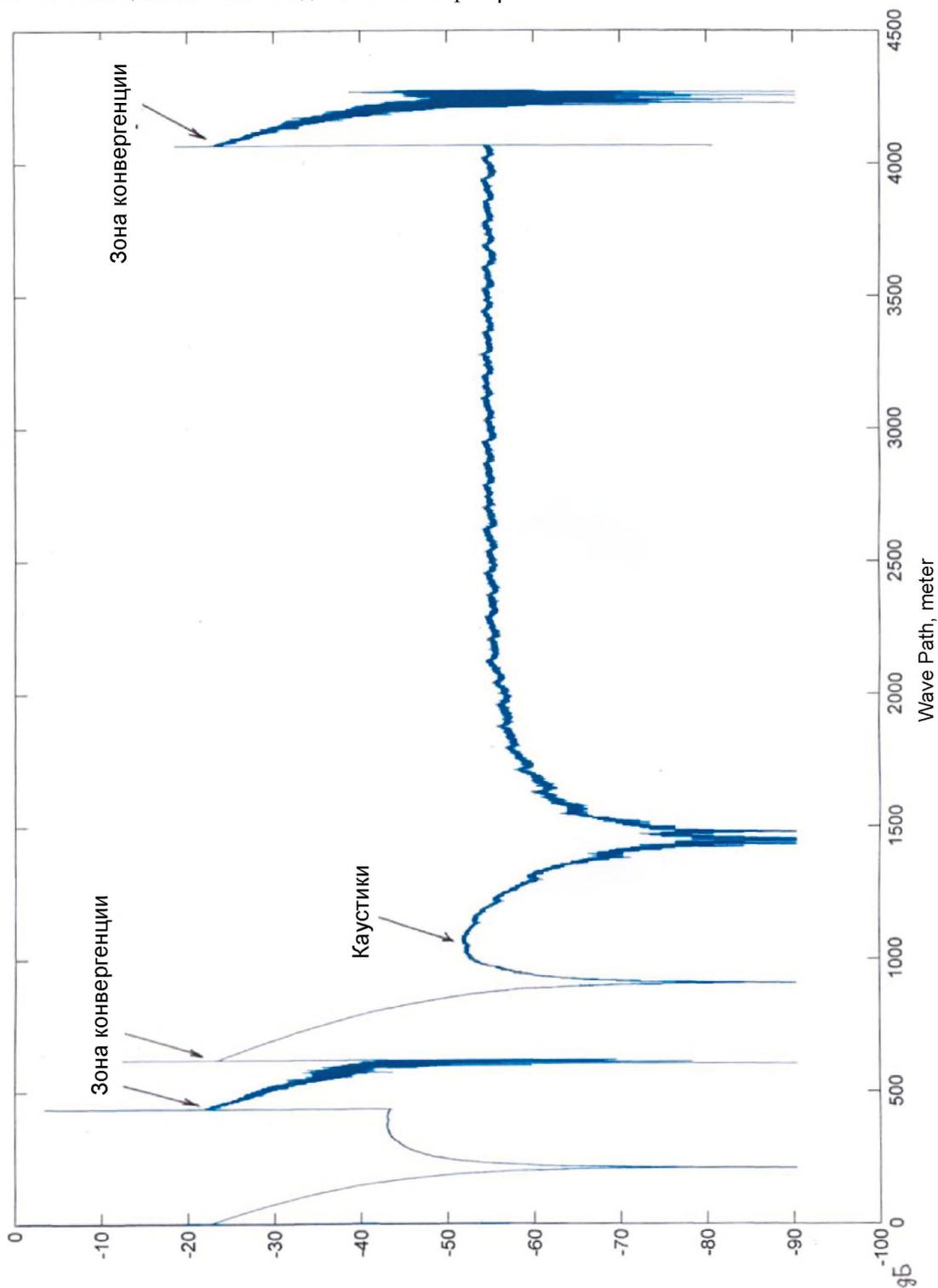


Рис. 5.4.1

Зоны конвергенции и каустики при распространении сигнала в свае (многократные отражения).

4.6. Исследование влияния вибродинамического воздействия механизмов по забивке свай, поездов метро, транспорта, механизмов проходки подземных тоннелей на грунты основания фундаментов зданий, коллекторов, трубопроводов и т.п.

Известно, что грунты (в первую очередь песчаные, водонасыщенные) будучи подвергнуты динамическому воздействию, способны резко снижать свою прочность и устойчивость вплоть до перехода в полностью разжиженное состояние. Н. Масловым разработана фильтрационная теория динамической устойчивости водонасыщенных песков. Показано, что при достаточно больших абсолютных уровнях вибрации (ускорение) песок уплотняется, причём в большей степени, чем менее он плотен. Нарушение устойчивости вполне возможно так же в условиях весьма далёких от полного разжижения песка, т.е. при частичном взвешивании зёрен песка и ослаблении сил сопротивления трения в песчаной толще. Решающим условием здесь будет величина соотношения действующих в толще касательных (сдвиговых) напряжений к сопротивлению песка сдвигу (т.е. величина запаса устойчивости характерная для данного сооружения). Оценка устойчивости определяется критическим ускорением

$$\alpha_{\text{макс}} = 4\pi^2 A f^2$$

где A – амплитуда, f – частота.

Величина $\alpha_{\text{макс}}$ различна для разных типов песков в зависимости от гранулометрического и минералогического состава, степени окатанности зёрен. Для ряда условий при пористости песка $n = 43\%$ критическое ускорение равно $0,045 \text{ м/сек}^2$.

В ТСН 50-302-2004 СПб. приведены допустимые уровни вибрации (допустимое ускорение вертикальных колебаний фундаментов) на грунты основания. Однако, они не учитывают частоту колебаний и длительность их воздействия. Опыт пока-

зывает, что деформации грунта, а, следовательно, осадки зданий и деформации сооружений происходят и при меньших значениях ускорений, поскольку неправильно выбран допустимый уровень вибраций, неучтены частоты резонансных характеристик системы грунт основания-фундамент и т.д.

В условиях волновода при сильной интерференции, при наличии каустик и зон конвергенции наблюдаются периодические по пространству значительные превышения амплитуд вибраций на низких частотах (относительно спада энергии по экспоненте), что значительно увеличивает коэффициент динамичности. Это наблюдается и при размещении приёмников даже на значительном удалении от источника, а не только на кратчайшем расстоянии от источника вибрационного возмущения. Это явление необходимо учитывать при составлении схемы измерений. Необходимо пространственное расположение приемников. Возможность начала расструктурирования грунта под основанием фундамента здания в этих документах вообще не учитывается. Для особо ответственных сооружений этот фактор можно учесть, изменив методику и схему измерений. По изменению фазовой скорости можно определить в измеряемых точках по пространству начало расструктурирования грунта. На нескольких примерах мониторинга показано влияние длительного воздействия вибраций на осадки основания сооружений. Это можно использовать в качестве дополнительного признака (кроме уровней) для приостановки работ. Пример ошибок при мониторинге приведен в п. 8.7., а влияние длительной вибрации на основание зданий в п.8.6.

4.7. Оценка размеров неоднородностей (шероховатости), определение границ слоёв и слабых зон в грунтах

Под неоднородностью (шероховатостью) отражающих границ можно подразумевать либо геометрическую неровность поверхности отдельных слоёв или прослоек грунта, либо незакономерное (анизотропное) изменение его физико-механических свойств. Геометрические неровности границ зависят от генезиса отложений, условий осадконакопления, возможного проявления тектоники и др. Изменение физико-механических

свойств грунтов может быть связано как с выше названными причинами, а так же с современными техногенными воздействиями (динамические нагрузки, суффозия, изменение химизма подземных вод, наличие биоты и др.). В первую очередь, они определяются изменением пористости и размерами частиц грунта. Указанные физико-технические характеристики связаны с сейсмоакустическими свойствами отражённых и рассеянных сигналов, а

так же со спектрами неровностей (геометрических и физических). Под ними подразумевается Фурье-анализ линии неровностей как пространственно-временной функции. Рассмотрим эти сейсмические свойства. В сейсмике амплитуда отражённого сигнала определяется амплитудой падающего, умноженной на коэффициент когерентного отражения R . Сигнал в точке приёма представляется беспорядочной комбинацией интерферирующих между собой отдельных эхо-сигналов. Степень изменения формы сигнала зависит от характера неровностей поверхности отражающих слоёв, а так же параметров измерительной системы.

Среднее значение амплитуды отражённого сигнала $\langle P \rangle = \frac{P_0 R_0}{R_1 + R_2} \langle R \rangle$, где R_1 и R_2 – рас-

стояния в направлении зеркального отражения от поверхности до излучателя и приёмника соответственно, P_0 – амплитуда излучённого сигнала на расстоянии R_0 от источника. Для рассеянного сигнала средний квадрат амплитуды $\langle p^2 \rangle = \frac{p_0^2 R_0^2 AS(Q_1 Q_2 \omega)}{R_1^2 R_2^2}$, где A – площадь озвучен-

ного участка поверхности, S – коэффициент рассеяния; Q_1, Q_2 – углы выхода и приёма лучей, ω – частота. Величина S заключена в пределах

$$S(Q_1, Q_2, \omega) \leq S \leq \frac{R_1^2 R_2^2}{A(R_1 + R_2)} R^2 \text{ и зависит от}$$

степени шероховатости и корреляционной функции неровностей рассеивающей поверхности.

Таким образом, статистически описать геометрические и физические шероховатости верхней части границ слоёв можно с помощью коэффициента когерентного отражения, коэффициента рассеяния, а так же спектра неровностей. К. Клей с помощью расчётов, подтверждённых экспериментом, описал когерентную составляющую поля рассеяния уравнением $\langle p \rangle / p_0 = \exp(-2K^2 \sigma^2 \cos^2 \theta)$, где σ – среднеквадратичное возвышение поверхности. Расчётная зависимость среднего поля от параметра $K = \sigma \cos \theta$ разбита на три области: значения 0 - 0,5 – ровная или слабая шероховатость, 0,5 – 1,0 – умеренно шероховатая, 1 - 1,5 – сильная шероховатость. По аналогии с этой ситуацией при сеймопрофилировании наблюдается запаздывание сигналов. По уширению импульсов, а так же вейвлет-спект $\sigma > 0,6$ эта величина предельная для гладкой поверхности.

По теории рассеяния, основанной на принципе Гюйгенса, амплитуда сигнала

$$x_f^2 = a^2 / \pi,$$

где a – радиус первой зоны Френеля, как характеристики процесса рассеяния, $a = \sqrt{\lambda} h / 2$, где h – расстояние до отражающей поверхности. При рассеивании сигнала от неровной поверхности фазы элементарных волн флюктуируют даже в пределах одной зоны Френеля.

Если имеется n элементарных сигналов, фазы которых совпадают, то суммарная амплитуда p пропорциональна n , а $\langle p^2 \rangle$ пропорционально n^2 . Если же фазовые задержки совершенно случайны, то складываются квадраты амплитуд сигналов и $\langle p^2 \rangle$ пропорционально n . Таким образом, если длина путей, отражённых этими поверхностями, отличаются друг от друга на $\lambda/2$, это означает, что они складываются либо в фазе, либо в противофазе. При сложении в фазе возникает максимум спектральной плотности и наоборот. Наложение зон Френеля на неровности поверхности образует структуру, которая определяет фазу рассеянного сигнала. В спектре это проявляется в виде концентрических кругов (линии прерывистые, либо непрерывные), отрезков гипербол (типа «банан») или точками максимумов и минимумов. Если пространственные неровности имеют тот же порядок, что и диаметр первой зоны Френеля, то в спектре сигнала видны спектральные плотности в виде отрезков гипербол (типа «банан»), если значительно меньше зоны, то видны чередующиеся точки максимумов, если размеры близки к зоне, то в спектре наблюдаются концентрические окружности (см. рис 5.7.1а).

Кроме вышеуказанных коэффициентов, для определения границ слоёв используются спектральные характеристики отражающей поверхности. В этом случае используется резонансный метод. При двойном прохождении сигнала через слой

τ при соотношении $\frac{f}{2} = 0,5$, в спектре появляется

резонанс (максимум) на частоте f , число резонансов соответствует числу слоёв. Амплитуда резонансов обусловлена плотностью слоя и характеризует количество литологических слоёв, их изменение по пространству и плотность, либо пористость. При мониторинге подземных сооружений изменение этих характеристик во времени может дать информацию о дефектах и их развитии.

Приведём примеры отображения этих характеристик на рис 5.7.1.6. Другой характеристикой границ слоёв является фазочастотная. При отражении от границ литологических слоёв с различными коэффициентами отражения происходит скачок фазы сигнала или потеря полуволны. Это связано с наличием зон Брюиллсена на границе слоёв. Если отражающая граница неоднородна, то в пределах зо-

ны Френеля разные по частоте волны могут отражаться в разные стороны. Зона Френеля с приближением по трассе к резко выраженной неоднородности и проходе через неё изменяется. В точках далёких от неоднородности отношение площади зоны Френеля для низко и высокочастотных составляющих сигнала близко к константе. По мере приближения к границе низкочастотная зона выходит за его пределы раньше, чем высокочастотная, вследствие чего низкочастотная компонента отражённого сигнала ослабевает, что приводит к изменению спектра и формы сигнала. Когда точка наблюдения располагается над отражающей границей неоднородности, каждая из зон Френеля (высокочастотная и низкочастотная) имеет площадь, равную половине площади, которую она имела бы на большом удалении от этой границы. В этом слу-

чае энергия сигнала в два раза меньше константы. Если наблюдать из точки за краем неоднородности, то площадь высокочастотной зоны Френеля становится непропорционально меньше, чем низкочастотной, т.е. вновь изменяется форма сигнала.

Таким образом, по изменению спектра сигнала и фазовой скорости можно определить неоднородность (естественного или техногенного происхождения). На рис. 5.7.2, 5.7.3. видно резкое изменение фазовой скорости при перемещении точек замеров по сейсмотрассе, расположенной над коллектором.

На рис 5.7.4 представлены вейвлет-спектры отраженных от неоднородностей сигналов. Интерференционная картины, их типы зависят от геометрической неровности границ и размеров отражателей.

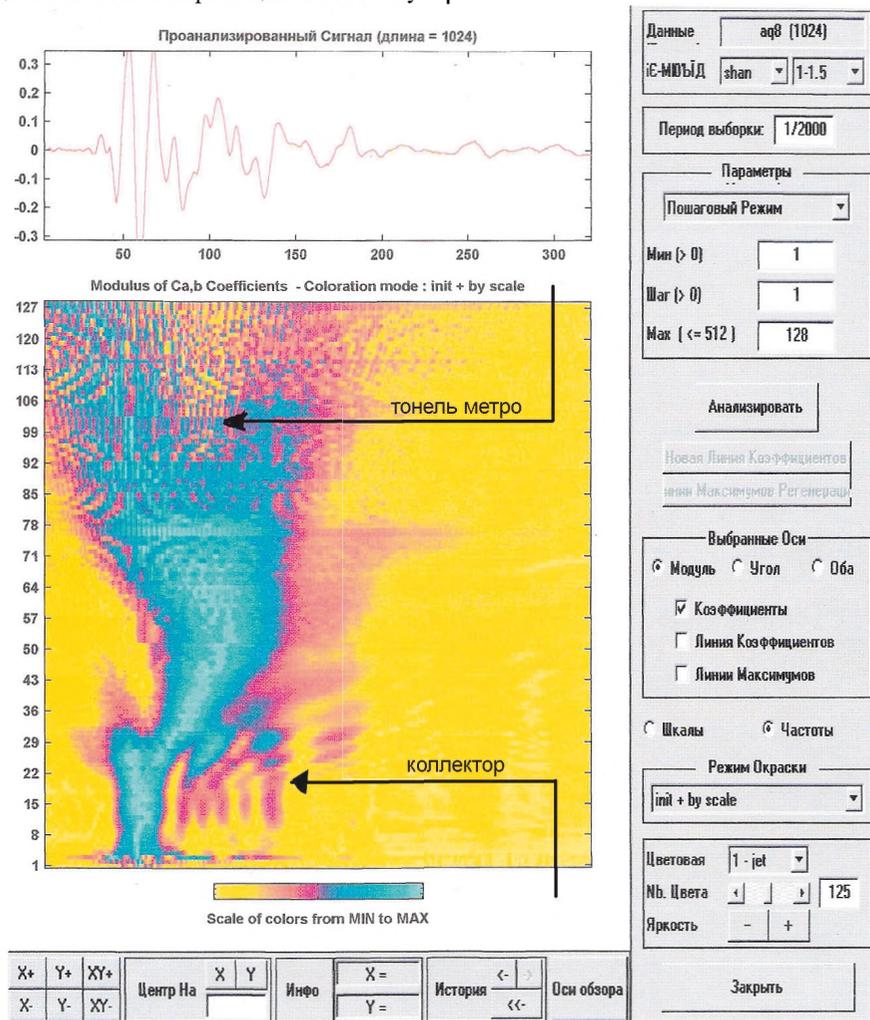


Рис. 5.7.1а. Вейвлет-спектр отраженных сигналов тоннеля метро и коллектора. Тип интерференционной картины соответствует размерам геометрических неровностей отражателей.

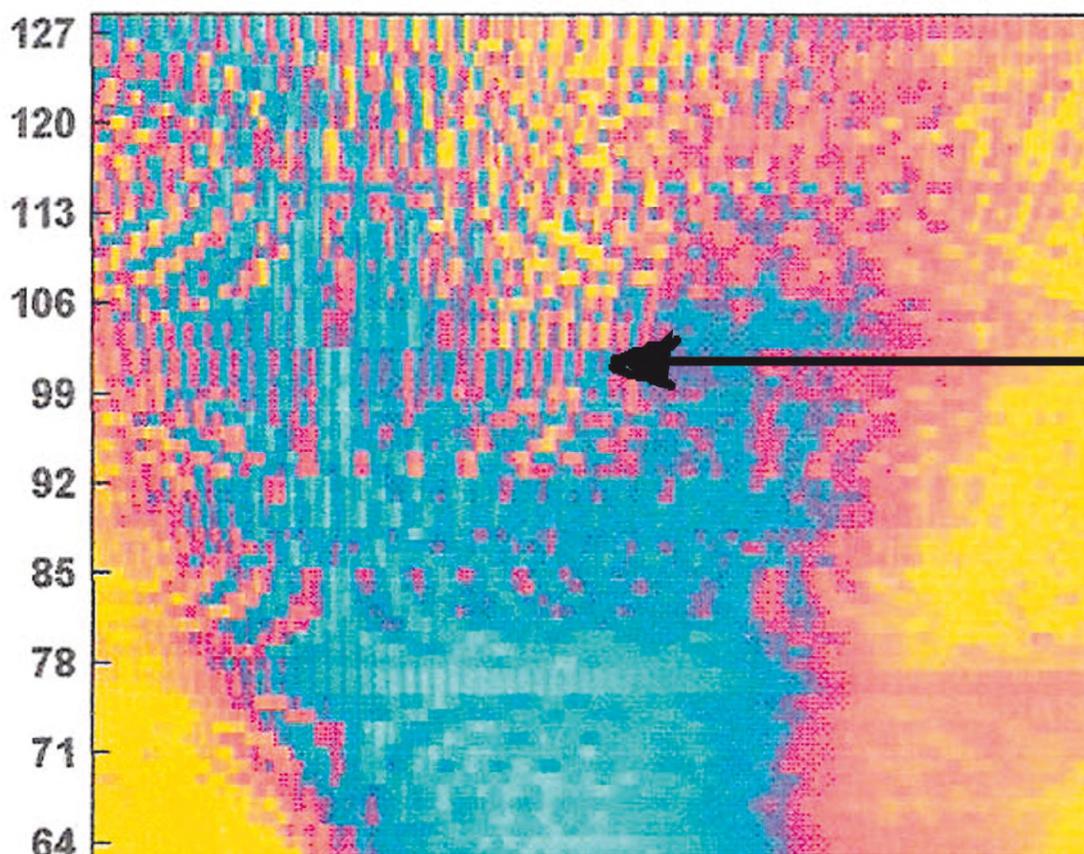


Рис. 5.7.16. Вейвлет-спектр отраженного сигнала от тоннеля метро (диаметр тоннеля 7,5 метров). Видна интерференционная картина.

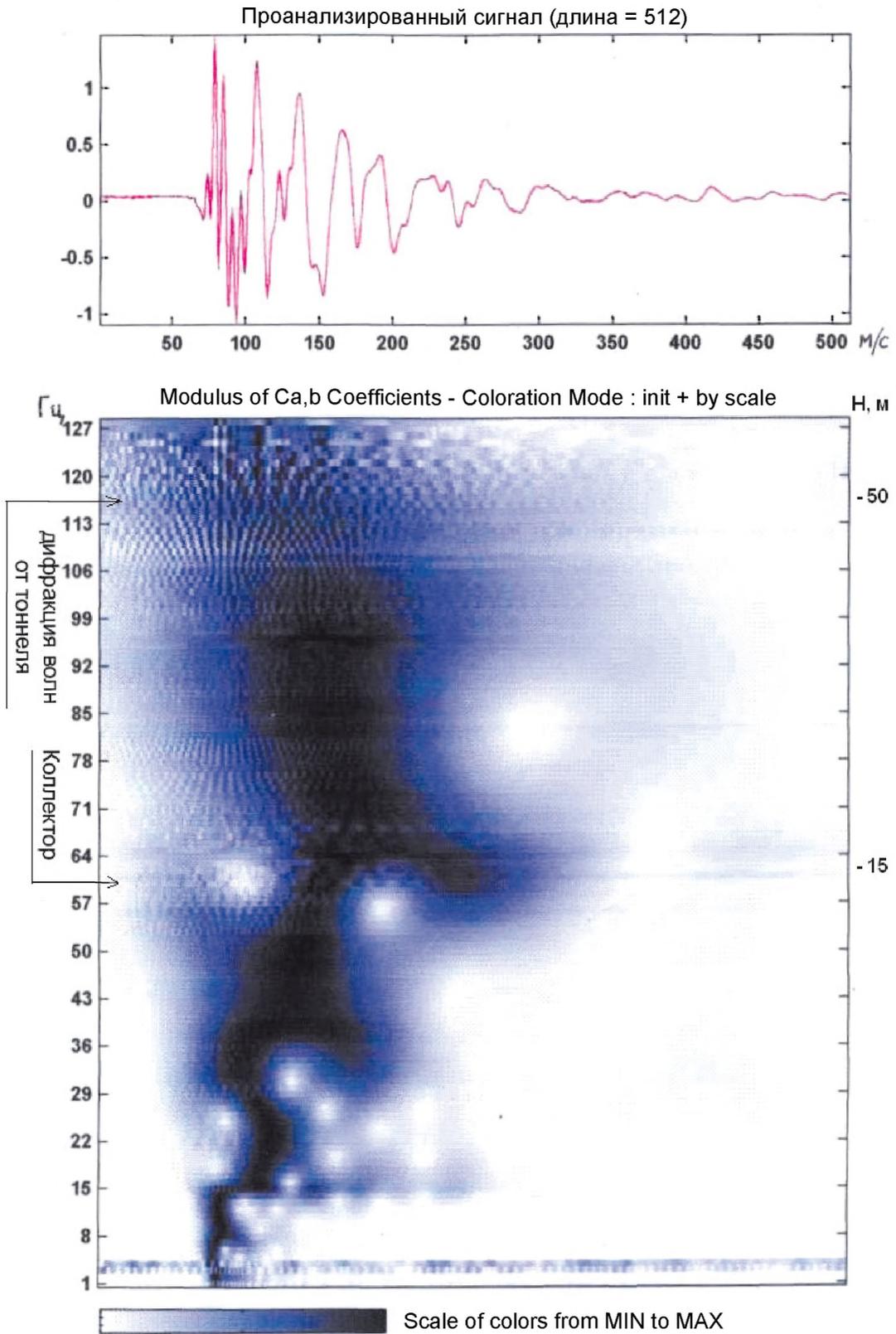


Рис. 5.7.2
Вейвлет-спектр отраженного сигнала. Сейсмотрасса пересекает коллектор.

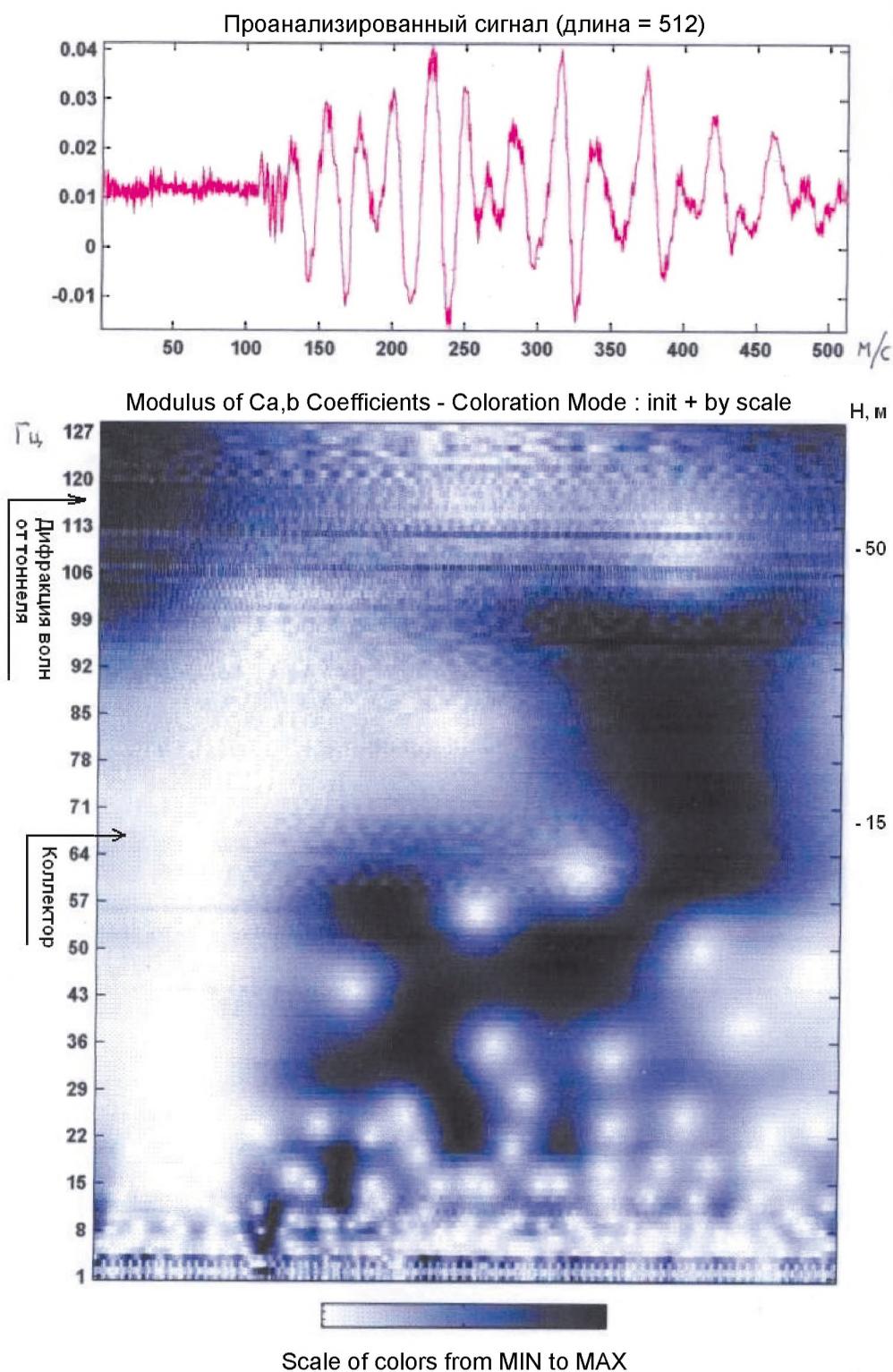
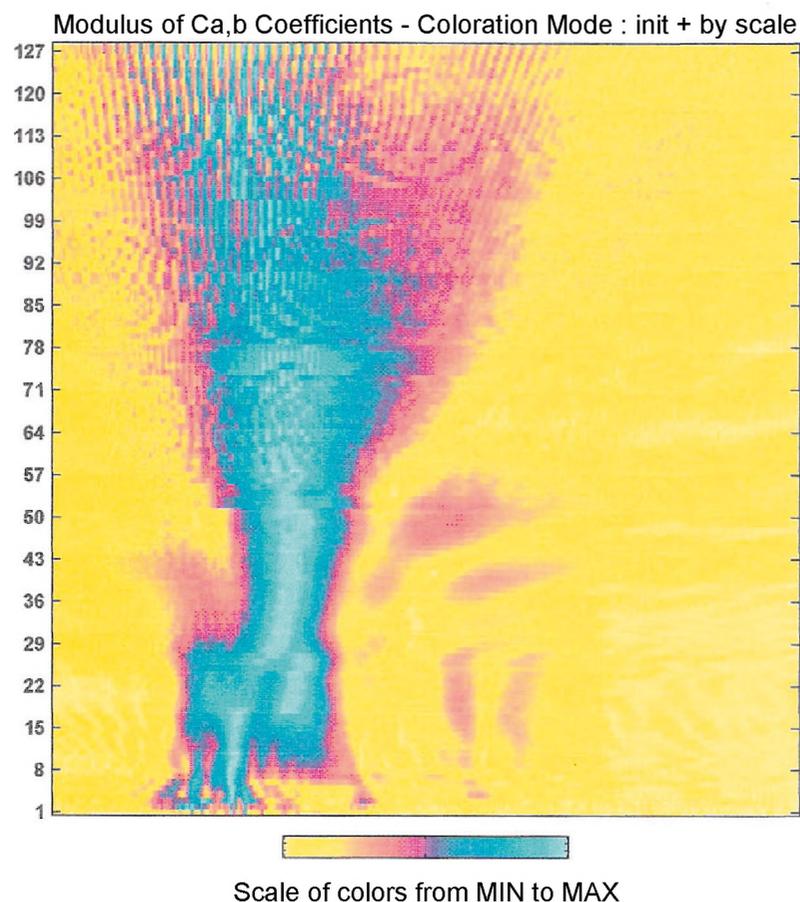
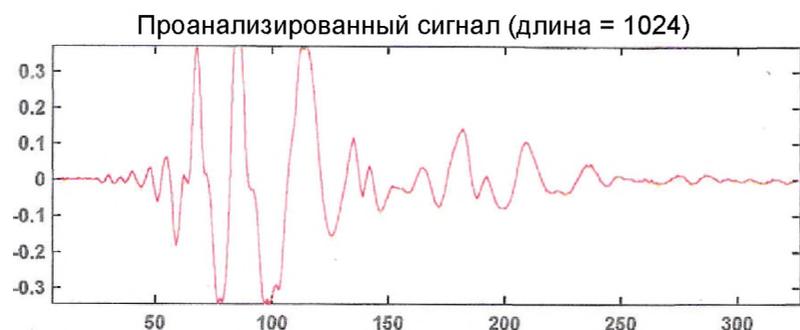


Рис. 5.7.3
Вейвлет-спектр отраженного сигнала от коллектора.
Видно резкое изменение фазовой скорости
(приемник над коллектором).



Данные: aq7 (1024)

iС-МОУД: shap 1-1.5

Период выборки: 1/2000

Параметры

Пошаговый Режим

Мин (> 0): 1

Шаг (> 0): 1

Max (<= 512): 128

Анализировать

Новая Линия Коэффициентов

или Максимумов Регенерации

Выбранные Оси

Модуль Угол Оба

Коэффициенты

Линия Коэффициентов

Линии Максимумов

Шкалы Частоты

Режим Окраски

init + by scale

Цветовая: 1 - jet

Nb. Цвета: 125

Яркость: - +

Заккрыть

X+	Y+	XU+	Центр На	X	Y	Инфо	X =	История	<	>	Оси обзора
X-	Y-	XU-					Y =		<<	>>	

Рис. 5.7.4. Вейвлет-спектрограмма импульсов вибрации при детальном обследовании грунта (ул.Карбышева, трасса 1, вейвлет - «shap», выборка 0.16 с)

4.8. Оценка глубины обнаружения (для глубин до 30-50 м) и классификации неоднородностей естественного и техногенного происхождения

В случае сейсмопрофилирования и использования спектральных характеристик для обнаружения и классификации неоднородностей в грунте можно воспользоваться уравнением геолокации. При появлении эхо-сигнала от цели (т.е. неоднородности, литологического слоя с резко отличающимися акустическими характеристиками, акустической жёсткостью) на индикаторе должна появиться определённая отметка. В отличие от случайных помех эта отметка должна иметь регулярный характер. Когда отношение сигнал-помеха на входе выше порога обнаружения, соответствующего установленному вероятностному критерию, наблюдателем принимается решение о наличии цели. Если это отношение меньше порога, то принимается решение об отсутствии цели. Данное условие может быть описано уравнением

$UI-2PR+SC-(UP-PN) = PO$, где УИ – уровень излучения, УП – уровень собственных помех, ПН – направленность приёма, ПР – потери при распространении,

СЦ – сила цели, ПО – порог обнаружения.

Эхо-сигнал возвращается к приёмнику при отражении от крупномасштабных неоднородностей (границ литологических слоёв) в виде реверберации, от пространства, ограниченного зоной Френеля. При отражении от глубинных коллекторов и тоннелей отражённую энергию можно рассматривать как эхо-сигнал. Сила цели

$$SC = 10 \lg \frac{I_r}{I_i},$$

где I_r – интенсивность возвращающегося звука, I_i – интенсивность падающей волны.

Для целей в форме малых сфер (отношение длины окружности сферы к длине волны составляет 5-10) Рэлеем было определено СЦ =

$$10 \lg \left[(1082) \frac{a^6}{\lambda^4} \right],$$

a – радиус сферы, λ – длина

волны. Расчёты показывают, что для цилиндров радиусом 2 метра и 8-15 метров (с учетом 2х тоннелей) для канализационного коллектора и метро, частот 20-200 Гц, скорости сигнала 200-1000 м/с, сила цели более 20-30 дБ. Максимальное затухание энергии по данным РАН - $0,1 \text{ м}^{-1}$, т.е. на 100м – 10 дБ. Выигрыш в помехоустойчивости в полосе анализа 0,5 Гц при применении цифровой фильтрации и вейвлет-анализа составляет 10-15 дБ. Одновременно с этим превышение сигнала фокусировки или зоны конвергенции по сравнению с экспоненциальным спадом может составлять 10-15 и более дБ. Для увеличения помехоустойчивости при обработке исключается прямой сигнал. В результате такой обработки обнаружение эхо-сигнала цели на глубинах 50-60 м возможно при превышении сигнала над помехой на 4-6 дБ при малой интенсивности ударного воздействия. По превышению сигнала над помехой и декременту затухания в разных частотных поддиапазонах можно классифицировать тип техногенной неоднородности. Это показано в разделе 8.

4.9. Исследование характеристик анизотропии грунта

Как правило, неоднородности грунта связаны с анизотропией его свойств.

Обычно материал, среда характеризуются 21 константой упругости. В осадочных грунтах главная ось симметрии перпендикулярна плоскости напластования. Динамические свойства можно определить, если измерить упругие коэффициенты. В общем виде соотношение деформаций и напряжений определяется выражением $\tau_i = c_{ij} \epsilon_{ij}$, $i, j = 1 \dots 6$. i, j – оси. Коэффициенты c связаны со скоростями продольных и поперечных волн. Эти параметры определяются в лабораторных условиях (установка А. Подио). Однако, анизотропию неоднородностей

можно измерить в условиях волновода путём выделения дифракционных волн (Брэгговское отражение) и построением диаграммы направленности излучателей (отражающих слоев). На рис. 5.9,а,б,в представлены угловые вейвлет-спектры отражённых сигналов от канализационного коллектора по трассе на расстояниях 5, 10, 15 м. При этом углы прихода лучей находились в пределах 0-30 градусов соответственно. Как видно максимумы амплитуд на частотах 80 Гц, 60 Гц и 40 Гц соответствуют этим углам прихода лучей. Указанные максимумы характеризуют упругие свойства неоднородности (коллектор и соколеблющаяся масса прилегающего

грунта). Смещение собственных частот в более высокую частотную область характеризует анизотропию системы коллектор-грунт. Использование угловых спектров позволяет определить коэффициент анизотропии системы и его изменения при раз-

личных техногенных процессах в грунте. Следует заметить, что для геологии города характерна квазианизотропия, обусловленная многочисленной слоистостью отложений, что также можно измерить с помощью определения характеристик направленности отражающих слоев.

5. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, КРИТЕРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЛН, ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИЗНАКОВ В СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ И ИХ ИЗМЕНЕНИЙ. ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА

Основным методом интерпретации является сейсмическая стратиграфия. Это геологическое толкование (физическое объяснение) условий осадконакоплений по сейсмическим данным. В основе предварительной интерпретации сейсмических характеристик лежит правильное определение типов волн, выделенных на сейсмограмме традиционно. В первую очередь, выделяют продольные, поперечные, объёмные и поверхностные волны. Это осуществляется по годографам, которые хорошо описаны в лучевой сейсмоакустике.

В приповерхностных слоях при многократном отражении указанные волны и в том числе волны Рэлея, Лява трудно разделить, поскольку там существуют сильные интерференционные волны. Обработка экспериментальных данных с применением вейвлет-анализа позволила разделить их на три типа: волны без дисперсии (по-видимому, продольные в сумме с волнами Рэлея), с нормальной дисперсией (поперечные вместе с волнами Лява) и конические (дифракционные) с амплитудной модуляцией и аномальной дисперсией. Ввиду малого количества сейсмических исследований приповерхностных слоёв грунтов в условиях городской застройки, для интерпретации полученных результатов целесообразно использовать кинематические, динамические и спектрально-динамические методы. При использовании вейвлет-спектров на первом этапе интерпретации признаками для разделения волн могут быть: для продольных волн - отсутствие частотной модуляции (ЧМ) сигнала (вертикальные полосы в поддиапазонах частот); для поперечных волн - частотная модуляция сигнала (косые наклонные линии, т.е. сжатие сигнала); для дифракционных волн - сложная частотная модуляция (сжатие и растяжение сигнала). На втором эта-

пе определяются количественные оценки признаков.

Третий этап - принятие решений по совокупности признаков.

При интерпретации спектральных характеристик сигналов методом вейвлет-анализа сопоставлялись теоретические и экспериментальные спектры. Теоретические спектры описаны Гоноровским В. Он показал, что математической моделью такого сигнала может быть тригонометрическая сумма

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(\Omega_i t + \Phi_i).$$

Спектральное разложение Фурье имеет вид:

$$U_{AM}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{i=1}^N \frac{U_m M_i}{2} \cdot \cos[(\omega_0 + \Omega_i) \cdot t + \varphi_0 + \Phi_i] + \sum_{i=1}^N \frac{U_m M_i}{2} \cdot \cos[(\omega_0 - \Omega_i) \cdot t + \varphi_0 - \Phi_i]$$

В случае однотонального ЧМ-сигнала мгновенная частота $\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos(\Omega t + \Phi_0)$, где $\Delta\omega$ - девиация частоты сигнала. Полная фаза такого сигнала

$\Psi(t) = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin(\Omega t + \Phi_0) + \varphi_0$, где φ_0 - некоторый постоянный фазовый угол.

Отсюда видно, что величина $m = \Delta\omega / \Omega$, называемая индексом однотональной угловой модуляции, представляет собой девиацию фазы такого сигнала, выраженную в радианах. Спектральный состав сигнала с угловой модуляцией

$$u(t) = U_m(1-m^2/4)\cos \omega_0 t + U_m(1-m^2/8) x [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + U_m(m^2/8) x [\cos(\omega_0 + 2\Omega)t + \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] + U_m(m^3/48) x [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t].$$

При этом сигналы были представлены сериями излучаемых импульсов треугольной либо синусоидальной формы, что соответствовало реальным исследованиям в приповерхностных слоях грунта. Сопоставление этих спектров с измеренными показало полное их совпадение, а именно наличие амплитудной и частотной модуляции, разделение импульсов, их расширение, разрывы спектров при длине волны $\lambda/2$, скачок фазы и т.д. Разделение фазовой и групповой скорости можно объяснить следующим. В этом случае взаимно корреляционная функция процесса имеет следующий вид:

$$P_{xy}(\tau) \approx \left[\frac{\sin \pi B(\tau - \tau_2)}{\pi B(\tau - \tau_2)} \right] \cos 2\pi f_0(\tau - \tau_1).$$

Первый множитель – огибающая модуляции сигнала, второй – частотно модулированная несущая, B – ширина спектра, f_0 – центральная частота спектра, d – коэффициент пропорциональности, τ , τ_1 , τ_2 – задержки. Максимальное значение огибающей приходится на запаздывание. $\tau_2 = \frac{d}{C_{гп}}$, $C_{гп} = \sqrt{f_0}$ – групповая скорость. Пики косинусоиды 2-го члена соответствуют запаздываниям – τ .

$T_n = \tau_1 \pm n/f_0$, n – произвольное число. Это выражение приводится без учёта тренда на расширение фронта волны и частотно зависимо затухания. При наличии линейно-частотно-модулированного сигнала в условиях дисперсии характеристика сигнала имеет вид

$$S(\omega) = \frac{A_0 T_s}{2\sqrt{m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{[C(u_1) + C(u_2)] + [S(u_1) + S(u_2)]^2},$$

где C – интеграл Френеля,

ω – частота девиации, u_1 и u_2 – пределы интегрирования (зависят от частоты девиации), m – $2fdT_s$ – длительность импульса, A_0 – амплитуда, f_d – частота девиации, T_s – период. Как видно из приведенной формулы C – характеризует осцилляции огибающей спектра (т.е. выделение пиков амплитуд продольных и поперечных волн), что может быть использовано в качестве выше приведенных признаков. m – определяет форму спектра. Сопоставление этих теоретических зависимостей с реальными сигналами вейвлет-спектра показали их сходимость.

Множественное представление информации как способ повышения надежности результатов измерений.

Обычно при интерпретации результатов сталкиваются с большим числом переменных: время вступления сигнала, амплитуда, частота, фаза и т.д., связанных с геологическими данными. Между ними безусловно имеется корреляционная связь.

Однако их трудно изобразить в наглядной графической форме в двух измерениях. Выходом из этого положения является множественное представление одних и тех же сеймотрасс при различных параметрах и разных видов обработки сигнала (Фурье, Гильберта и др.) в трехмерном представлении цветом, а также с использованием кинематических и спектрально-динамических методов. Представление вейвлет-спектров более информативно, поскольку одновременно изображается амплитудно-частотная, пространственная характеристика грунта. Кроме того, совместное представление геологических и геофизических данных позволит интерпретатору выявить дополнительные корреляционные связи и повысить надежность получаемых результатов измерений. Пример использования этих видов информации рассмотрен в п. 8.3.

Сейсмические признаки свойств грунтов и их геологическая интерпретация.

К сейсмическим признакам относятся: а) непрерывность отражений сигналов в слое грунта – непрерывность слоёв, процессы осадконакопления; в) амплитуда отражений сигналов, соотношение скорости и плотности (акустическая жёсткость) – расположение слоёв относительно друг друга; г) частота отражённой волны – мощность слоёв; д) интервальная скорость в слое – коэффициент пористости; е) конфигурация отражений – характер напластования, процессы осадконакопления, эрозия, палеорельеф; ж) скачок фазы, потеря полуволны – граница литологических слоёв; з) величина декремента затухания контура – коэффициент сцепления; и) уменьшение амплитуд, хаотическое расположение отражений или их отсутствие – разрыв слоёв, перемятые (ислоцированные) слои, резкое снижение упругих свойств, коэффициента пористости; к) вариации мгновенной амплитуды спектральной плотности в результате интерференции, возникновение зон фокусировки и конвергенции – изменение мощности подстилающих слоёв и их физических характеристик; л) изменение фазовой скорости, спектральных характеристик – наличие техногенной или естественной неоднородности; л) мгновенная фаза (по Гильберту или вейвлет-анализу) – выявление выклиниваний, угловых несогласий; м) угловые вейвлет-спектры и их изменение, коэффициент анизотропии и его изменения.

Результаты исследований физических явлений при распространении сигналов в приповерхностных слоях грунта и их геологическая интерпретация.

Экспериментальные исследования методом поверхностных волн с применением вейвлет-анализа при обработке показали следующее:

1. Принимаемый сейсмоакустический сигнал является сложным нестационарным процессом. Распространение его в грунте соответствует суперпозиции (сложению) волноводов. Встречаются волноводы двух типов: поверхностный и с минимумом оси скорости на глубине. Волноводам свойственны следующие особенности: дисперсия скорости (частотнозависимая фазовая и групповая скорости), дифракционные (конические волны) и связанные с ними зоны большого усиления сигнала (зоны каустики и конвергенции) по трассе с превышением амплитуд на 20 дБ, т.е. в 10 раз (относительно экспоненциального спада). На некоторых определенных расстояниях r интенсивность уменьшается по цилиндрическому закону, т.е. $1/r$ или даже $1/\sqrt{r}$.

2. В этих условиях принимаемый сигнал представляет собой серии многократно отраженных импульсов от литологических слоев грунта. Наибольшие амплитуды отражений импульсов от

опорных слоёв-морена, протерозой, некоторые тугопластичные супеси. Параметры импульсов амплитудно и частотномодулированы. Форма спектра сигналов треугольная, гауссова или $\sin x/x$. Максимум спектра соответствует амплитуде резонансной частоты, минимум - отражению от литологических слоев.

3. Геологическая интерпретация сейсмических данных на основе сейсмической стратиграфии приведены в таблицах в зависимости от объекта исследований.

1. Сейсмические свойства грунтов, их геологическая интерпретация и качественная оценка физико-механических характеристик.

Приповерхностные слои грунта на строительных площадках и под зданиями.

Таблица 1.

Наименование сейсмических признаков в вейвлет-спектрах интерференционных волн.	Геологическая информативность.	Качественная оценка физико-механических характеристик.
1. Продольные и Рэлеевские волны, конфигурация отражений.	Характер напластований. Процессы осадконакопления. Эрозия, палеорельеф, гляциотектоника. Водонасыщенность грунта, биота, загрязнение нефтепродуктами и др. Суффозия.	Изменение характеристик моренных грунтов, отложений протерозоя, плотных прослоек.*
а) Амплитуда отражений	Расположение пластов относительно друг друга.	Относительные значения модуля деформации, сжимаемости, коэффициента пористости.
б) Резонансная частота отражённой волны.	Мощность пластов, уточнение границ ИГЭ.	Уточнение статистических значений физических характеристик по ИГЭ.
в) Декремент затухания, добротность контуров.	Вещественный состав слоёв.	Соотношение упругопластических свойств.
г) Фазочастотная характеристика (скачок фазы).	Границы слоёв, разделение на ИГЭ.	Общая оценка характеристик по глубине и протяжённости. Уточнение статистических характеристик по слоям.
д) Непрерывность отражений (осей синфазности).	Непрерывность пластов. Процессы осадконакопления.	Неизменность характеристик по трассе.
е) Прерывистость отражений, изменение амплитуд, уменьшение декремента затухания.	Разрывы слоёв, палеорельеф, перерыв осадконакопления.	«Слабые» места в грунте, изменение на 20-30% коэффициента пористости.
2. Дифракционные волны и волны Лява.		
а) Фазовая скорость в контурах (линейная, либо нелинейная зависимость от частоты).	Неоднородности в литологических слоях, релаксационные свойства, микротрещиноватость.	Определение деформации грунта с выделением упругой доли для определения структурной прочности грунта.
б) Линейная фазовая скорость.	Неоднородностей нет.	Неизменность характеристик по трассе.
в) Нелинейная фазовая скорость, минимумы сигнала.	Неоднородности в слоях размером 2-5 м.	Изменение параметров сопротивления грунта сдвигу на 20-30%.
г) Наличие дифракционных картин (фазовый портрет, чередование типов).	Гляциотектоника, тектоника, «останцы», дислоцированный протерозой, перемятый грунт.	Резкое ухудшение характеристик. Местное изменение параметров сопротивления грунта сдвигу на 30-40% и более.
д) Наличие зон фокусировки лучей на резонансных частотах (каустики, зоны конвергенции).	Преобладание плотных слоёв.	Возрастание доли упругих свойств, рост модуля деформации, динамического модуля при вибродействии до 10 раз.
е) Зависимость вейвлет-спектра от угла прихода отражённых лучей.	Квазианизотропия, большая слоистость.	Изменение параметров сопротивления грунта сдвигу.

* Значения признаков измеряются в % относительно опорных слоёв (морена и т.д.).

Примечания:

а) продольные, Рэлеевские и дифракционные и волны Лява разделяются по признаку наличия или отсутствия фазовой скорости.

б) диапазон частот 1-200 Гц.

Мониторинг изменения физико-механических свойств грунтов оснований зданий и сооружений при различных техногенных воздействиях: подработка грунта при проходке тоннелей метро, коллекторов, забивка свай.

Таблица 2.

Наименование признаков	Деформация	Опасность ситуации
Абсолютные значения виброускорений м/сек. ² на дискретных составляющих спектра. Тип фазовой скорости.	—	—
Уровни в пределах норм ТСН-490-87. Фазовая скорость в диапазоне частот 1-150 ÷ 220 Гц линейна.	Нет	Нет
Увеличение и последующее уменьшение уровней амплитуд дискрет в 1,5 раза. Фазовая скорость не линейна.	Начало расструктурирования грунта (накопление деформаций, «усталость грунта»). Изменение условий фильтрации.	Возможность осадок.
Фазовая скорость на частотах 1-100 Гц изменилась скачком. Нелинейная кривая усталости.	Расструктурирование грунта. Разрушения структурных связей.	Осадки, трещины в конструкциях.

II. Дефекты в надземных и подземных сооружениях (коллекторах, тоннелях метро, фундаментах, сваях).

Таблица 3.

Наименование признаков	Дефекты в конструкциях	Тип дефекта
	Подземные сооружения.	
1. Наличие резонансных частот кольцевых колебаний (близко расположенные дискреты). Диапазон частот 1-200 Гц.	Нет	—
2. Фазовая скорость изгибных колебаний линейна по частоте.	Нет	—
3. Резкое изменение амплитуд, частот кольцевых колебаний.	Дефект	Трещины в кольцах в пределах двух смежных колец.
4. Изменение ширины резонансного максимума.	Дефект	Деформация стыка колец, скрытая трещина в стыке колец.
5. Изменение изгибных колебаний, фазовой скорости.	Дефект	Трещина в тубинге. Уменьшение модуля сдвига.
	Фундаменты, надземные конструкции (стыки в узлах сопряжения, ригель-колонна и др.)	
1. Фазовая скорость в диапазоне частот 10-22Гц линейная	Нет	
2. Фазовая скорость не линейна, хаотические отражения, отсутствие интерференции.	Дефект	Трещины, пустоты. Уменьшение модуля сдвига

Примечание: Точность определения местонахождения трещины зависит от расстояния между точкой возбуждения и приёмником.

Определение сплошности тела свай, типа дефекта, обеспечение долговечности.

Таблица 4.

Наименование сейсмических признаков	Дефекты в конструкции	Тип дефекта, Обеспечение долговечности
Продольные волны. Амплитуда.	Дефект.	Тип не установлен
Дифракционные волны. Фазовая скорость. Диапазон частот 10Гц-22КГц.	Есть/нет.	—
а) линейная зависимость фазовой скорости от частоты.	Дефектов нет.	Долговечность обеспечена.
б) нелинейная фазовая скорость. Большие декременты затухания в колебательных контурах. Диапазоны частот: 10 - 1500 Гц 1500 – 15000 Гц 15 КГц – 22 КГц	Дефект.	Шейка, «язык». Долговечность не обеспечена. Нарушен стык арматуры при забивке составных свай. Трещина в защитном слое. Долговечность не обеспечена.

Примечание: Трещины в защитном слое «шейки» свидетельствуют о возможной коррозии арматуры и, как следствие, необеспеченность долговечности свай.

6. АППАРАТУРА, МЕТРОЛОГИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Аналоговая аппаратура: сейсмодатчики (пьезоэлектрические) КД-12, диапазон частот 1Гц - 1,5 КГц, КД-39, диапазон частот 100Гц-22 КГц, чувствительность 300мв/м/сек², 10мв/м/сек², усилитель «Брюель и Кьер» (Дания); цифровая обработка-АЦП – динамический диапазон 90 дБ, число каналов – 2, 4, 8, ПК ЭВМ, регистратор – цветной принтер. Приборы аттестованы Госстандартом РФ.

Суммарная метрологическая ошибка определяется систематическими ошибками аппаратуры, системы обработки, схемы измерений и методической ошибкой физической природы метода. Погрешность измерения амплитуды - 1 дБ, частоты сигнала – 0,5 Гц в диапазоне 1-100 Гц.

Методическая ошибка.

Разрешающая способность метода.

Возможность разрешения пластов по вертикали определяется частотным спектром импульса, распространяющегося через толщу грунта. Отражения от кровли и подошвы пласта можно различить, пока его мощность не станет меньше 1/8 длины волны головной гармоники. Разрешение по горизонтали зависит от размеров радиуса зоны Френеля (r).

$$r = \frac{V}{4} \sqrt{\frac{t}{f}},$$

где V – скорость, t – двойное время прохода сигнала через пласт, f – частота. Для глубин 50 м, частоты 50 Гц и 250 Гц эта величина колеблется от 15 до 1,5 м. На меньших глубинах радиус зоны Френеля меньше. Применение предварительной цифровой фильтрации на базе вейвлет преобразований позволило выделить более высокочастотные компоненты и тем самым улучшить пространственное разрешение неоднородностей. На рис.8.2.3. приведен пример выигрыша в помехоустойчивости сигнала.

Моделирование сигналов и процесса обработки информации.

В целях проверки алгоритмов и программ было произведено моделирование синтезированного сигнала и его обработка вейвлет-анализом. На рис. 7.1. приведены синтезированные сигналы с девиацией частоты и результаты обработки. Анализ их показал, что они соответствуют теоретическим спектрам. Однако, в них обнаружен эффект конечности реализации, который необходимо учитывать при интерпретации.

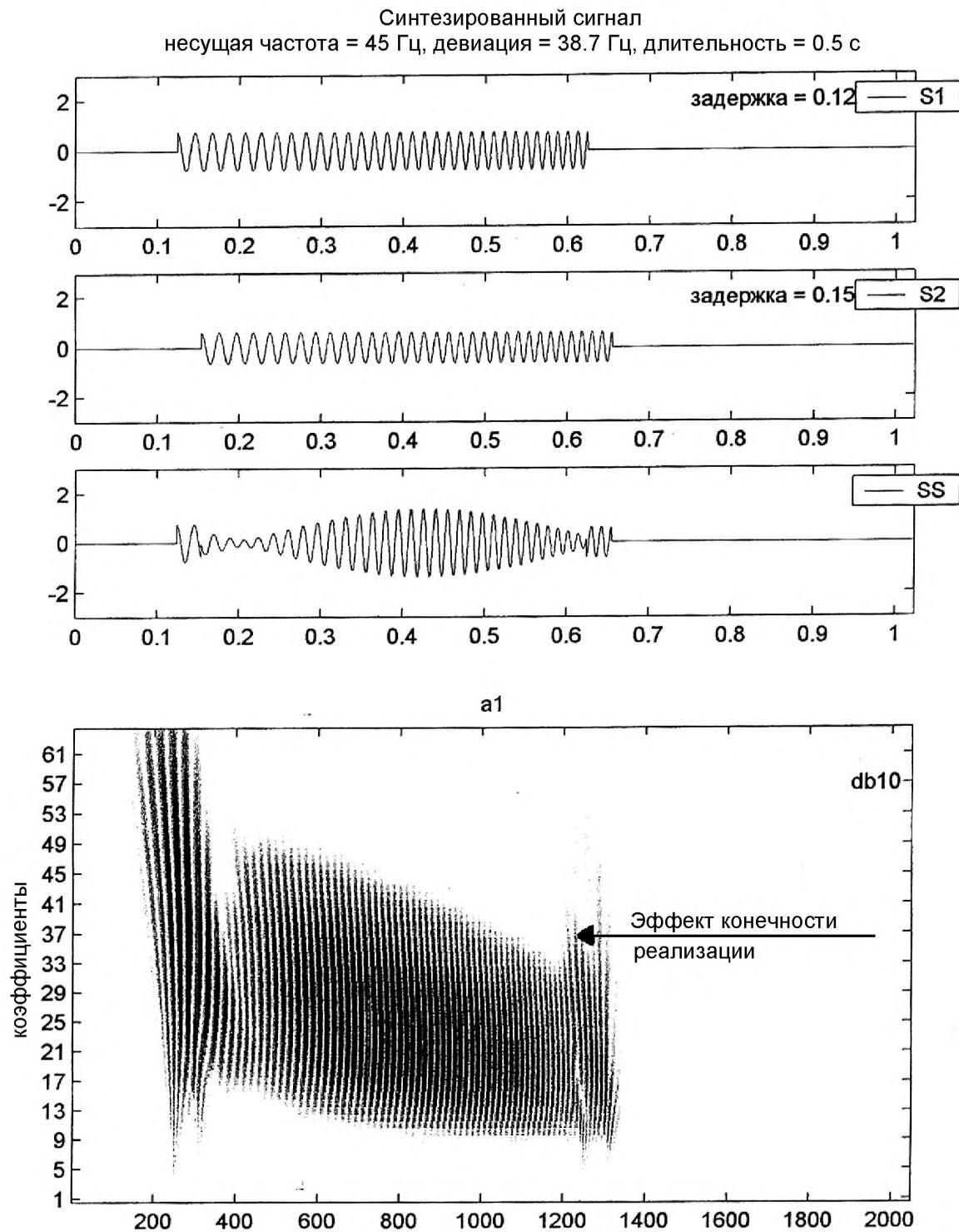


Рис. 7.1. Вейвлет-спектр синтезированного сигнала

7. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ОБСЛЕДОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

7.1. Определение прочностных характеристик свай и дефектов в них (продольных и поперечных трещин, «языков», шеек, целостности защитного слоя и узлов сопряжения арматуры).

На нескольких строительных площадках: ул. Савушкина, кв. 62, ул. Херсонская д. 20, ул. Кустодиева, д. 4, Северный пр. д. 15 были испытаны около 50 забивных и буронабивных свай.

На ул. Савушкина испытания проводились при ударном воздействии дизель-молота (вес ударной «бабы» 1 т) во время забивки свай на глубину до 30 м. Сваи забивные составные, заводского изготовления, длина одной свай 14 м, сечение 35х35 см, тип бетона В-25). Измерения отклика сигнала проводилось на сейсмодатчик КД-12 в диапазоне 1-600 Гц, установленный на грунт. Отражённые сигналы принимались и анализировались аппаратурой спектроанализатора № 3348 (Брюель и Кьер). В результате выделены дискретные составляющие, соответствующие поперечным волнам на частотах 8, 16, 24 Гц, а так же соответствующие продольным волнам на частотах первых гармоник выше поперечных 65, 105 Гц. Амплитуды продольных волн превышают амплитуды поперечных волн на 6-10 дБ. Дискреты поперечных волн частотно-модулированы, т.е. видна дисперсия скорости. Спектр сигнала не меняется в процессе забивки до последнего удара. Это свидетельствует о целостности свай. Наиболее чётко определяются дискреты в зонах фокусировки лучей, что так же подтверждается в дифракционных волнах.

На рис. 8.1.1 приведены спектральные характеристики сигналов в сваях. Видны квазизвукоряды продольных и поперечных волн, а так же дисперсия звука.

После мониторинга при забивке, ряд свай исследовался при ударе молотка весом 5 кг и приёма сигнала на те же датчики, а так же датчики КД-39 (диапазон частот 100-20000Гц). Результаты анализа подтвердили наличие этих же частот в продольных

и поперечных волнах, рис. 8.1.2. Одновременно были испытаны сваи с «нарощенными» головками. Длина «нарощенной» части ~ 0,5 м. На рис. 8.1.3, 8.1.4 видно, что на высоких частотах поперечных волн зафиксирована частотная модуляция, связанная с дополнительным отражением волн от плохого контакта (дефекта) между основной и «нарощенной» частями свай. Дефект фиксируется также в амплитудной характеристике сигнала. Таким образом, по спектральным характеристикам сигнала и их изменениям можно определить сплошность тела свай.

Несколько десятков свай были испытаны на других площадках. Полученные отражённые сигналы подвергались вейвлет-анализу. На рис.5.2.2 приведен один из них. В спектре сигнала имеются дискреты, соответствующие нескольким контурам с разными резонансными частотами от 10 Гц до 22 КГц. Контурные имеют разные декременты затухания и фазовую скорость. Частоты с максимальными амплитудами, резонансы контуров соответствуют половинам длин волны или их кратным значениям, что равнозначно геометрическим размерам компонент свай: толщина защитного слоя, диаметр металлической арматуры и др. Одновременно заметим, что колебательные контуры также соответствуют размерам свая плюс соколеблющаяся масса грунта. Как известно, грунт вокруг свай уплотняется слоями. Его напряженное состояние характеризуется изобарами. Соблюдение защитного слоя по всей длине свай свидетельствует об обеспечении требований долговечности. В случае дефектов в теле свай указанные параметры будут искажены. На рис. 8.1.6 приведен вейвлет-спектр сигнала для свай с косою трещиной на расстоянии 0,5 м от оголовка. Трещина соответствует изменению парамет-

ров колебательного контура (искажён декремент затухания на высокой частоте шкалы, коэффициенты 3-10). Нарушен и защитный слой, что и наблюдалось визуально.

Оценка несущей способности свай.

Предлагаемый экспериментальный метод состоит в следующем. После проведения на строительной площадке испытаний сваи статическими нагрузками, измеряются её сейсмические характеристики и составляется эталон. Он состоит из несущей способности сваи (тн) и данных замеров. Далее измеряют сейсмические характеристики испытываемых свай и после их обработки полученные данные по декрементам затухания, амплитудной модуляции сигнала, расстоянию до каустик, превышению их амплитуд над помехой и др., сравни-

вают с эталоном. Расхождение этих данных в % относительно эталона и есть разница в несущей способности испытываемой сваи.

Ту же самую процедуру необходимо проделать с частотами дискрет продольных и поперечных волн при помощи алгоритма идентификации сигналов. В этом случае отличие свойств грунтов под остриём и по боковой поверхности сваи можно определить по разности частот дискрет продольных и поперечных волн в спектре сигнала эталонной и испытываемой сваи. На рис. 8.1.7, 8.1.8 приведены спектры отражённых сигналов для свай на площадке, декременты затухания и сравнительные характеристики несущей способности.

Всего было исследовано около 50 свай различных типов. Следует продолжить исследования для подтверждения результатов.

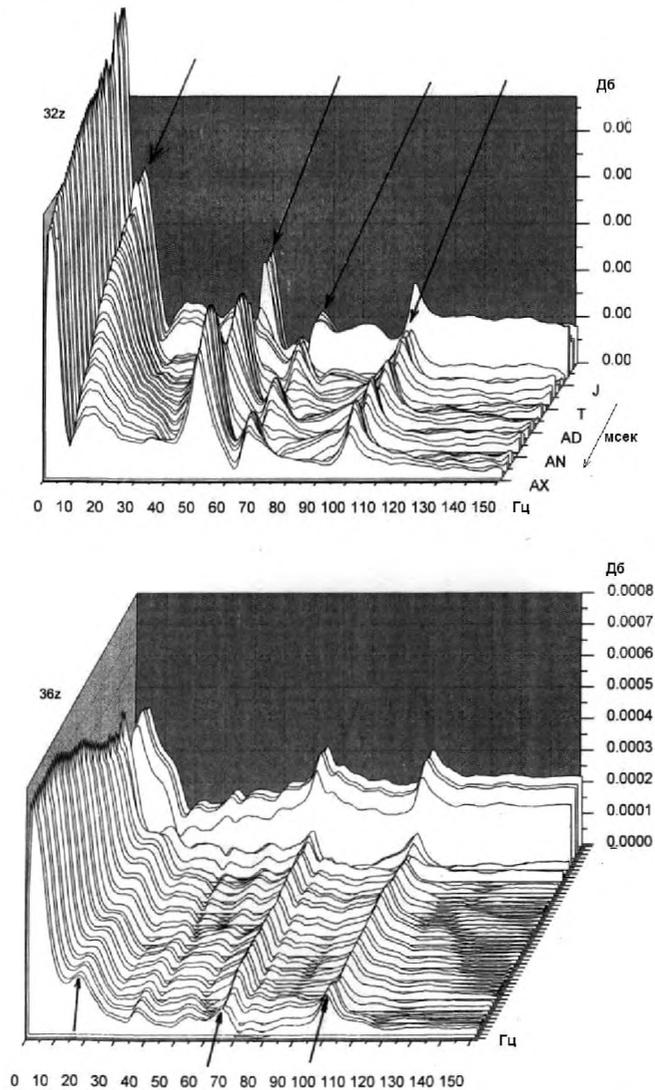
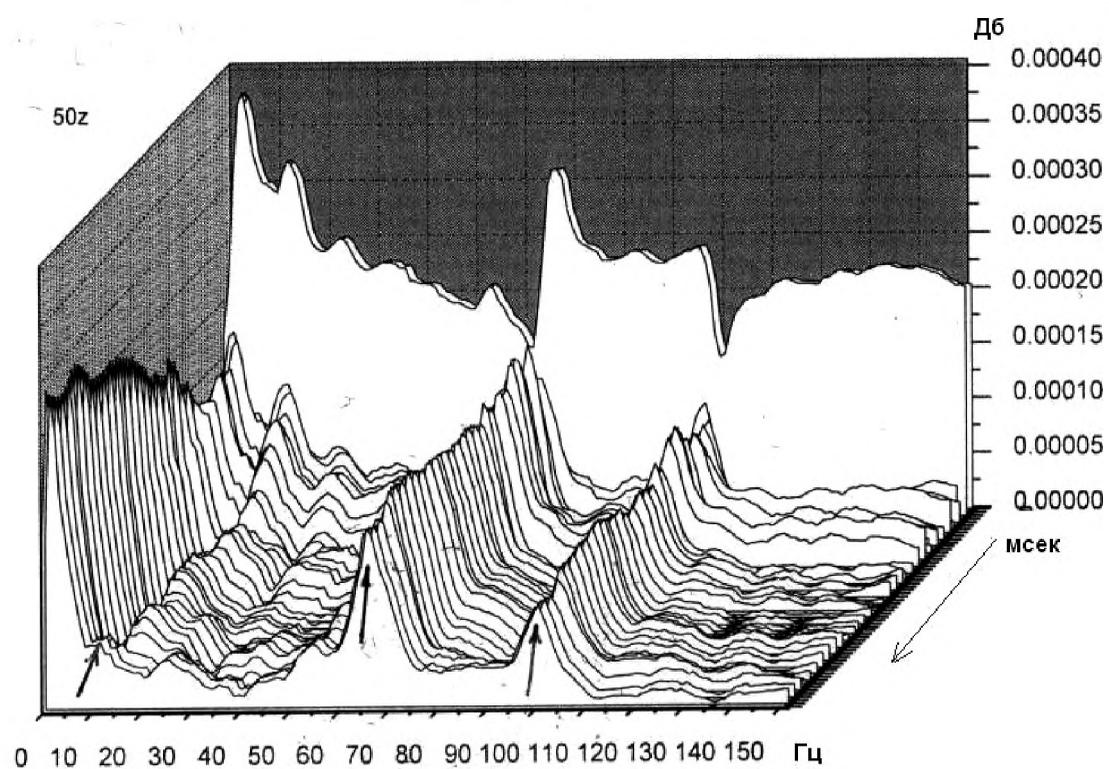


Рис. 8.1.1

Динамический спектр сигнала в свае. Видны гармоники продольных и поперечных волн (обозначены стрелками).



X Axis

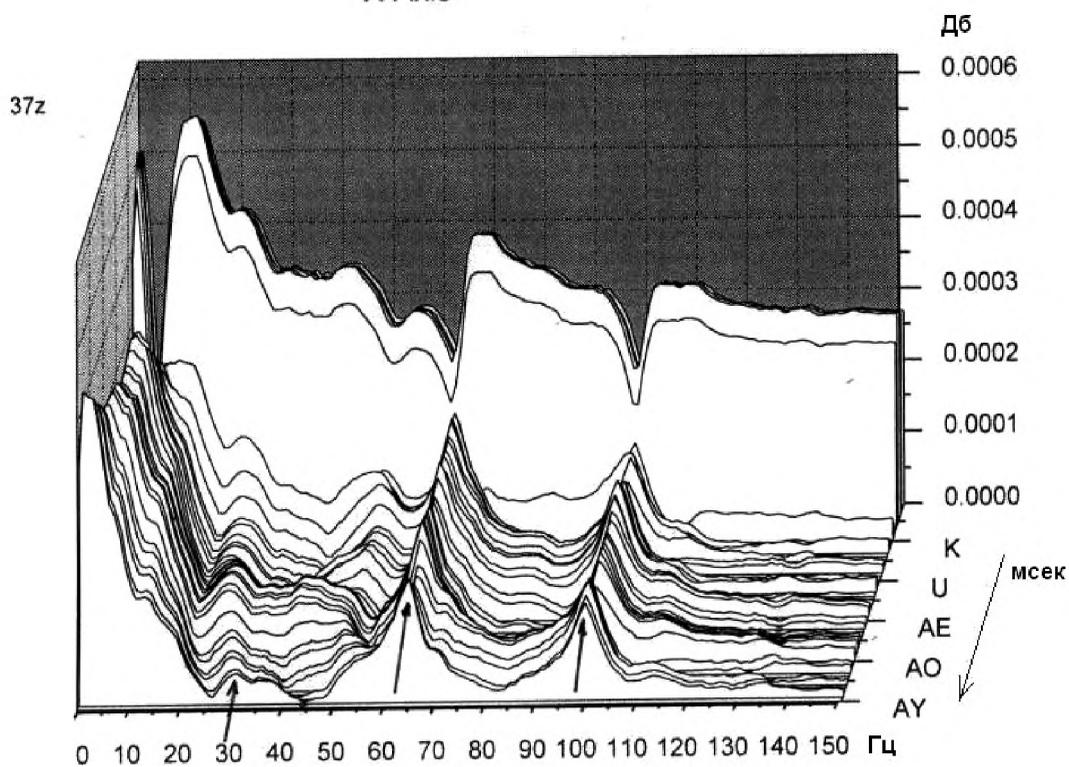
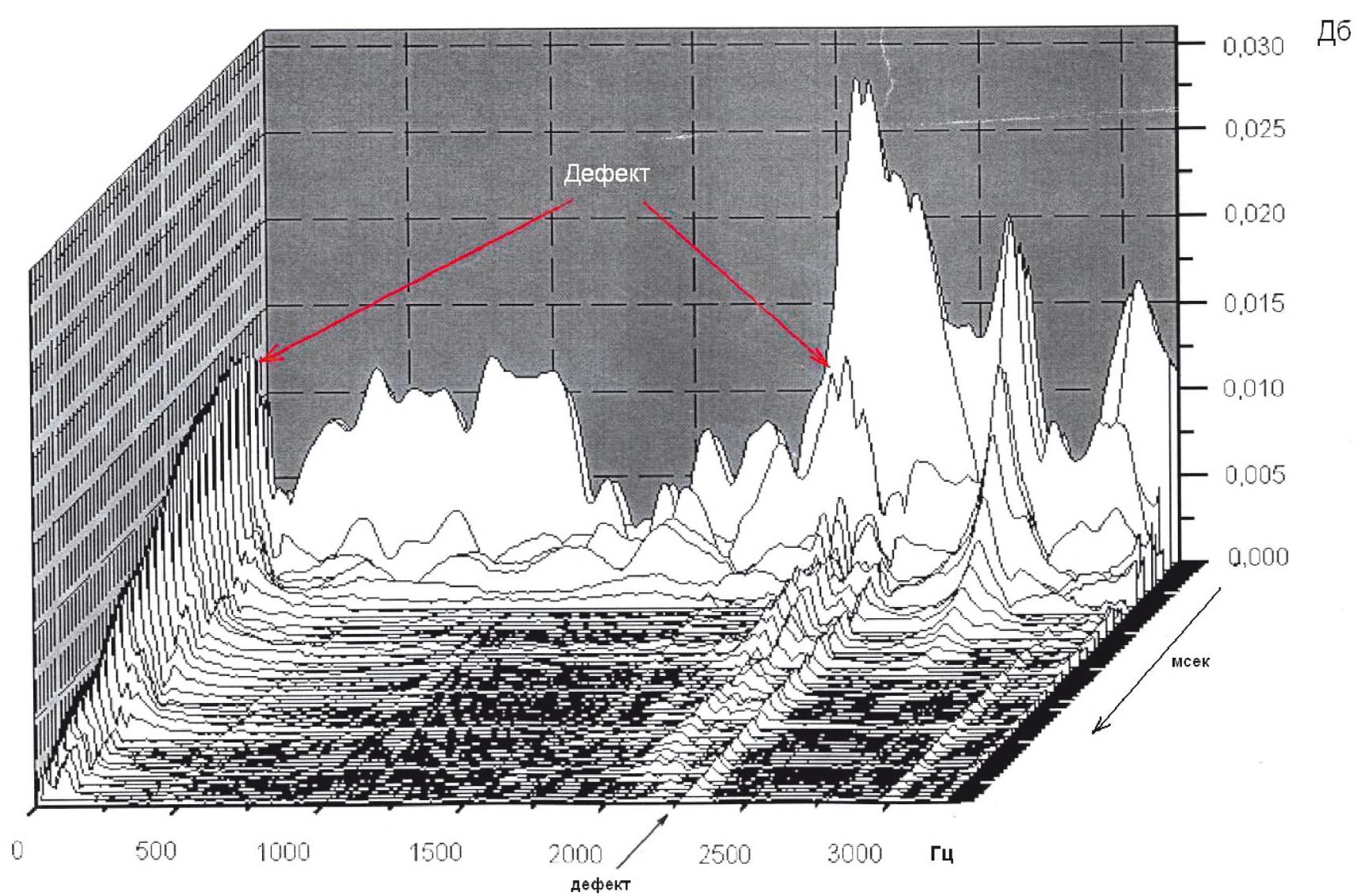


Рис. 8.1.2

Видны гармоники продольных и поперечных волн.
Динамический спектр сигнала в свае.



дефект

Рис. 8.1.3

Сигнал в свае с дефектом. Видна частотная модуляция на частоте 2-2,1 кГц (признак дефекта) и отраженный сигнал от малого дефекта

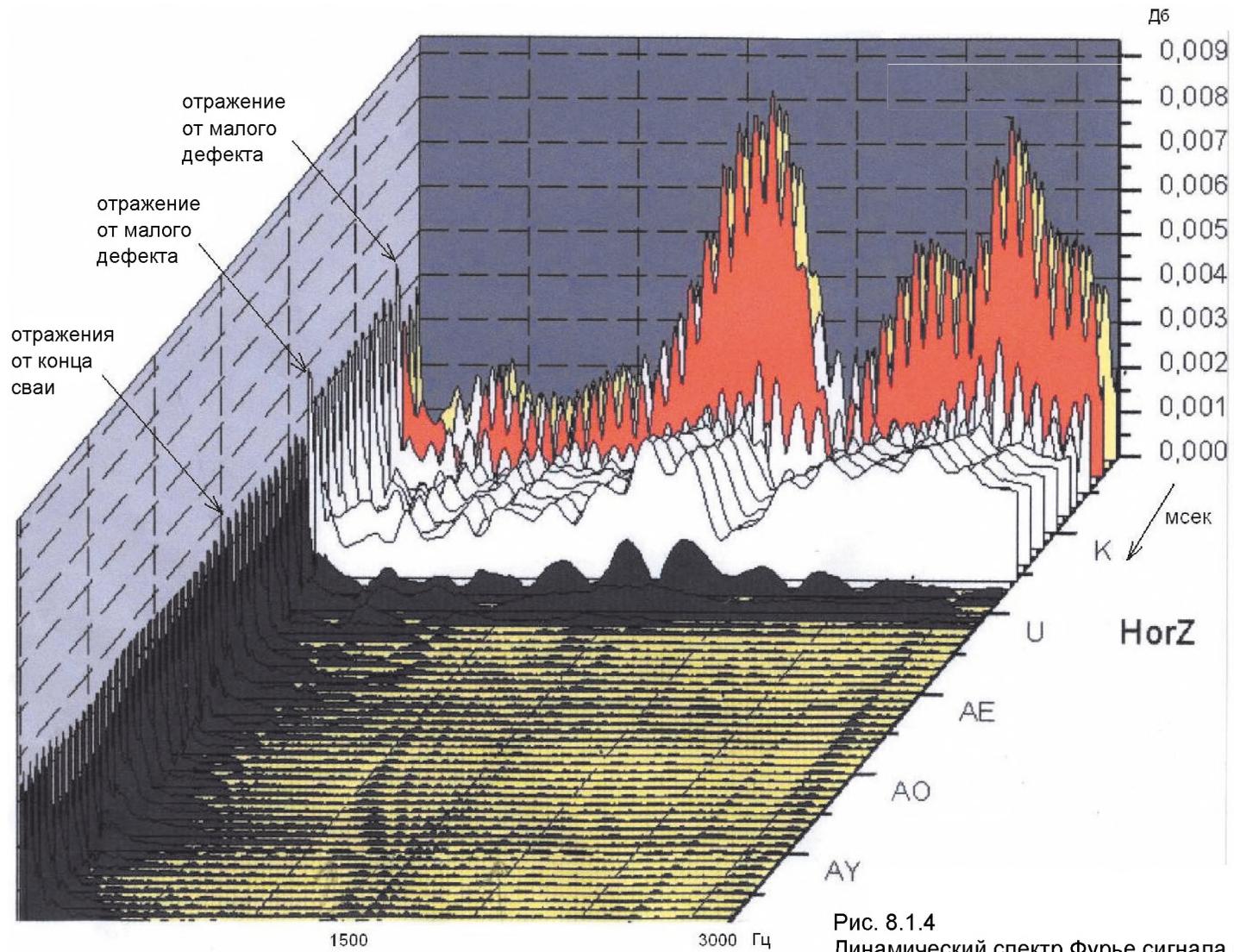


Рис. 8.1.4
Динамический спектр Фурье сигнала в свае.
Интерференция мод.

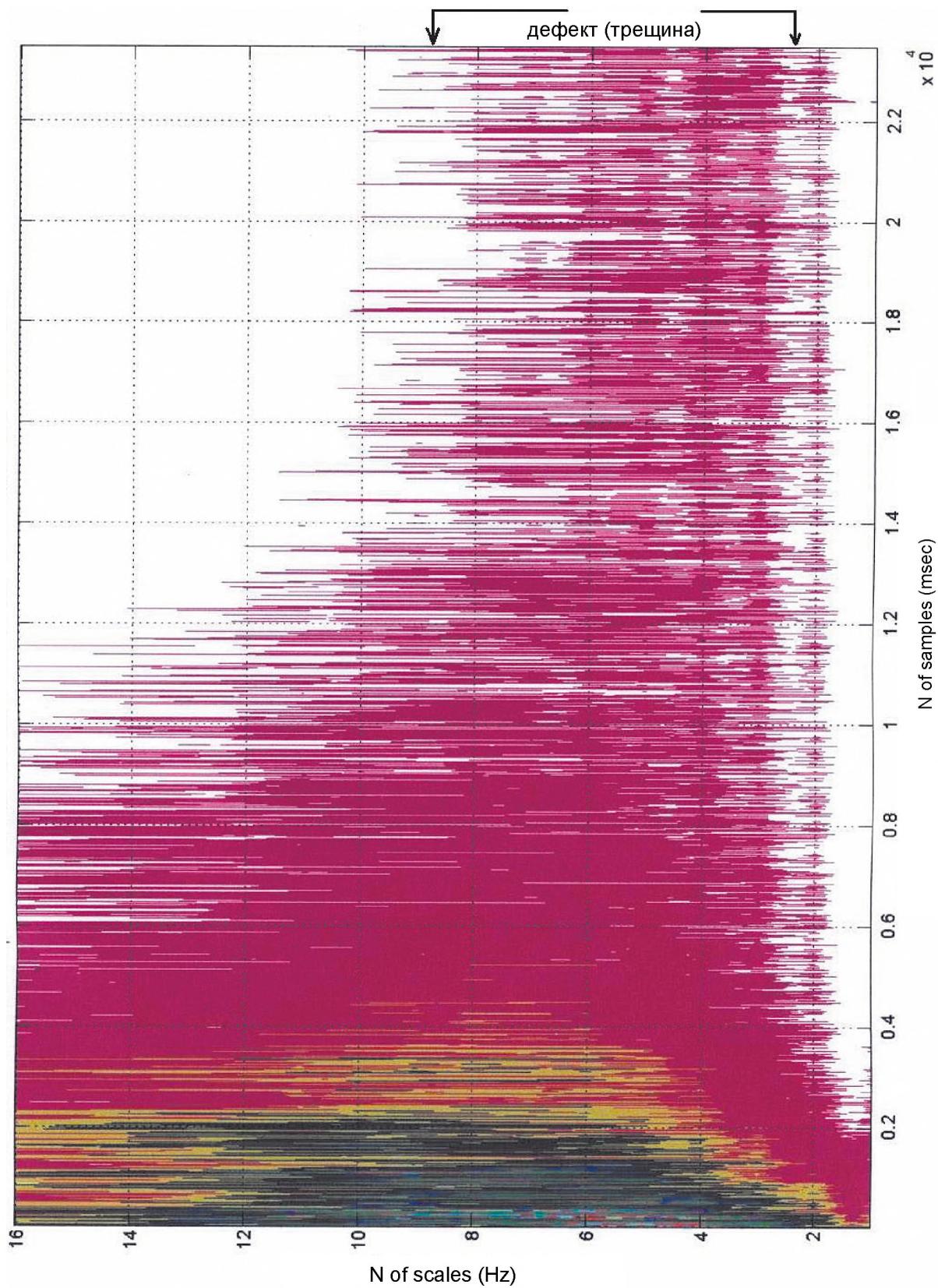


Рис. 8.1.6 Вейвлет-спектр сигнала в свае с трещиной

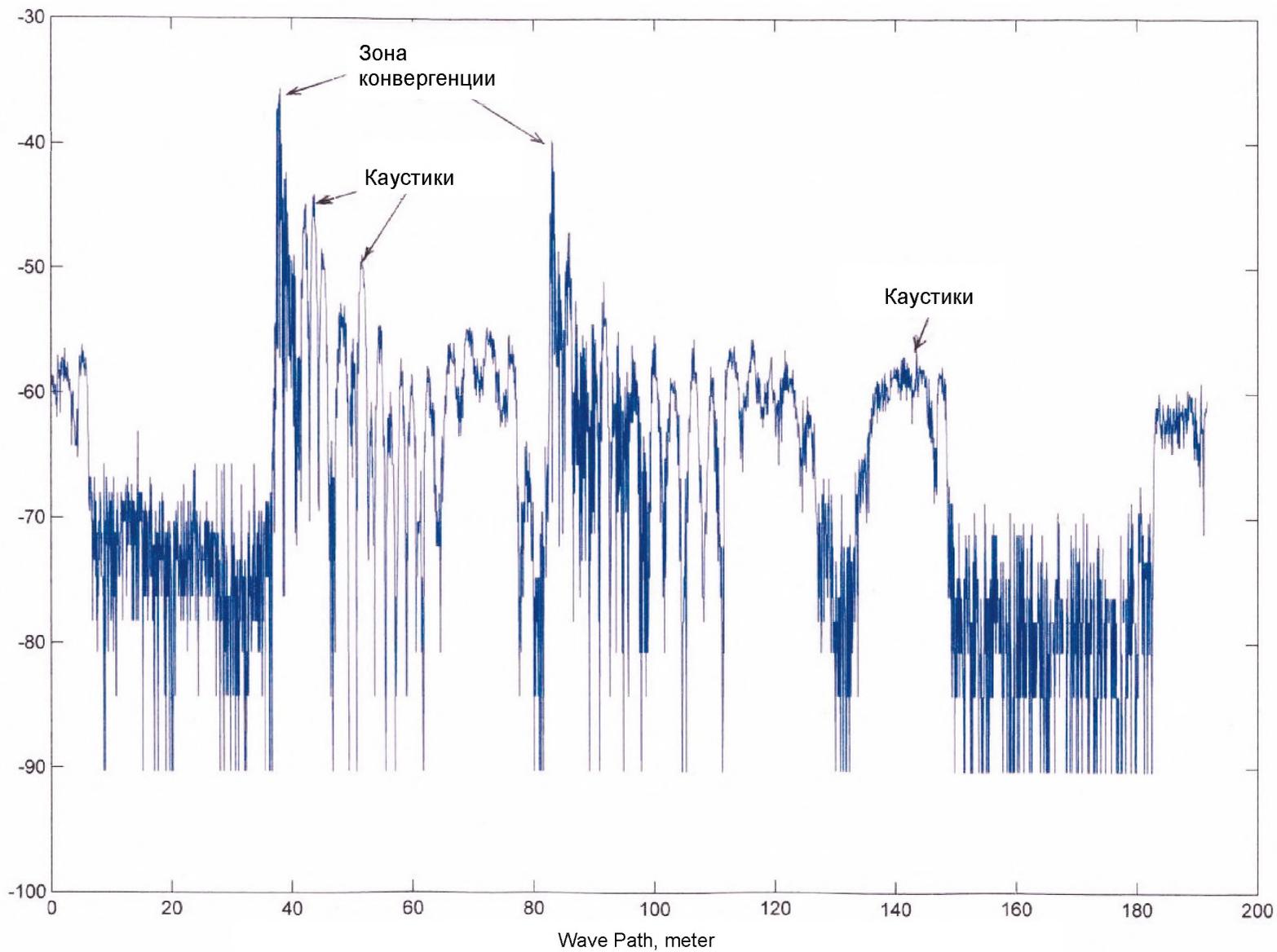


Рис. 8.1.7. Спектральная характеристика сигнала в свее. Каустики и зоны конвергенции.

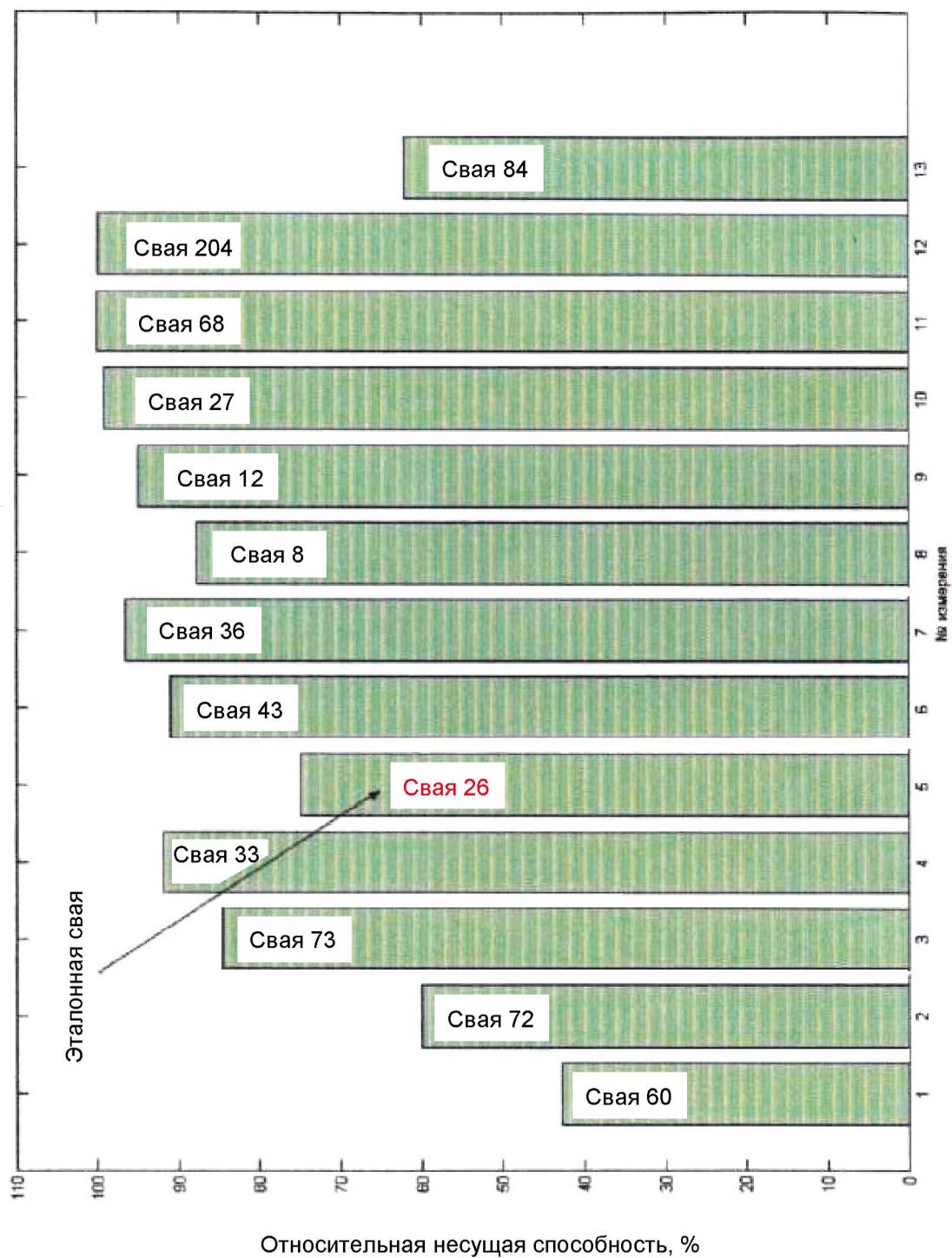


Рис. 8.1.8. Сравнительная оценка несущей способности забивных свай в процентах относительно эталонной сваи №26

7.2. Определение прочностных характеристик обделки тоннеля метро и состояния вмещающего грунта на участке «Размыв», ул. Карбышева.

Во время мониторинга коллектора на участке «Размыв» одновременно исследовались характеристики обделки тоннеля метро и грунта вокруг его обделки, так как уплотнение грунта у обделки или ее дефект может косвенно сказаться на изменении характеристик основания коллектора. При этом использовались, как прямые сигналы от вибраций системы «поезд-рельсы-обделка», так и отраженные и дифрагированные сигналы при сейсмопрофилировании грунта с поверхности земли.

При прохождении поездов метро на кратчайшем расстоянии от приемника, в момент удара колесных пар о стыки рельс возникают широкополосные импульсы большой амплитуды, которые возбуждают колебания обделки тоннеля на собственных резонансных частотах, что значительно усиливает амплитуды (см. рис. 8.2.1, 8.2.2). Тоннель метро можно представить как тонкую цилиндрическую оболочку (см. модель В.Болотина), где имеются несколько групп собственных резонансов. Среди них можно выделить серии преимущественно нормальных (кольцевых) и тангенциальных форм колебаний. Частоты указанных серий можно определить

$$\omega_n = \frac{h}{\lambda^2} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} - \text{нормальная компонента}$$

$$\omega_t = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} - \text{тангенциальная компонента}$$

где h – толщина оболочки, E – модуль Юнга, ρ – плотность, λ – длина волны. Примерный расчет показал, что для тоннеля диаметром 7,5 метров, толщиной обделки 0,35 м частоты равны 14, 22, 44, 52, 110, 190 Гц.

Одновременно с этим принятые сигналы вибраций поездов метро и обделки тоннеля во время прохода их под коллектором анализировались с помощью пакета вейвлет-анализа в диапазоне частот 1-150 Гц. Кроме того, была применена предварительная специальная фильтрация, позволяющая повысить помехоустойчивость нестационарного сигнала на 15 дБ (см. рис 8.2.3.). В результате такой сложной обработки в вейвлет-спектрах были обнаружены дискретные составляющие на частотах 25, 37, 53, 140 Гц. Наиболее интенсивные дискретности с точностью до 10-15% совпадали с расчетными. Отклонения объясняются неточными исходными данными по конструкции обделки. Как видно обнаруженные дискретности соответствуют параметрам жест-

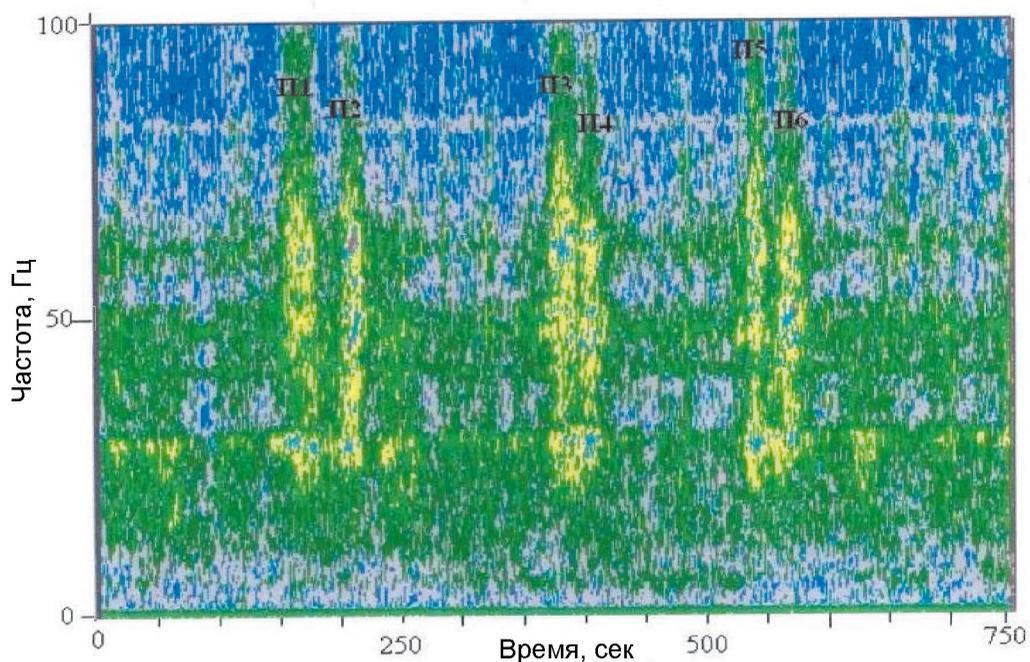
параметрам жесткости обделки тоннеля и ее элементов. В подтверждение этого эффекта на рис.8.2.4. приведены спектры сигналов от прохода поезда (изменение интенсивности во времени), где соотношение сигнал-помеха более 6-10 дБ. Одновременно с этим в амплитудно-временной характеристике процесса наблюдались дифракционные максимумы с превышением амплитуд так же на 6-10дб. Их регулярность (периодичность во времени) характеризует параметры грунта под обделкой, т.е. подстилающий слой волновода. Таким образом, изменения характеристик дискрет (соотношения амплитуд, индекс частотной модуляции), изменение параметров дифракционных максимумов в сигнале характеризуют изменение прочности обделки (наличие скрытых трещин и др.) и изменение свойств подстилающего слоя (например, расжижение или виброуплотнение).

При сейсмопрофилировании методом поверхностных волн и указанной сложной обработке зеркально-отраженных и дифрагированных волн также были выделены дискретные составляющие, соответствующие расчетным значениям собственных резонансов. Значительные превышения уровня сигнал - помеха объясняется большой силой цели (радиус 7,5 метров, а с учетом второго пути и больше) компенсирующей затухание и расширение фронта волны по цилиндру, а также большим выигрышем в помехоустойчивости. На рис. 5.7.2. приведены вейвлет-спектры отраженных сигналов и дифрагированных волн. Видны дискретности и концентрические окружности спектральной плотности, соответствующие закономерностям дифракции.

Необходимы дальнейшие исследования для набора экспериментальных данных, более точного расчета резонансов и составления методики обследования.

Сонограммы по 4 точкам измерений.

Точка 1



Проходная вибрационная характеристика поездов метро на участке «Размыв». Динамические спектры сигналов. П1-П6 моменты прохода поездов под приемником.

Точка 2

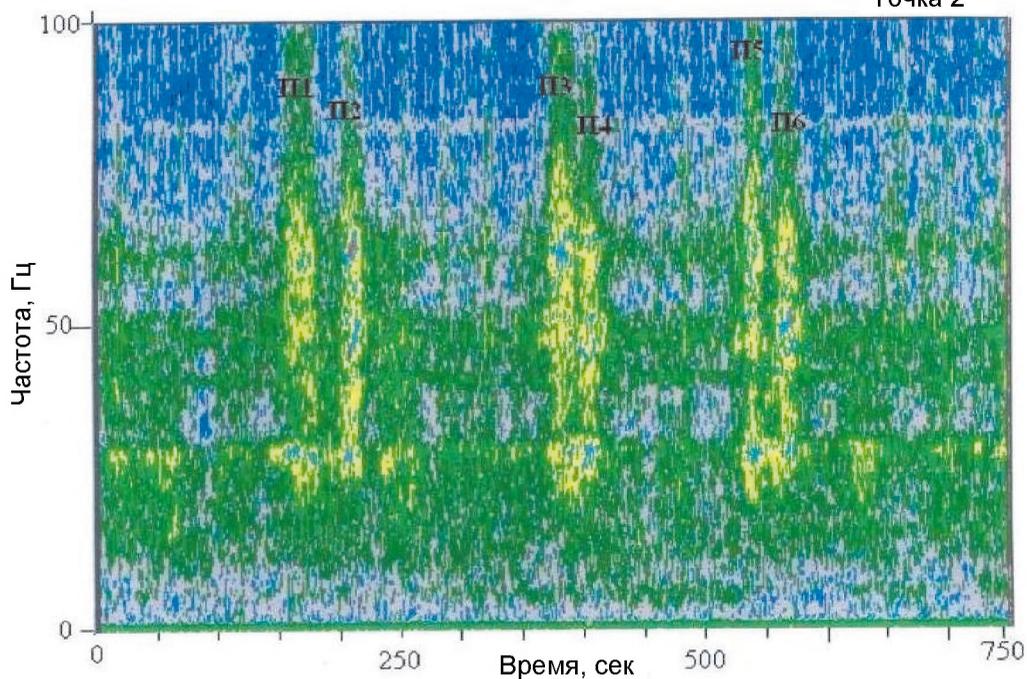
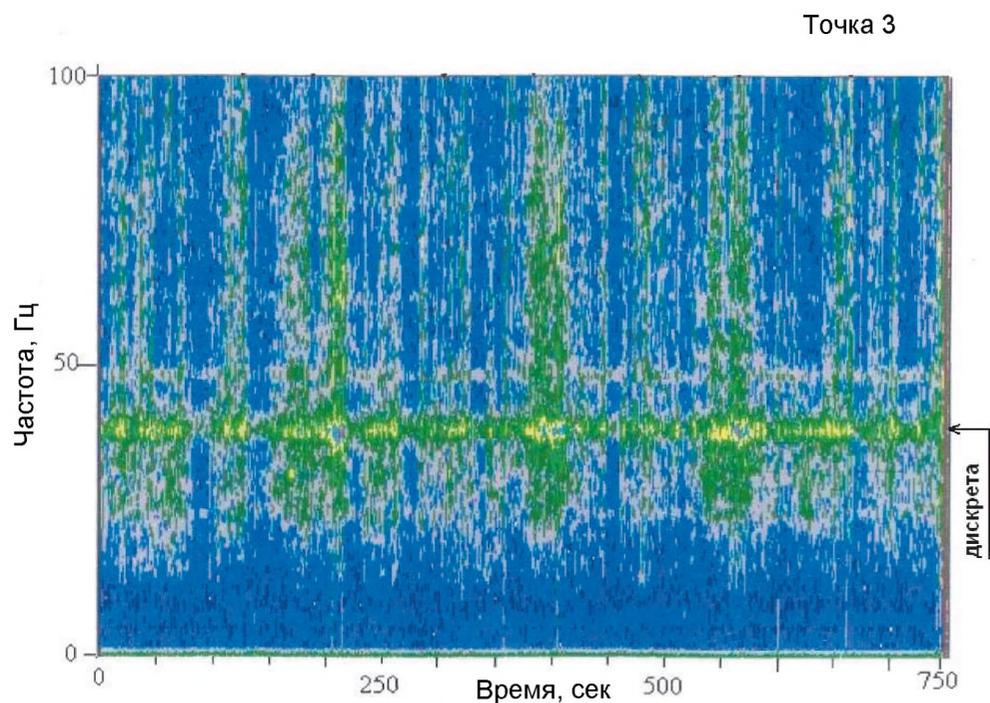


Рис. 8.2.1

Проходная вибрационная характеристика поездов метро на участке «Размыв». Динамические спектры сигналов. П1-П6 моменты прохода поездов под приемником.



Проходная вибрационная характеристика поездов метро на участке «Размыв». Динамические спектры сигналов. П1-П6 моменты прохода поездов под приемником.

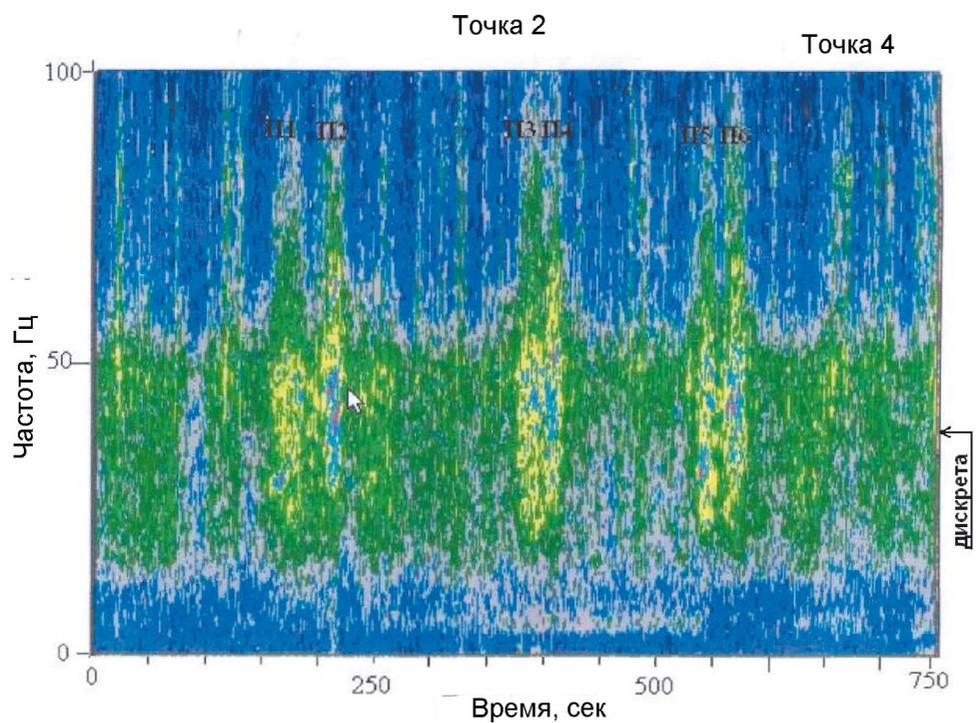


Рис. 8.2.2

Проходная вибрационная характеристика поездов метро на участке «Размыв». Динамические спектры сигналов. П1-П6 моменты прохода поездов под приемником. Дискретные составляющие характеризуют прочность обделки тоннеля.

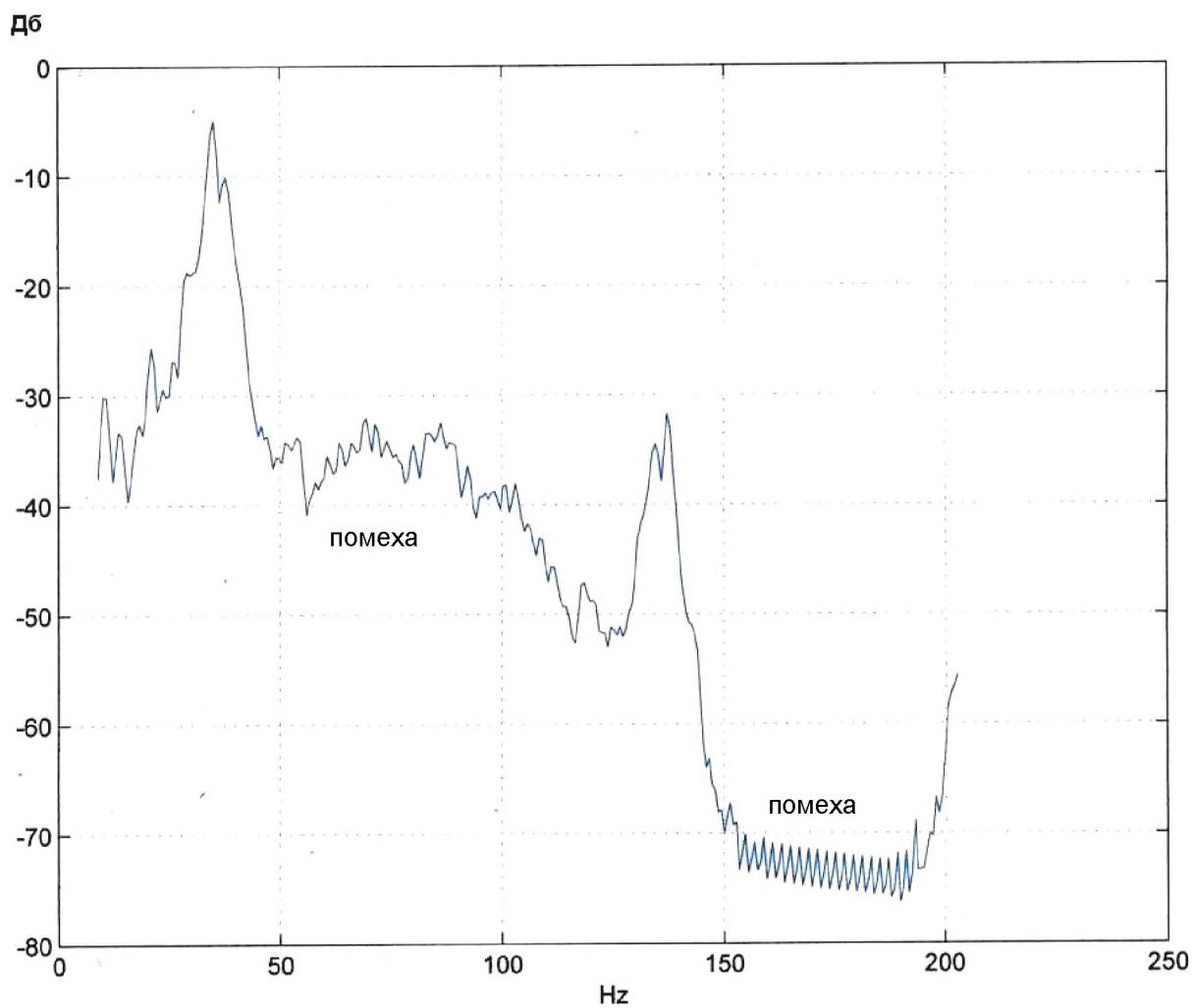


Рис. 8.2.3
Спектр прямого сигнала излучения тоннеля метро.
Собственные резонансные частоты.

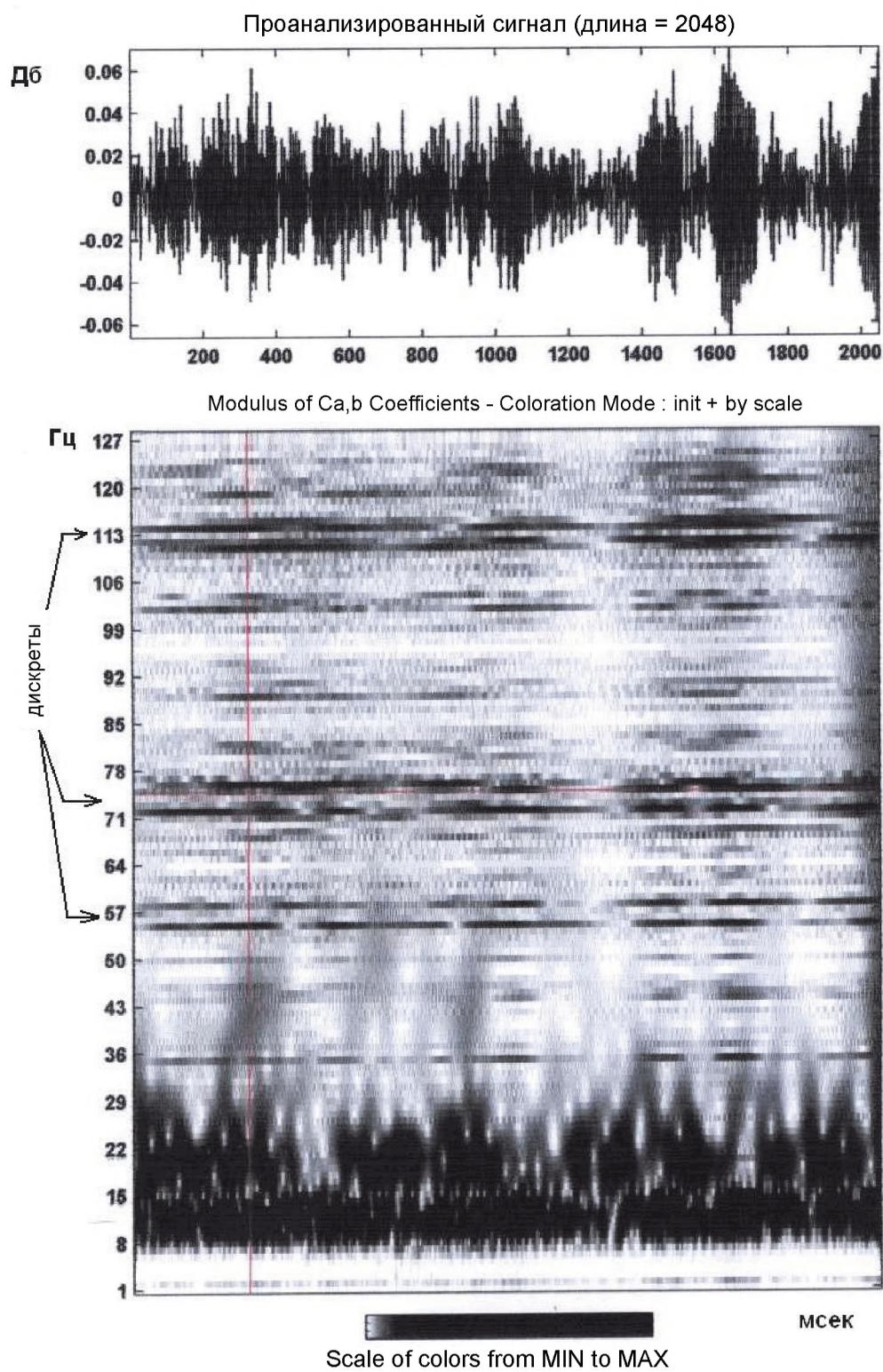


Рис. 8.2.4
Вейвлет-спектр прямого сигнала излучения тоннеля метро.
Видны собственные резонансные частоты обделки.

7.3. Площадь Конституции, обследование здания 24, корп.1, 2, 3.

Здание недостроенное, в аварийном состоянии, осадки корпуса 2 (фундамент плита) – 23 см, корпус 3 (на сваях) – 15 см, на корпусе 1 выполнен только ростверк на свайном основании. Задача состояла в выяснении причин указанной аварийной ситуации и выяснения возможности строительства многоэтажного здания на ростверке корпуса 1. Для её решения были применены комплексные геофизические методы совместно с традиционными инженерно-геологическими.

Обследование здания корпуса 1

На рис. 8.3.1. представлены интегральные характеристики акустической жёсткости по слоям грунта, соответствующим литологическим разностям. Указанные характеристики тарировались по литологическим слоям геологического разреза с целью повышения достоверности результатов при интерпретации измерений.

Анализ полученных данных показывает следующее. Фундаментная плита здания 2 по оси «А» (между осями 8-11) лежит на слабых грунтах мощностью 0.5-1.5 м; между осями 11-14 мощность ослабленных грунтов увеличивается до 3-6 м, глубина залегания кровли моренных грунтов 8-11 м. На участке между осями 15-17 отмечены резкие изменения (уменьшение) плотности грунтов основания. Следствием этой аномалии является наличие трещины в фундаментной плите и стенах первого этажа. В районе оси 14 в интервале глубин 17-25 м отмечен ослабленный грунт в кровле протерозойских отложений. Результаты взаимно-корреляционного анализа характеристик сигналов, полученные по надземным конструкциям 1 этажа показали, что степень корреляции на низких частотах по датчикам в осях А-17 и А-18 составляет минус 3,5, в то время как по остальным осям – минус 2, что свидетельствует о разрыве сплошности конструкции. В колоннах по осям А-17, А-18 происходит затухание сигналов на высоких частотах, моды на низких частотах неярко выражены. Динамические спектры и коэффициенты передачи энергии сигналов подтверждают полученную информацию. Таким образом, в конструктивных узлах «колонна-ригель» (подвал 1 этажа), в осях А-17, А-18 обнаружены скрытые дефекты – трещины, нарушения сплошности.

Обследование грунта под ростверком корпуса 1

На рис 8.3.2. и 8.3.3. приведены результаты комплексного обследования грунта. Приведены

данные геологических изысканий, статического зондирования и геофизического метода. Данные геофизических измерений были получены ранее.

Анализ полученных характеристик, представленных на этих рисунках, показывает следующее:

а) кровля морены находится на глубине около 6 м. В районе пунктов возбуждения (ПВ) №№ 4 и 5 имеются разуплотнённые зоны до глубины 9-11 м, а так же уплотнённая зона на глубине 6 м под центральной частью ростверка, что вызвано техногенными воздействиями на грунт от веса ростверка;

б) кровля протерозойских отложений залегает на глубине ~ 18-19 м. В кровле этих отложений отмечены не выдержанные по простиранию и изменяющиеся по мощности от 1 до 5 и более метров грунты, имеющие более низкие деформационно-прочностные характеристики, образование которых может быть объяснено воздействием на них гляциодислокаций;

в) плотность не дислоцированных протерозойских отложений неравномерна, что может быть объяснено наличием большего или меньшего количества прослоев очень плотного песчаника.

Данные геофизических наблюдений с достаточной надёжностью подтверждаются результатами бурения инженерно-геологических скважин.

Техногенные аномалии плотности грунта под ростверком.

Под остриём свай ростверка корпуса 1 наблюдается техногенное уплотнение грунта (изменение акустической жёсткости). Уплотнённые слои грунта наблюдаются с интервалом через 1,5-2 м до глубины 32-35 м (с вероятностью 0,8 - до глубины 40 м). Изобары эллипсов напряжений по оси Y смещены на 3-4 м в сторону корпуса 2. Повидимому, это объясняется проведенной более поздней добивкой свай в части ростверка, примыкающего к корпусу 2. Полученные характеристики занесены в паспорт (эталон) плотности (акустической жёсткости) напряжённо-деформированного состояния грунта под ростверком корпус 1 в целях использования при слежении за его изменениями на последующих этапах исследований.

Выводы.

1. Обнаруженные по данным преломленных и отражённых волн с использованием глубинных датчиков моренные и протерозойские отложения с достаточной надёжностью подтверждаются данными бурения скважин.

2. Кровля моренных отложений определена на глубине ~ 6 м, кровля протерозойских отложений – на глубине 18-19 м.

3. В кровле протерозойских отложений наблюдаются ослабленные зоны до глубины 23-25 м, что объясняется проявлениями гляциодислокаций.

4. На глубине 39-41 м в толще протерозойских отложений обнаружен слой плотного грунта. Плотность неравномерно распределена по площади, акустическая жёсткость изменяется от 3 до 6 дБ, т.е. в 2 раза. По-видимому, эти изменения зависят от количества и мощности прослоев песчаника.

5. Под ростверком корпуса 1 грунты подвергнуты техногенному воздействию, вызванному забивкой свай. Изобары напряжённого состояния грунта в разрезе имеют вид усечённых эллипсов. Изменение напряжений по глубине наблюдается с интервалом 1,5-2 м до глубины 32-35 м. Наибольшая плотность грунта установлена на участке

примыкания ростверка корпуса 1 к корпусу 2 и прослежена на 4 м в сторону корпуса 2.

6. Под центральной частью ростверка на глубине 5-6,5 м наблюдается уплотнение грунта, по его краям – разуплотнение на глубинах 9-11 м.

7. При реконструкции свайного поля ростверка и проектирования надземной части корпуса 1 рекомендуется учесть указанные особенности ослабленных зон в верхней части протерозойских отложений до глубины ~ 40 м и установленные аномалии техногенного происхождения.

8. Составлен паспорт (эталон) акустической жёсткости (плотности) напряжённо-деформированного состояния грунта под ростверком корпуса 1 для последующего слежения за его изменением на следующих этапах строительства и эксплуатации.

9. По результатам обследования были выполнены геотехнические расчёты, ограничивающие высотность проектируемого здания.

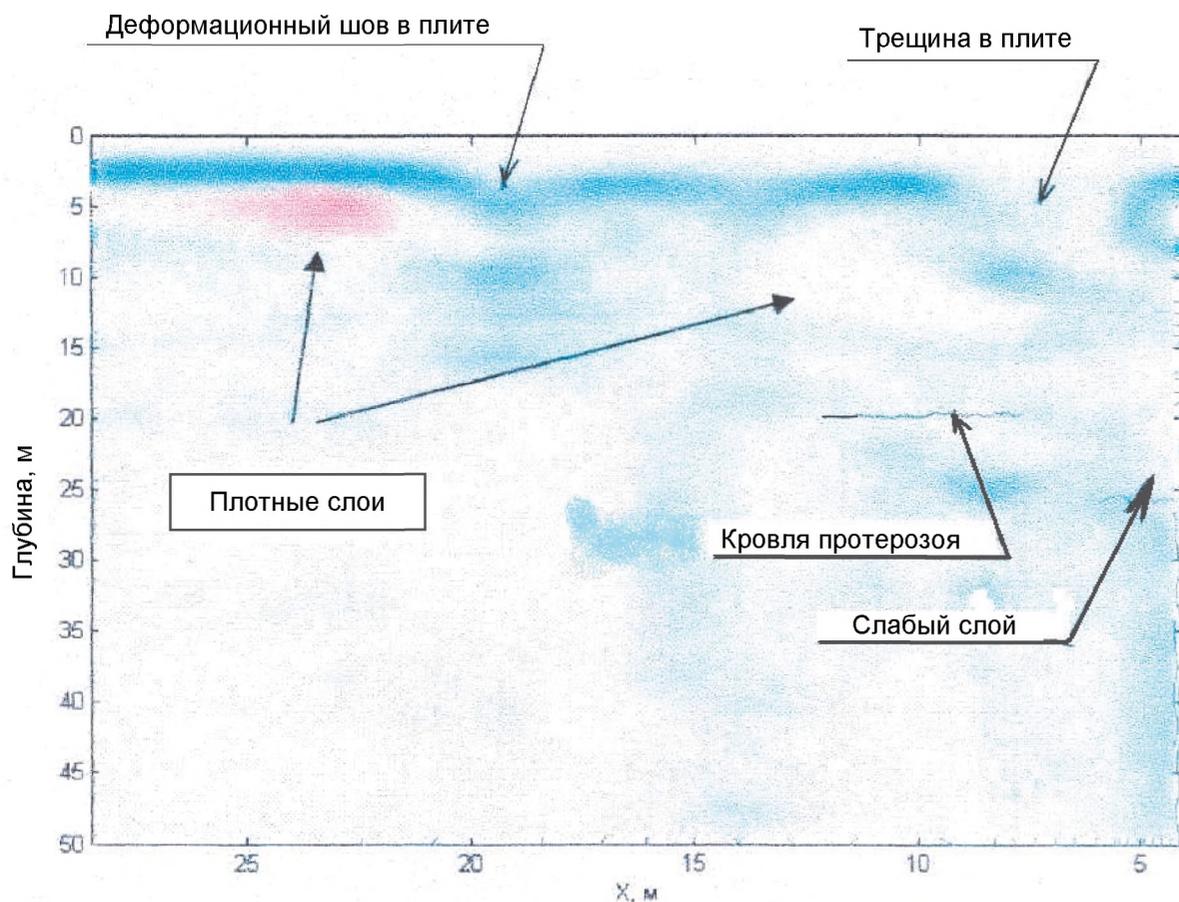


Рис. 8.3.1
Структура грунта по трассе

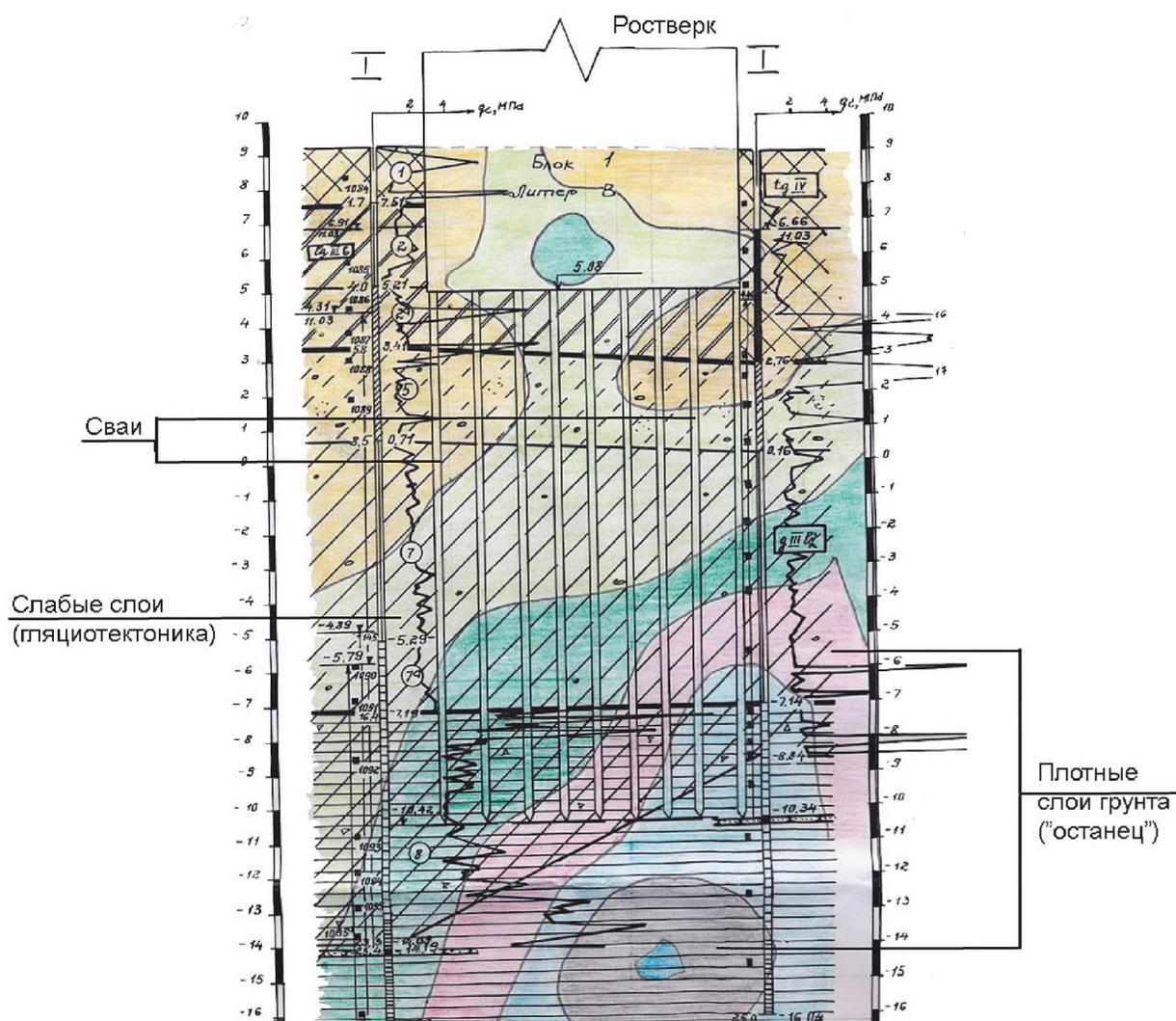
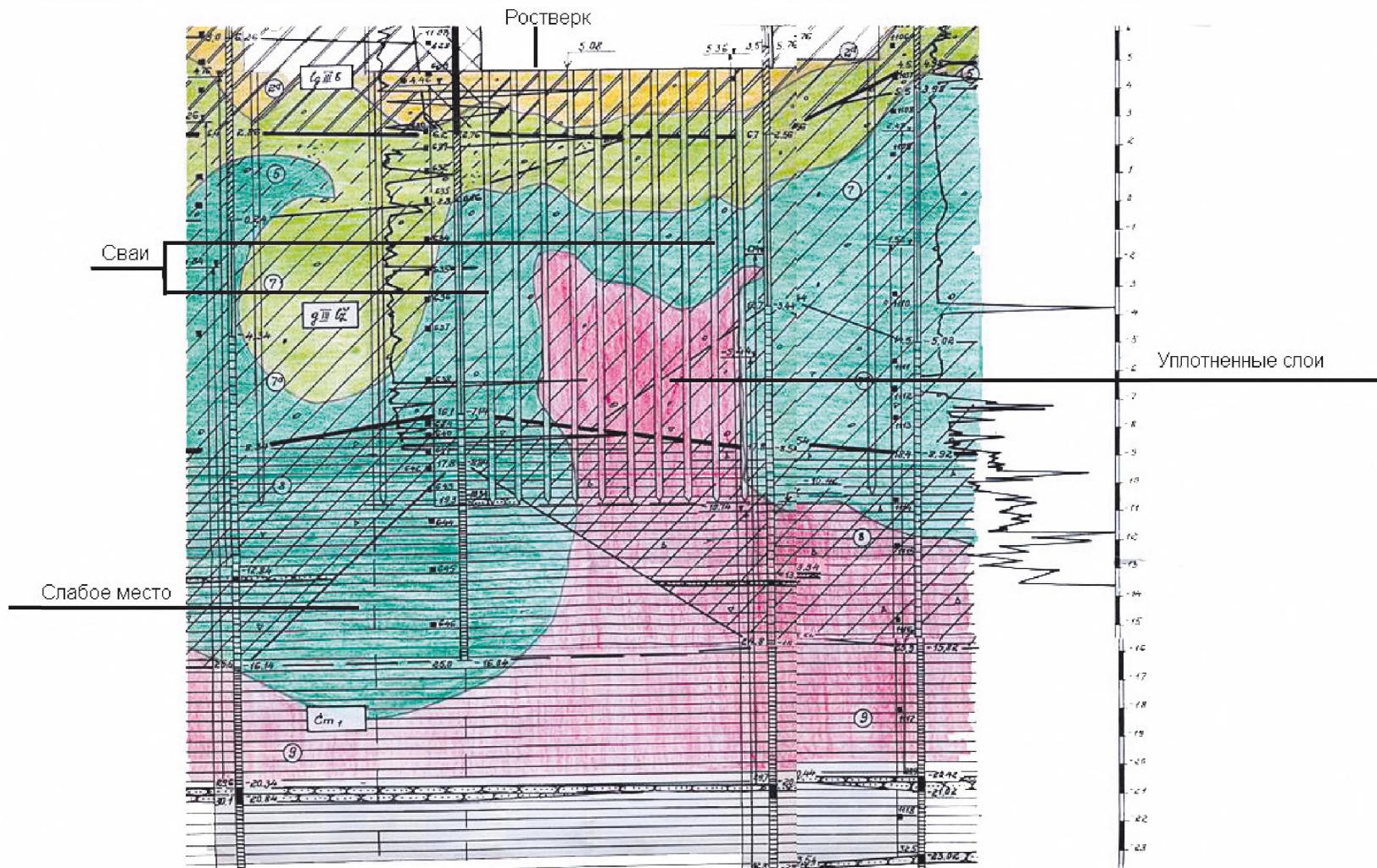


Рис. 8.3.2
 Комплексное представление результатов геологических изысканий, статического зондирования и геофизики грунтов корпуса №1. Черным цветом обозначены геотехнические характеристики, остальными цветами неоднородности геофизическим методом



Комплексное представление геотехнических и геофизических характеристик грунта под ростверком корпуса №1

7.4. Обследование административного здания по ул. Фрунзе, д. 18.

Здание имело значительные неравномерные осадки, трещины в стенах. Фундамент – монолитная плита. Задачей обследования являлось определение причин возникновения указанных дефектов. Применён метод отражённых волн с использованием амплитудно-временных и спектрально-временных характеристик сигналов по сейсотрассе у здания. На рис. 8.4.1 приведена схема измерений методом отражённых волн. Освещённая область с учётом зоны Френеля составила от оси «А» до оси «Г» 10-12 м.

На рис.8.4.3. представлены результаты спектральной обработки сигналов по трассе. По оси ординат отложена частота спектра в Гц, по оси абсцисс – расстояние по трассе в м. Частоты спектра пересчитаны на глубину просвечивания с учётом двойного пути прохождения луча от кровли слоя грунта и обратно к приёмнику. Амплитуда спектра сигнала обозначена цветом. Справа дана шкала. Красно-коричневый цвет соответствует залеганию моренных отложений. Синие пятна на изображении соответствуют ослабленным зонам грунта. Отчётливо видна неоднородность – ослабленная зона слева от дренажной трубы, в сторону оси «1». Ширина зоны 4-5 м, длина не менее 10 м, глубина 6-7 м. Ослабленная зона соответствует месту просадки грунта под фундаментной плитой. Возникновение ослабленной зоны можно объяснить бесконтрольной откачкой воды из дренажного колодца, повышенной скоростью водного потока, приводящей к суффозии тонких частиц грунта из основания фундамента. На рис.8.4.4. представлены

результаты спектральной обработки сигнала при измерении его коэффициентов передачи для системы «грунт-фундамент». По оси ординат отложена частота сигнала в Гц, соответствующая его глубине, по оси абсцисс – расстояние по трассе в м. Амплитуда обозначена цветом. Видны трассы дискретных составляющих. Соотношение амплитуд дискретов меняется в соответствии с высокочастотной и низкочастотной зонами Френеля. Белые пятна соответствуют слабому сигналу и ослабленной зоне в грунте. Наличие ослабленной зоны в грунте в районе просадки фундамента на участке прохождения дренажной трубы подтверждается.

В динамических спектрах сигнала от каждого сейсмоприёмника отдельно вдоль оси «А» здания сигнал с частотой 35 Гц прослеживается по всей трассе и соответствует кровле моренных отложений. Наличие интерференционной структуры в виде модуляции спектра сигнала, либо её отсутствие свидетельствуют о неоднородности среды. Неоднородность среды в районе дренажной трубы подтверждается. Различный декремент затухания энергии сигнала в правой и левой половинах здания свидетельствуют о неодинаковом состоянии грунта под фундаментной плитой в этих частях здания. Подтверждением этому является факт различной осадки лифтовых шахт столовой по осям «1» и «9».

Эти данные были использованы в результатах геотехнического обследования. Основание было укреплено буронабивными сваями. Осадки здания прекратились.

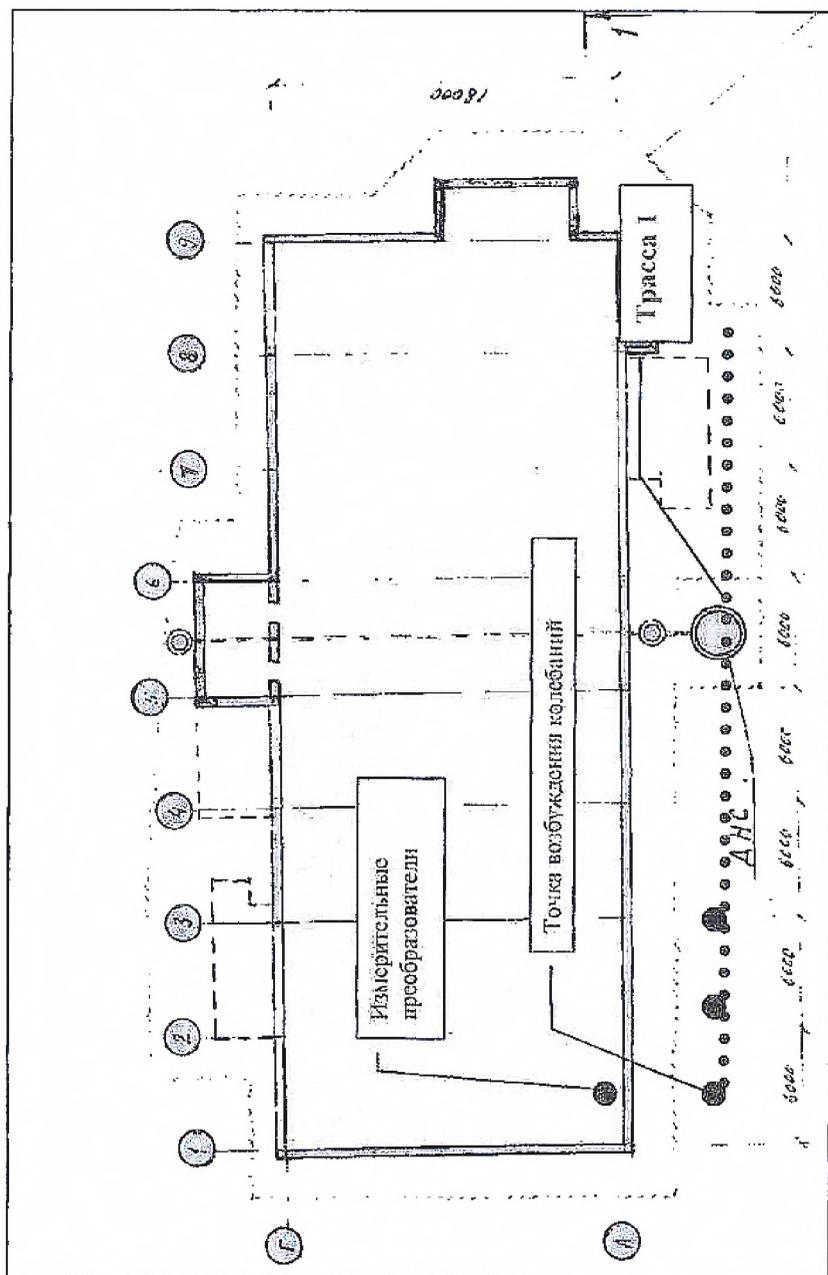


Рис. 8.4.1. Схема измерений по трассе

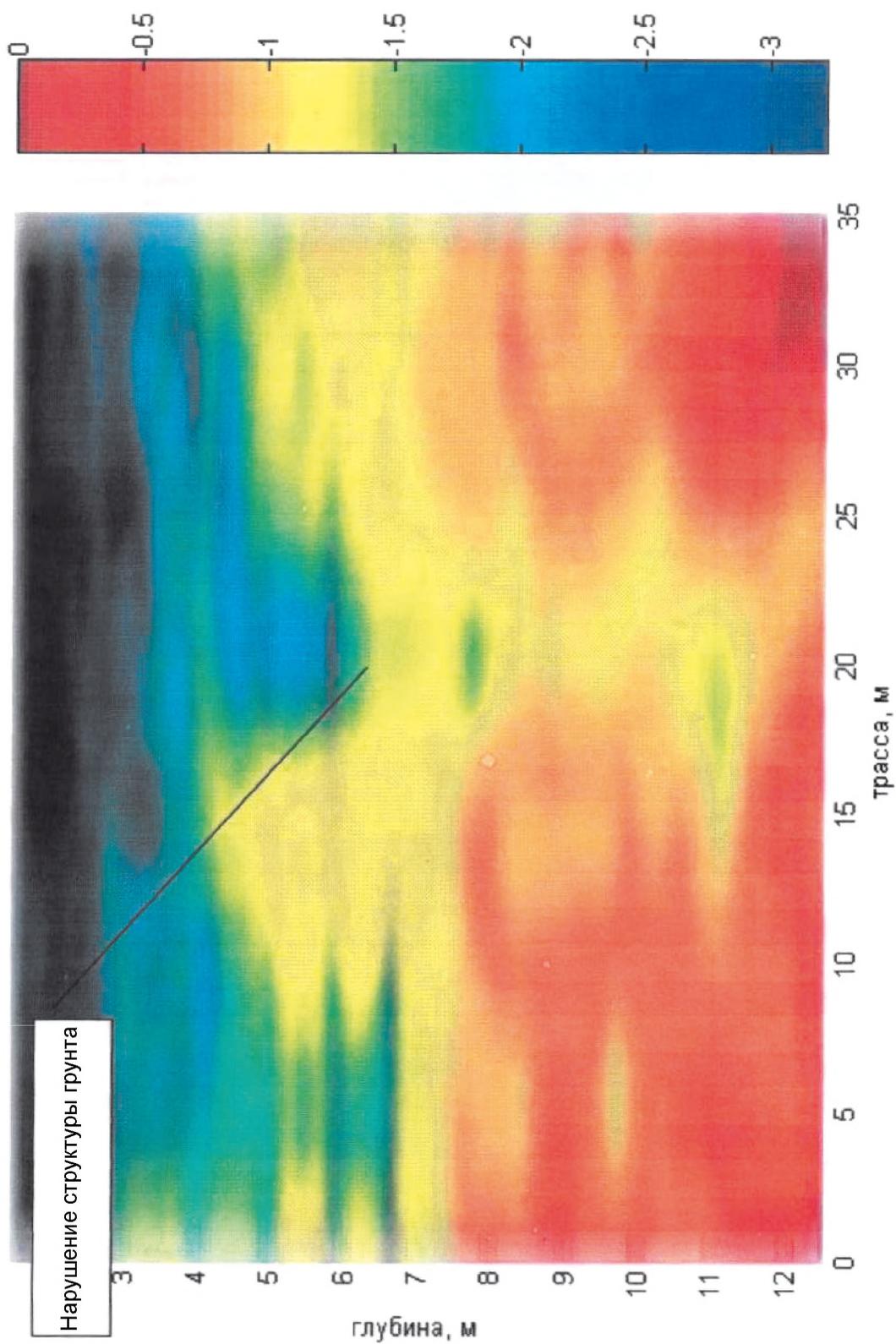


Рис. 8.4.3. Определение зоны расструктурирования грунта

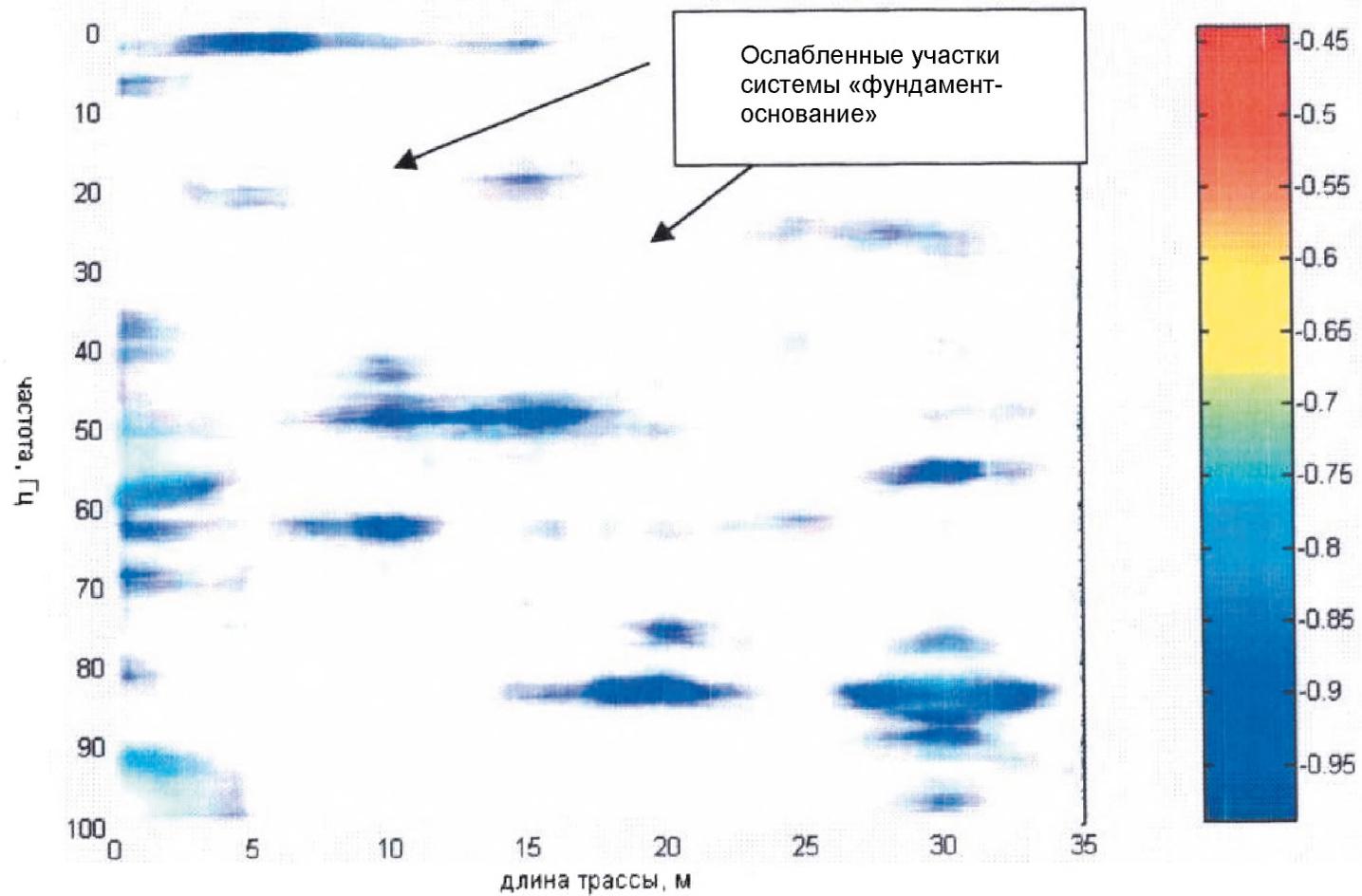


Рис. 8.4.4. Распределение коэффициентов передачи между точками возбуждения и приема системы «грунт-фундамент» по южной стороне здания. Отсутствие низкочастотных резонансов свидетельствует о незначительной деструктуризации грунта под обследуемым зданием.

7.5. Мониторинг канализационного коллектора на ул. Савушкина, кв. 62 при забивке свай строящегося жилого дома.

На ул. Савушкина в кв. 62 при строительстве 12-25 этажного жилого дома в охранной зоне тоннельного канализационного коллектора, расположенного на глубине ~ 40 м, на расстоянии ~ 10 м от его проекции на дневную поверхность производилась забивка дизель молотом составных железобетонных свай длиной 28 м. В целях обеспечения сохранности коллектора от вибровоздействий на его обделку и вмещающие грунты проведен мониторинг. При его проведении измерялись абсолютные уровни вибрации и исследовались спектрально-временные характеристики грунта, спектры дифрагированных волн и фазовая скорость при прохождении в обделке коллектора для оценки его прочностных характеристик. В качестве критерия целостности обделки была принята идентичность (неизменность) полученных характеристик с момента начала забивки свай до её окончания. Источником излучения была свая. Одновременно тем же методом сравнения проверялась сплошность составных свай от начала забивки до проектной глубины. Экспериментально определён собственный характеристический импеданс в целях подтверждения вышеуказанных моделей.

В результате исследований определена модель описания сигналов, проходящих в среде вокруг коллектора и его конструкциях.

Толщу грунта вокруг коллектора можно представить как суперпозицию волноводов с границами: поверхность земли – кровля супеси тугопластичной, поверхность – кровля морены, поверхность – кровля протерозоя, поверхность – обделка коллектора. По длине волноводы ограничены точкой источника возбуждения сигнала – забивная свая и местоположением последнего приёмника антенны. По площади ограничения они соответствуют зоне Френеля. Распространение сигнала в волноводе связано с дисперсией и интерференцией. Частотная характеристика описывается дискретно-сплошным спектром. Дискретности соответствуют модам продольных (в верхней части рэлеевской волны) и поперечных волн. В спектре отражённого сигнала коллектора присутствуют зеркальные, рассеянные и «ползущие» дифрагированные волны, а так же дискретности резонанса конструкции.

На рис. 8.5.1, 8.5.2, 8.5.3. приведен динамический спектр Фурье отражённых и дифрагированных сигналов от коллектора. Измерение фазовой скорости выполнялось по минимуму спектра (белая и чёрная линии). Изменение сейсмических (резонансных) характеристик обделки коллектора до забивки свай и по окончании измерений не установлено, что было использовано в заключении. В администрацию Водоканала выдано заключение о целостности коллектора.

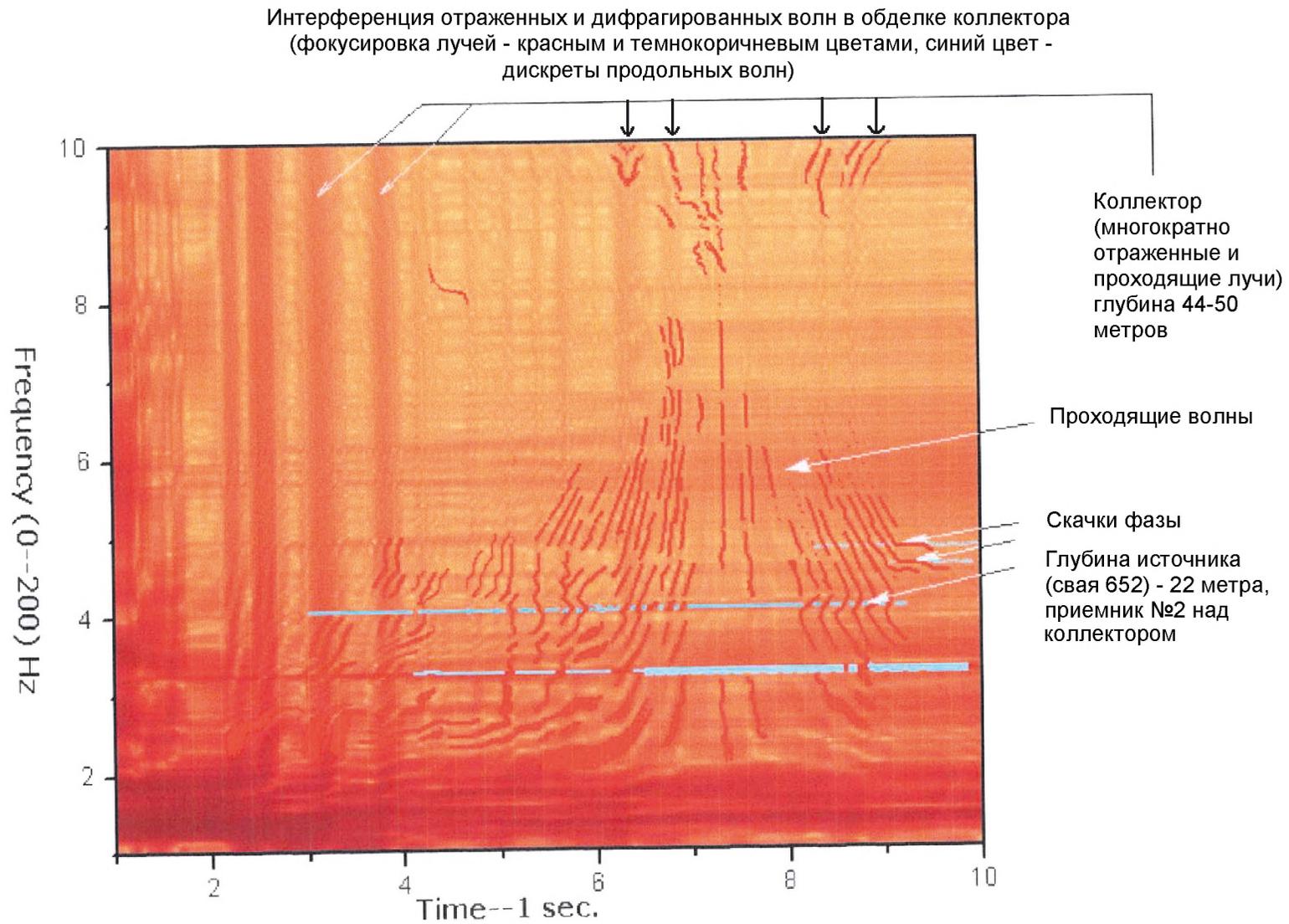


Рис. 8.5.1. Динамический спектр

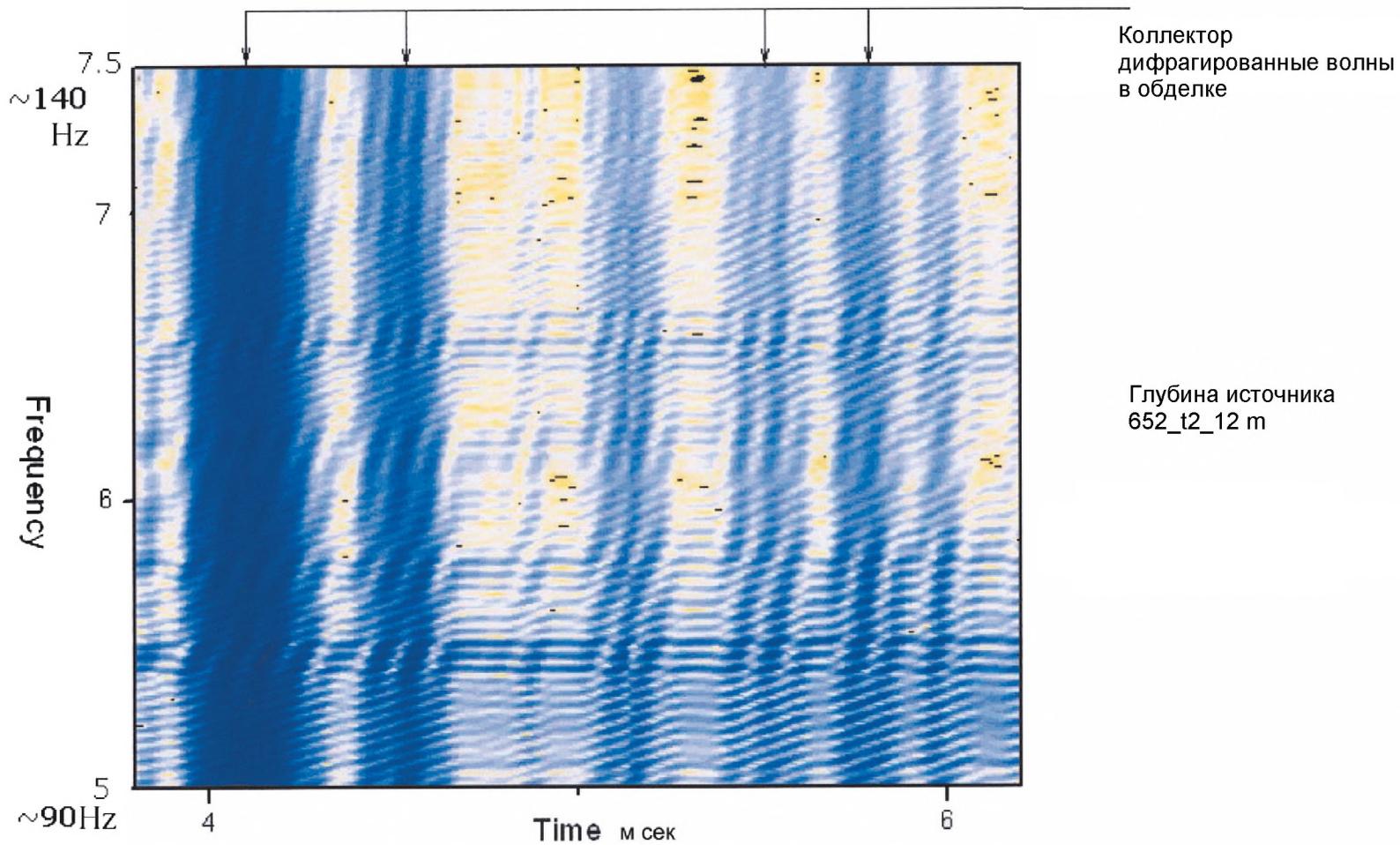


Рис. 8.5.2. Динамические спектры в отраженных от коллектора сигналах

Интерференция отраженных волн в обделке коллектора
(фокусировка лучей - красный цвет)

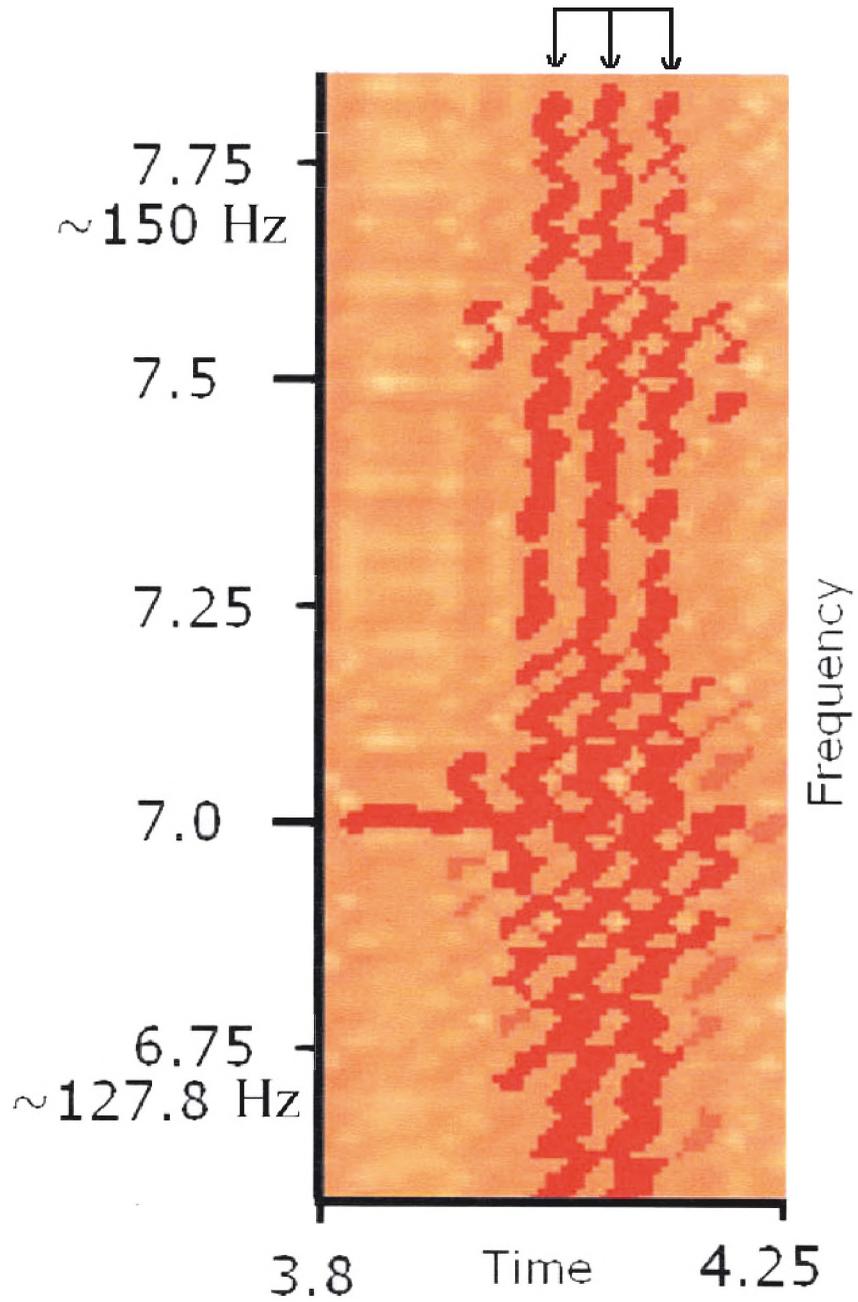


Рис. 8.5.3

7.6. Мониторинг магистрального канализационного коллектора Водоканала по ул. Карбышева при проходке щита метро.

Проходка щита метро при строительстве тоннеля под магистральным коллектором Водоканала на участке «Размыв» в районе шахт 123а и 123б была сопряжена со значительными рисками деформаций этого сооружения из-за возможного расструктурирования грунта основания коллектора. Основными причинами воздействия на состояние коллектора и физические характеристики грунта являлись: перебор грунта при проходке щита метро и вибрационные воздействия от работающих механизмов. Источниками вибраций щита являлись вращающаяся режущая часть и работающие вспомогательные механизмы. По окончании строительства основным фактором является длительное, около 18 часов в сутки, и постоянное динамическое воздействие поездов метро на основания коллектора.

Опыт показывает, что расструктурирование грунта основания коллектора под воздействием указанных факторов может быть медленным и быстрым, в зависимости от соотношения прочностных параметров грунта и числа циклов динамического воздействия.

Наиболее опасным для возникновения деформаций в конструкциях объектов оказываются зна-

копеременные напряжения, вызываемые вибрациями различных источников. Они приводят к накоплению повреждений в конструкциях, появлению квазитрещин, микропустот, уплотнению и разуплотнению грунта. В большинстве случаев разрушение (повреждение) объектов связано с возникновением резонансных явлений. В сложных системах, таких как «грунт основания-кольца (тюбинги)» коллектора, конструкции шахты, обладающих широким спектром частот собственных колебаний, возможно одновременное возбуждение нескольких резонансных режимов при воздействии полигармонического возмущения. Характерным видом разрушения системы «основание-грунт» под воздействием вибраций является усталость грунта. Усталость грунта представляет собой результат накопления малых повреждений (деформаций) при большом числе циклов переменного напряжения. Параметры кривой усталости, линейный и нелинейный участки позволяют сделать суждение о целостности или разрушении сооружения в целом.

В то же время известно, что физико-механические свойства грунта можно описать и сопоставить при помощи его сейсмических харак-

Измерительная информация, признаки разуплотнения грунта и деформации коллектора, пороги опасности ситуации.

Таблица 1.

Источники измерительной информации	Виды измерений (признаки), единицы	Количественные значения признаков, пороги (критерии)		Степень воздействия вибрации поездов на разуплотнение грунта основания коллектора (и как следствие деформацию коллектора и шахт), опасность ситуации
		Фактические значения	Пороги (критерии)	
Комплексная система 1. геодезический мониторинг	Осадки шахт коллектора и близлежащих зданий по геодезическим наблюдениям	Шахта 123а – 11 мм Ин-т Торговли – 12 мм НПО «Аврора» – 8 мм	4,5 см	Предельная осадка коллектора, по которой возможно разрушение. Опасная ситуация
	Скорость изменения осадок 1 мм / месяц	1 мм / месяц	1 см / сутки	Критическая скорость нарастания осадок коллектора, которая может привести к разрушению. Опасная ситуация.
2. Изменение уровней вибрации	Уровень вибрации в диапазоне 0 – 100 Гц, ускорение м / сек ² (среднеквадратическое значение)	0,02 -0,03 м / сек ²	0,4 – 0,65 м / сек ²	Вероятны осадки грунта основания коллектора. Опасная ситуация.
3. Изменение релаксационных свойств грунта	Качественная оценка разуплотнения грунта основания.	Есть	Есть изменения по признакам	Разуплотнение грунта. Потенциально опасная ситуация.
4. Изменение прочности конструкции (разрывы сплошности, дефекты)	Наличие дефектов в обделке коллектора	Нет	Есть дефекты, нет дефектов	Опасная ситуация при наличии дефектов
	Наличие дефектов в шахтах коллектора	Есть		

*Решающие правила по совокупности групп (сочетаний) признаков
для принятия превентивных мер защиты коллектора.*

Таблица 2.

Фактические значения измеряемых признаков	Опасность ситуации	Рекомендуемые решения по превентивным мерам
I. Если нарушен один из критериев или обнаружен признак: 1) Общая осадка шахты коллектора $\geq 2 - 2,5$ см; 2) Скорость осадок $0,25$ см / сутки 3) Резкие изменения уровня вибрации на частотах $5 - 10$ Гц, $50 - 60$ Гц, большая разность затухания сигнала при скорости движения поездов $60 - 70$ км / ч ; 4) Обнаружен дефект в шахте, обделке коллектора	Опасная ситуация	Снизить скорость движения поездов до 30 км/ч на перегоне м. Лесная – м. Площадь Мужества
II. Если соблюдаются условия: 1) Осадки шахты коллектора ≤ 2 см; 2) Уровни вибраций менее $0,07 - 0,1$ м / сек ²	Неопасная ситуация	
III. Если превышает один из критериев: 1) Осадки здания Института торговли и НПО «Аврора» > 2 см; 2) Наблюдаются резкие изменения уровней вибраций при установленной скорости движения поездов $60 - 70$ км / ч ; 3) Обнаружен дефект в шахте, обделке коллектора; 4) Наблюдается расструктуривание грунта, снижение прочности грунта на 10% за обделкой тоннеля метро	Потенциально опасная ситуация	Необходима корректировка критериев в сторону уменьшения (по осадкам и уровням вибраций)

теристик. По аналогии при помощи сейсмических характеристик можно создать эталон – «условную кривую усталости» грунта при циклическом внешнем воздействии во времени.

По данным этой кривой можно оценить накопление деформации, возможные осадки сооружений и прогнозировать опасное развитие событий заранее до получения прямых критических значений осадок традиционными методами.

Предварительно экспертным путём были составлены правила принятия решений (см. таб. 1, 2) при наличии опасностей для коллектора. Правила были утверждены Штабом города по предотвращению возможной аварии коллектора.

Предварительно до начала проходки щита внутри тоннеля был измерен «звуковой портрет» - эталон вибраций проходческого щита метростроя (рис.8.6.1.). Схема измерений на рис 8.6.1.а.

На первом этапе выполнения мониторинга (проходка щита метростроя под коллектором) измерялись уровни вибраций грунта основания коллектора в скважине на глубине 15 метров на дискретных составляющих спектра

(рис. 8.6.2, 8.6.3), осадки шахты $123а$ и расструктуривание (податливость) грунта. Величины уровней вибрации щита проходки приведены на рис. 8.6.4. Динамика развития осадок шахты показана на графике рис.8.6.5., а податливость грунта - на рис. 8.6.6.

Как видно из них, осадки шахты $123а$ за время проходки щита под коллектором составили 5 мм, уровни вибрации – $0,02-0,08$ м/с². Коэффициент затухания в грунте, обусловленный перебором (дисбалансом) грунта при проходке щита и интенсивностью вибрации, составил 10 дБ в области час-

тот $20-100$ Гц. Это видно на рис.8.6.6. Анализ полученных данных показал, что осадка шахты ниже нормы, уровни вибрации ниже нормы, но близки к верхним допустимым значениям. В результате было принято решение о продолжении мониторинга при эксплуатации тоннелей метро. На втором этапе мониторинга при эксплуатации тоннелей метро, так же проводились систематические измерения осадок шахт $123а$ и $123б$, уровень вибрационных воздействий на коллектор и оценка степени расструктуривания грунта от этих воздействий.

Вейвлет-спектры отражённых сигналов от коллектора (искусственный источник) показали: выделены продольные, поперечные и дифрагированные волны в обделке коллектора, обнаружены резонансные частоты от 45 до 150 Гц. Сопоставление их с расчётными частотами показало удовлетворительную сходимость. Дифрагированным волнам соответствует спектральная плотность в виде концентрических окружностей (чередование максимумов и минимумов). Изменения параметров дифрагированных волн за период наблюдений не было обнаружено. Что касается грунта основания, то на участке $10-15$ м от шахты $123а$ и у торца здания НПО «Аврора» обнаружены ослабленные зоны в грунте, которые приведены на рис.8.6.8. Комплексные результаты измерений показаны на рис.8.6.4. (повышение уровня обусловлено повышением скорости движения поездов до 70 км/час). Уровни вибраций от поездов метро $0,02-0,08$ м/с² и действуют в течение 18 часов в сутки. Сравнение их с требованиями ВСН-490-87 и ТСН 50-302-2004 СПб. показывает, что они ниже нормы, но близки к опасным значениям. Сопоставление этих значений с уровнями вибраций, при которых по данным

проф. Н. Маслова происходит разуплотнение грунта, позволяет сделать вывод, что при этих вибро-воздействиях продолжается расструктурирование грунта основания коллектора. Осадки шахты 123а с начала движения поездов метро составили 1 см. Осадки вблизи расположенных зданий продолжают со скоростью 1 мм/месяц, что превышает вековую ползучесть грунта в г. С. Петербурге.

В результате комплексного анализа этих видов информации было сделано заключение:

а) дефектов в обделке коллектора не обнаружено;
б) обнаружены слабые места в основании коллектора;

в) разуплотнение грунта основания коллектора под воздействием длительной вибрации продолжается, что подтверждается данными геодезических измерений осадочных марок.

По результатам работ выданы рекомендации администрации ГУП «Правобережный Водоканал» о продолжении мониторинга.

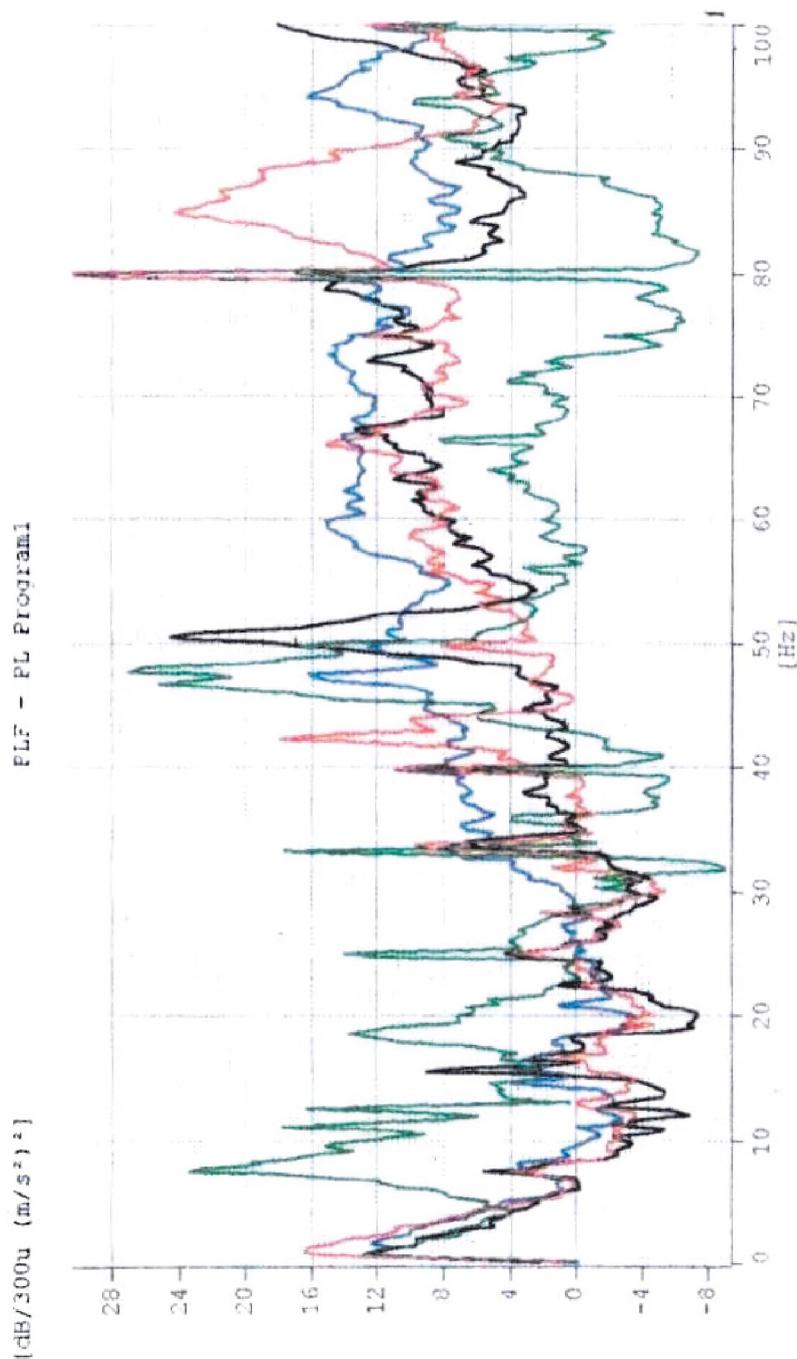


Рис. 8.6.1. Изменение спектра вибрации станины проходческого щита в течение двух часов работы

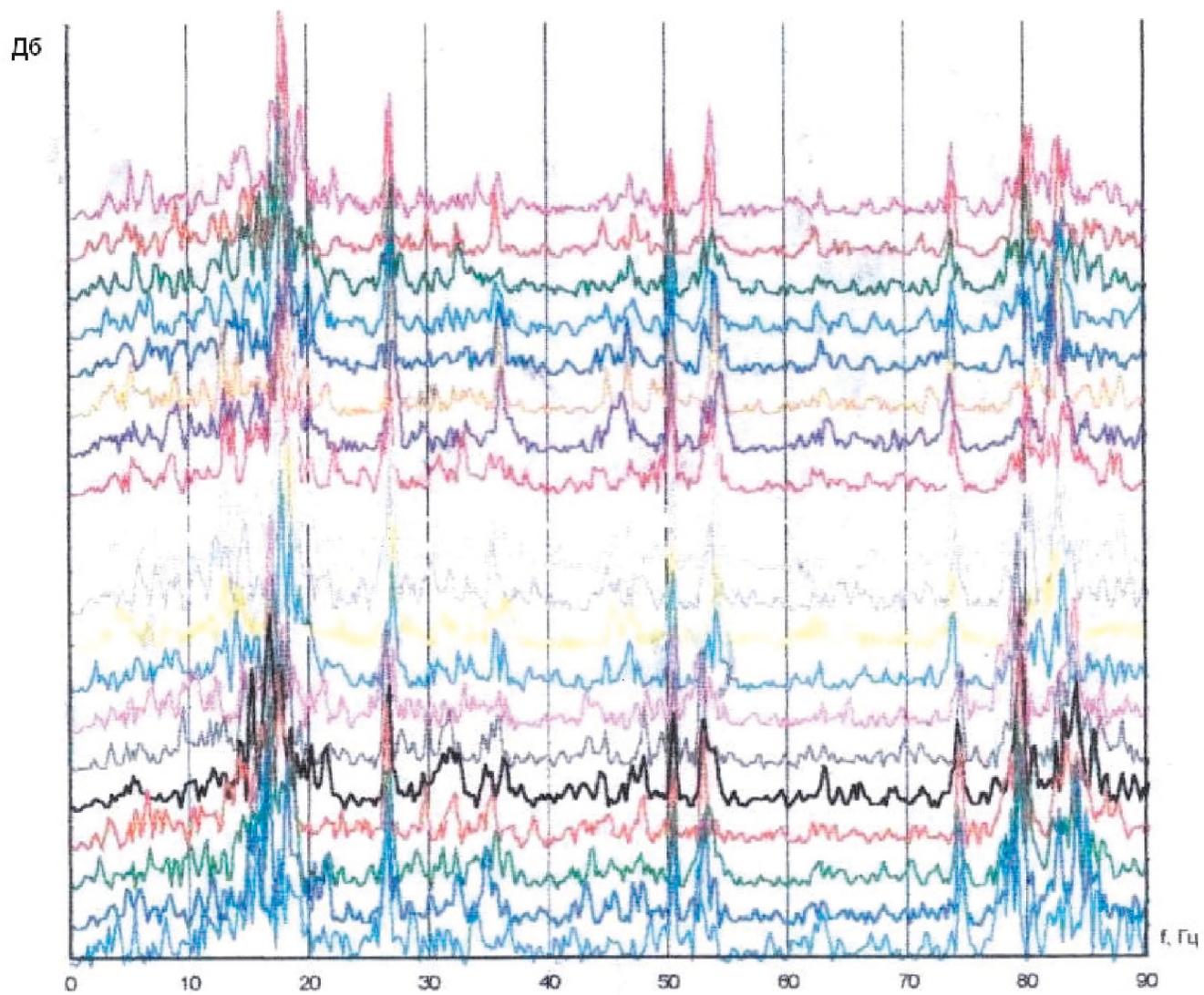


Рис. 8.6.2. Узкополосные мгновенные спектры вибрации грунта, измеренные 27.11 в скважине

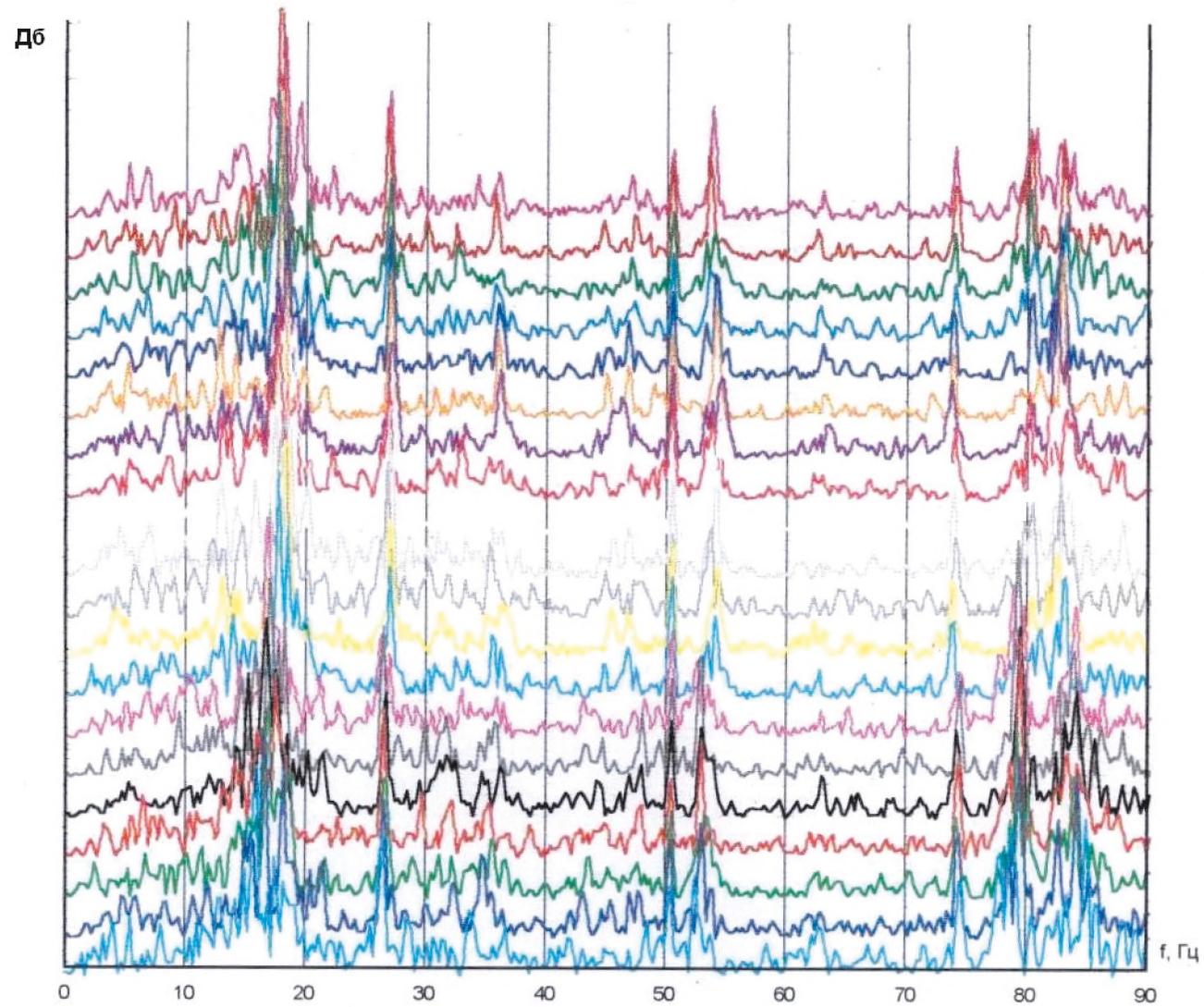


Рис. 8.6.3. Узкополосные мгновенные спектры вибрации грунта, измеренные 29.11 в скважине

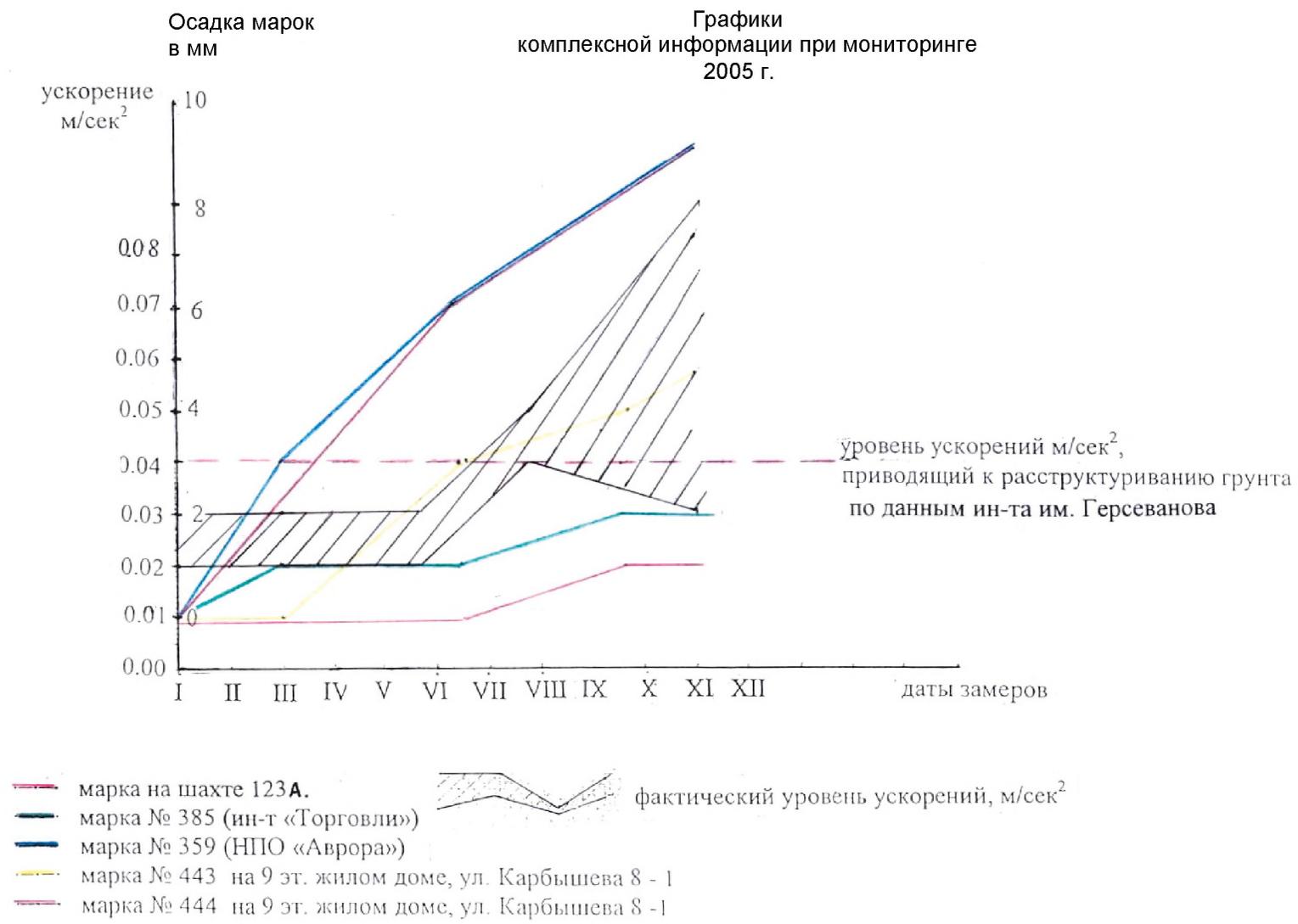


Рис. 8.6.4

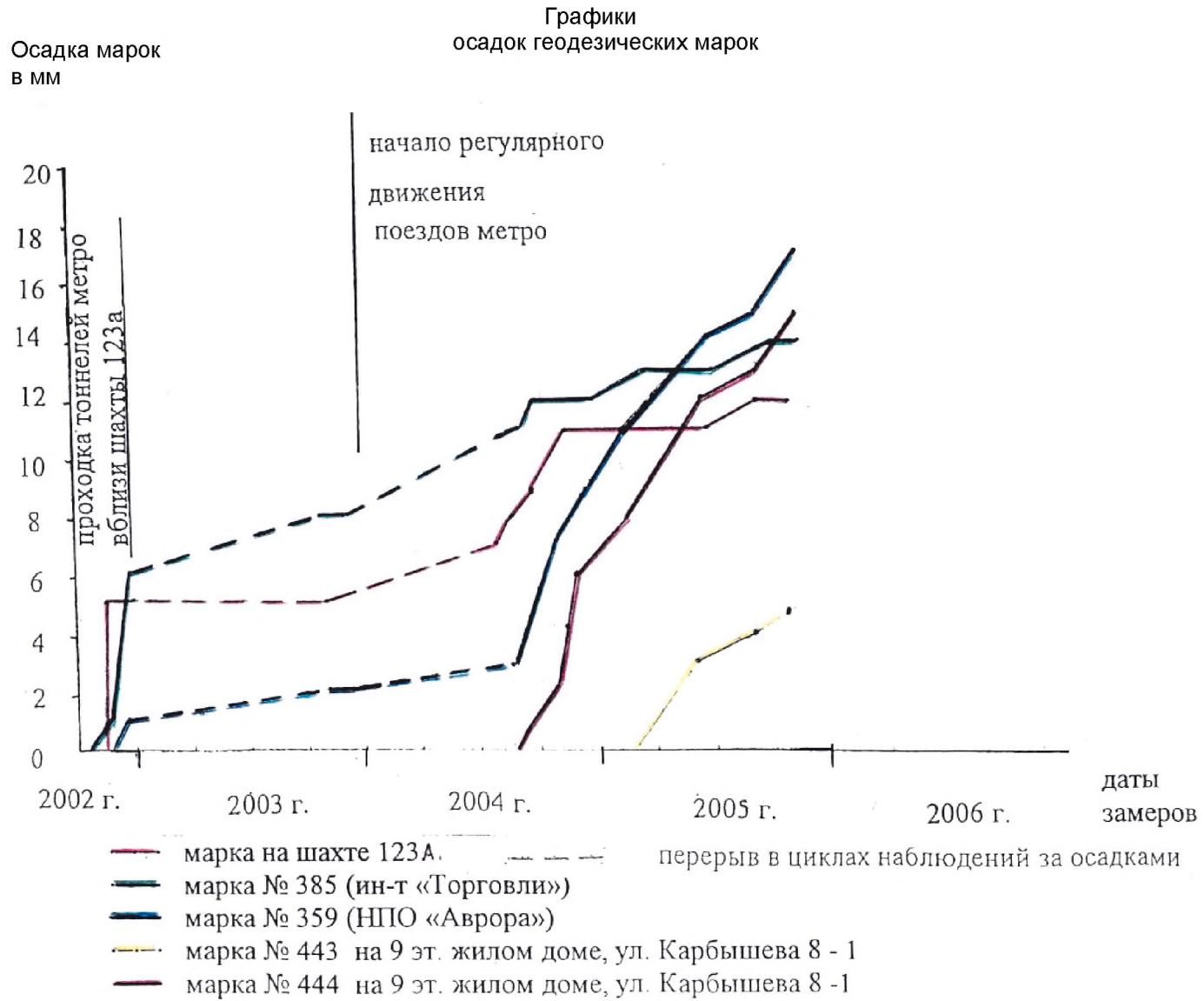


Рис. 8.6.5

Изменение амплитуды сигнала от вибраций проходческого щита
под коллектором Водоканала

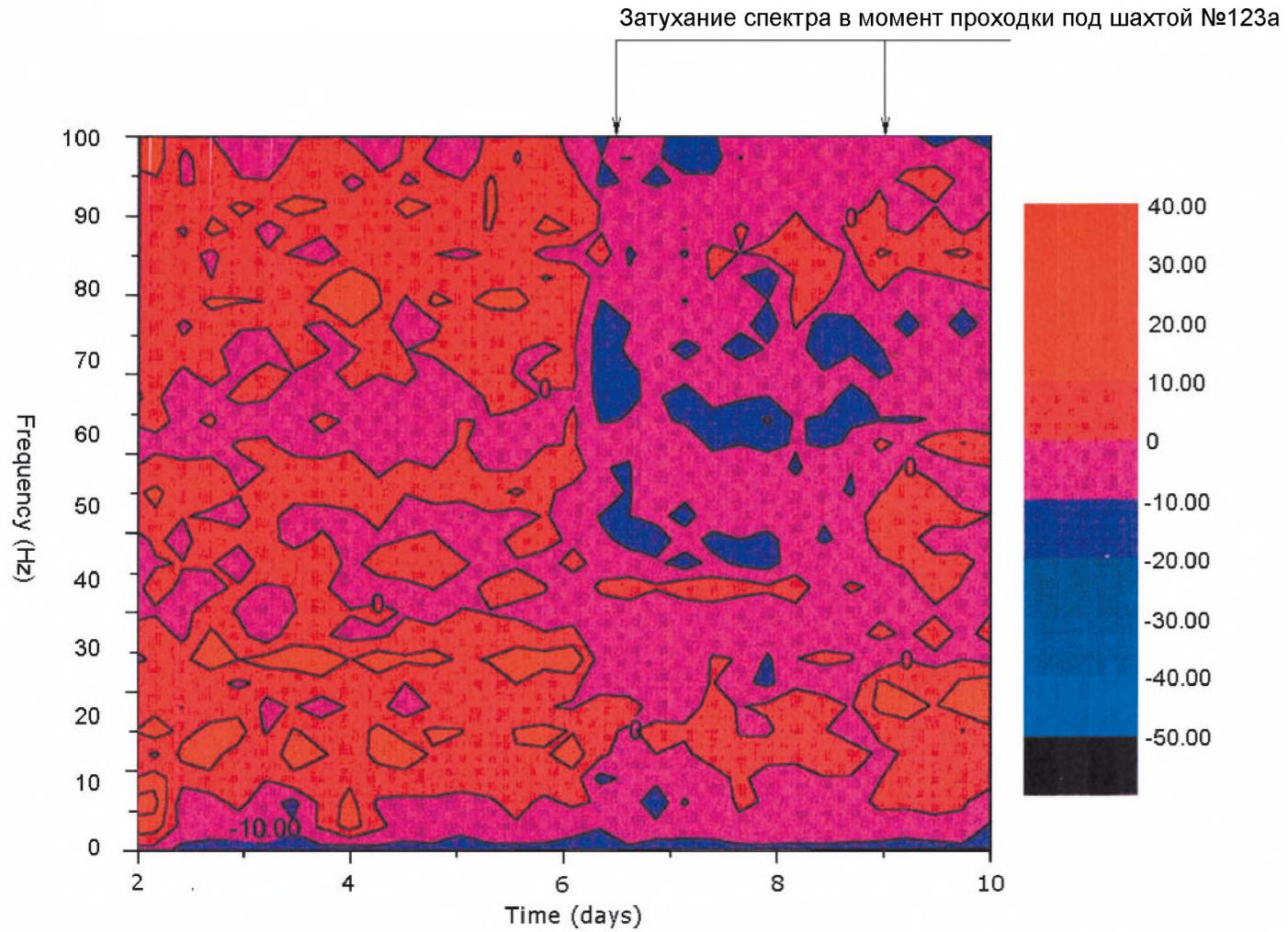


Рис. 8.6.6

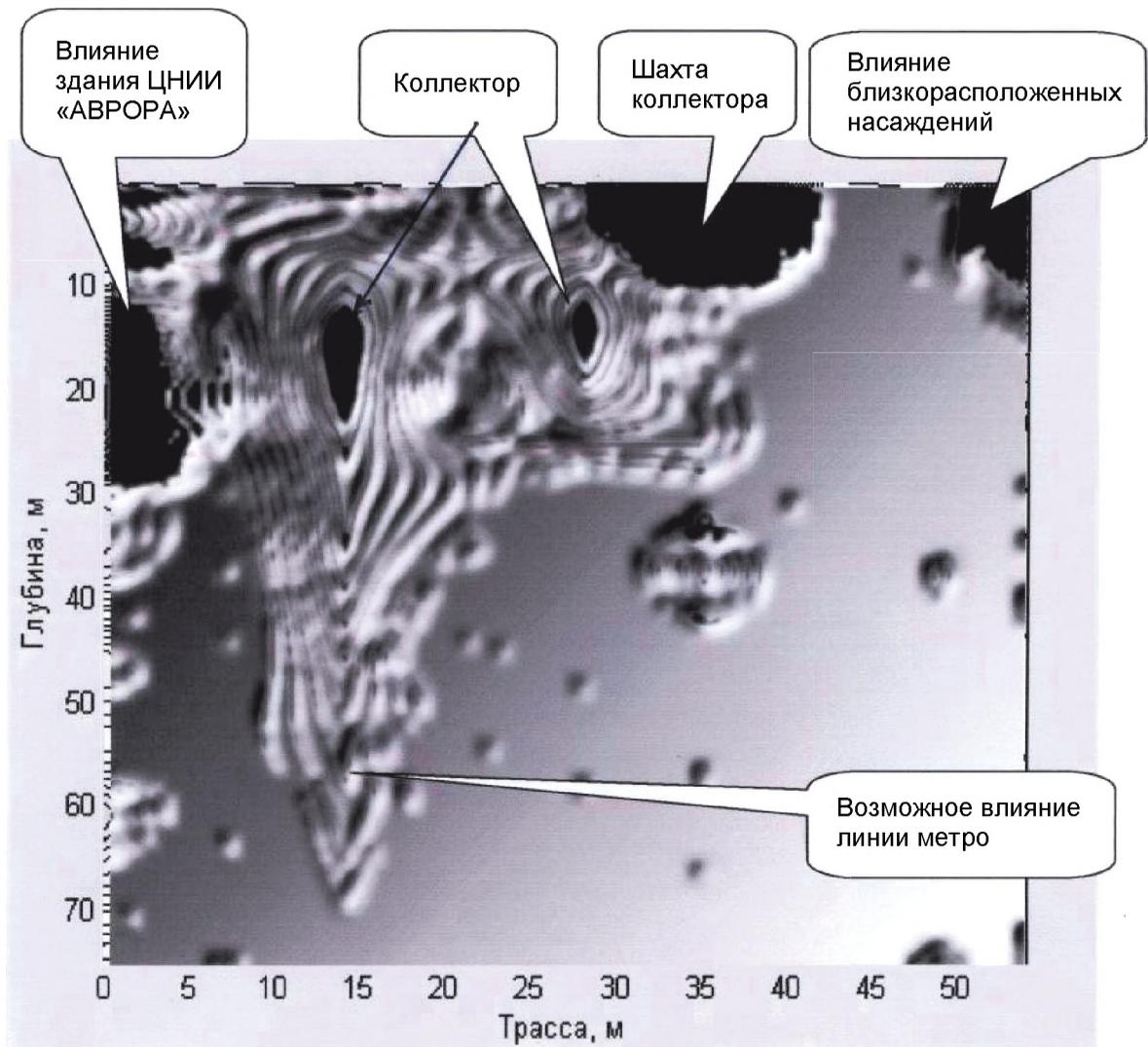


Рис. 8.6.8
Возможная интерпретация элементов реконструкции структуры грунта
(ул. Карбышева, 17 ноября 2005 г.)

7.7. Выявление причин аварийной ситуации растительных камер («бочек») солодовенного завода в Усть-Славянке при забивке свай.

Обследован корпус солодовенного завода, состоящий из 6 солодовенно-растительных камер («бочек»). Фундамент – кольцевой ростверк и сваи длиной 12 метров. При забивке свай для стоящего рядом корпуса на расстоянии 3 м от края ростверка, на всех «бочках» появились многочисленные тонкие трещины (по высоте до 2 м от дна «бочки») в местах узлов сопряжения ростверка с головками свай. При этом одной из организаций, по схеме согласно требований норм ВСН-490-87, в точке ростверка, ближайшей от места забивки свай, проводился замер уровней вибрации. Зафиксированные уровни не превышали требований норм. Однако, в результате работ, появились трещины в стенках как ближайших от места забивки свай, так и в крайних «бочках».

Для выявления причин этих дефектов с помощью искусственных источников возбуждения колебаний была проведена томография грунта под ростверком и измерены резонансные характеристики узлов заделки головок свай в ростверк. Результаты томографии приведены на рис.8.7.1, 8.7.2. Спектральный анализ сигналов показал, что спад энергии сигнала происходит по цилиндрическому закону. На отдельных участках наблюдаются регулярные всплески амплитуд сигналов, превышающие спад по экспоненте на несколько дБ. Частоты собственных резонансов узлов конструкции стен «бочек» находятся в диапазоне 2-10 Гц. Эти частоты совпадают с резонансными частотами из-

лучения свай при их забивке. Наибольшее динамическое воздействие на конструкции оказывают сдвиговые волны. Они выявлены вейвлет-анализом. Спектры сигнала в точках сопряжения головок свай с ростверком не идентичны, что свидетельствует о разной соколеблющейся массе грунта у тела свай. Томография показала следующее: а) на всей площади в основании ростверка до глубины 20 м наблюдаются ослабленные зоны в виде горизонтальных полос шириной ~ 15 м и длиной до 80 м, направленные в сторону реки Невы, чередующиеся с плотными участками грунта; б) динамические модули деформации грунтов в ослабленных зонах до 4-х раз меньше, чем на плотных участках. Чередование этих зон, по-видимому, может быть объяснено наличием в пределах участка строительства палеорусел, впадающих в реку. В результате было сделано следующее заключение.

При волноводном распространении энергии существуют зоны каустик и конвергенции, возникающие на расстояниях значительно больших, чем кратчайшее от места возбуждения вибраций. Амплитуды колебаний в этих местах могут достигать больших значений, чем измеренные в ближайшей точке, особенно в случае совпадения резонансных частот. В наиболее жестких узлах системы «свая-грунт» произошли указанные дефекты. Рекомендовано заказчику при дальнейшем производстве работ использовать буронабивные сваи.

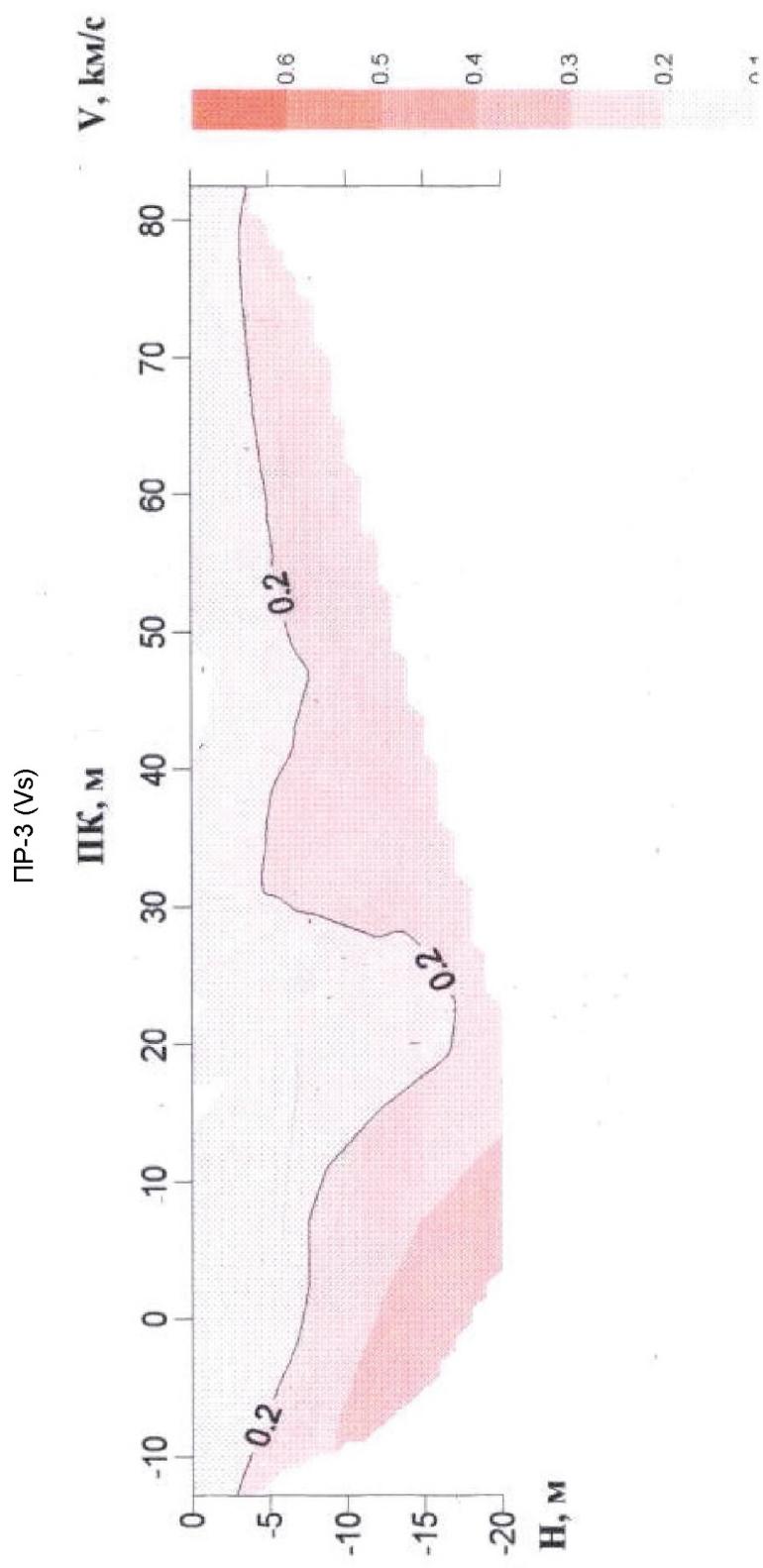


Рис. 8.7.2
Скорость поперечных волн

7.8. Обследования здания Синода.

Обследование грунта и подземных коммуникаций во внутреннем дворе Синода проводилось с целью определения ослабленных зон, протечек канализации, теплосетей и выявления неизвестных (заброшенных). На рис. 8.8.1; 8.8.2; 8.8.3. приведены схема измерений, динамические спектры Фурье и вейвлет-спектры. Черным цветом обозначены как известные коммуникации, так и отсутствующие на чертежах. Резкое изменение фазовой скоро-

сти в вейвлет спектре соответствует наличие инженерных сетей. По трассам существенного нарушения грунта не обнаружено. Исключение составляет участок по оси 4Г до теплоцентра, где грунт ослаблен. Это подтверждается наличием вертикальной трещины в стене над теплоцентром. Обнаруженные инженерные сети не имеют протечек. Результаты проведенных работ были использованы при оценке геотехнической ситуации.

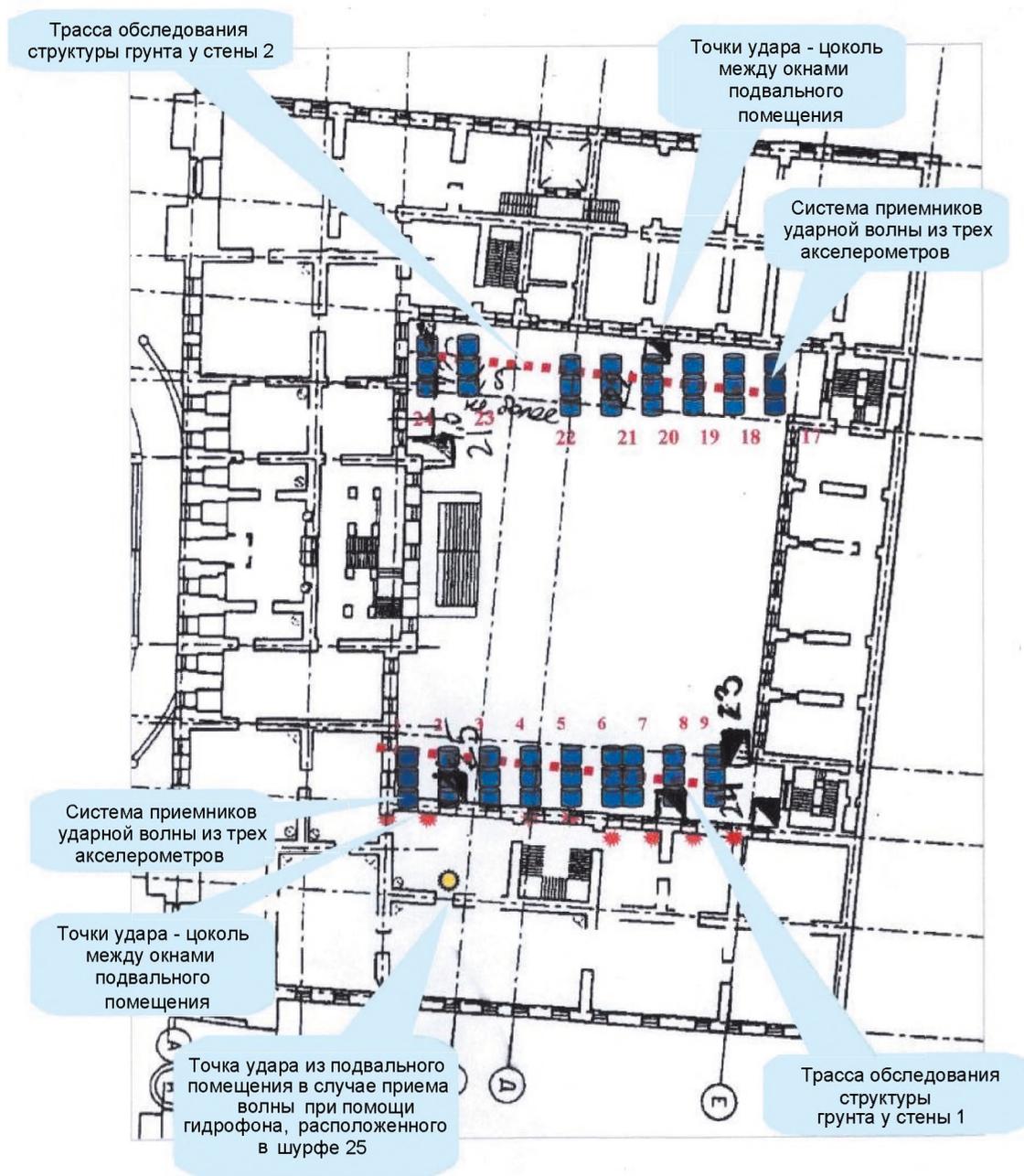


Рис. 8.8.1

Схема размещения измерительных точек при виброакустическом обследовании структуры грунта вблизи фундамента здания синада

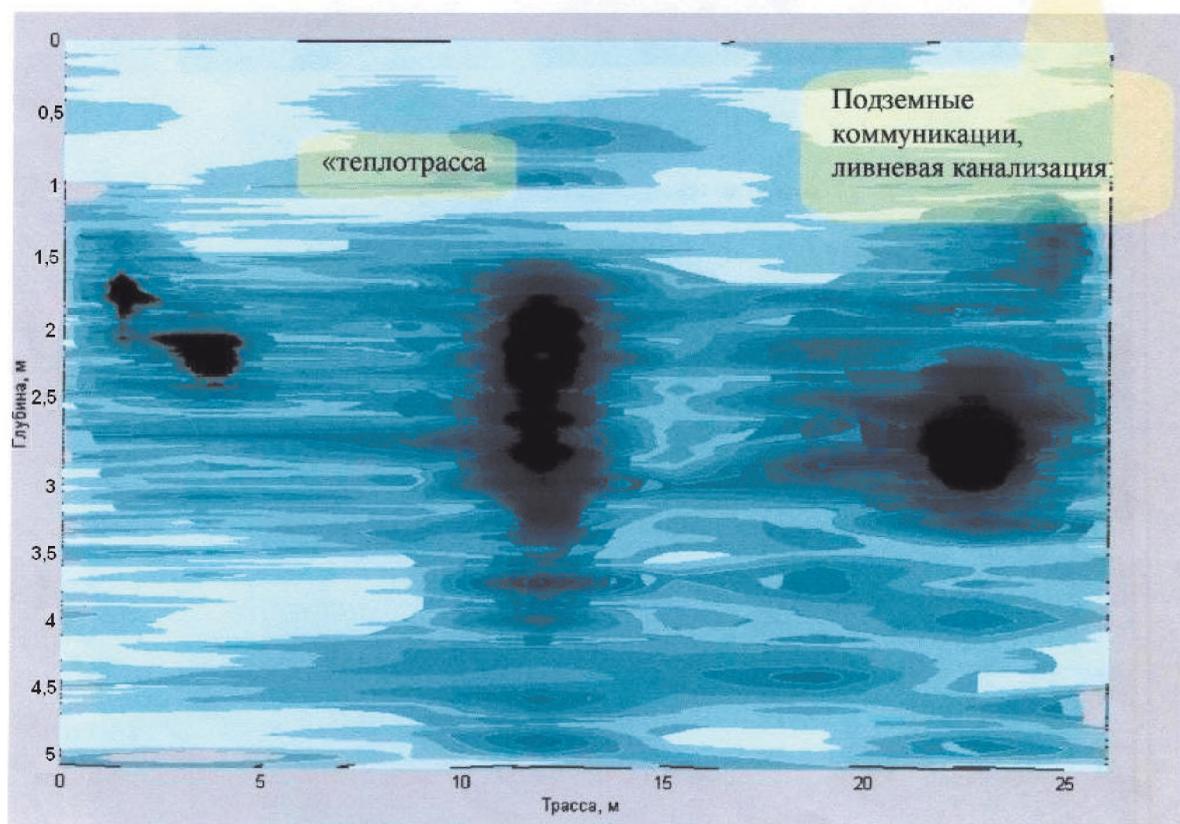


Рис. 8.8.2
Структура грунта в окрестности стены 1 здания синода
Акустическая жесткость (пористость, плотность)

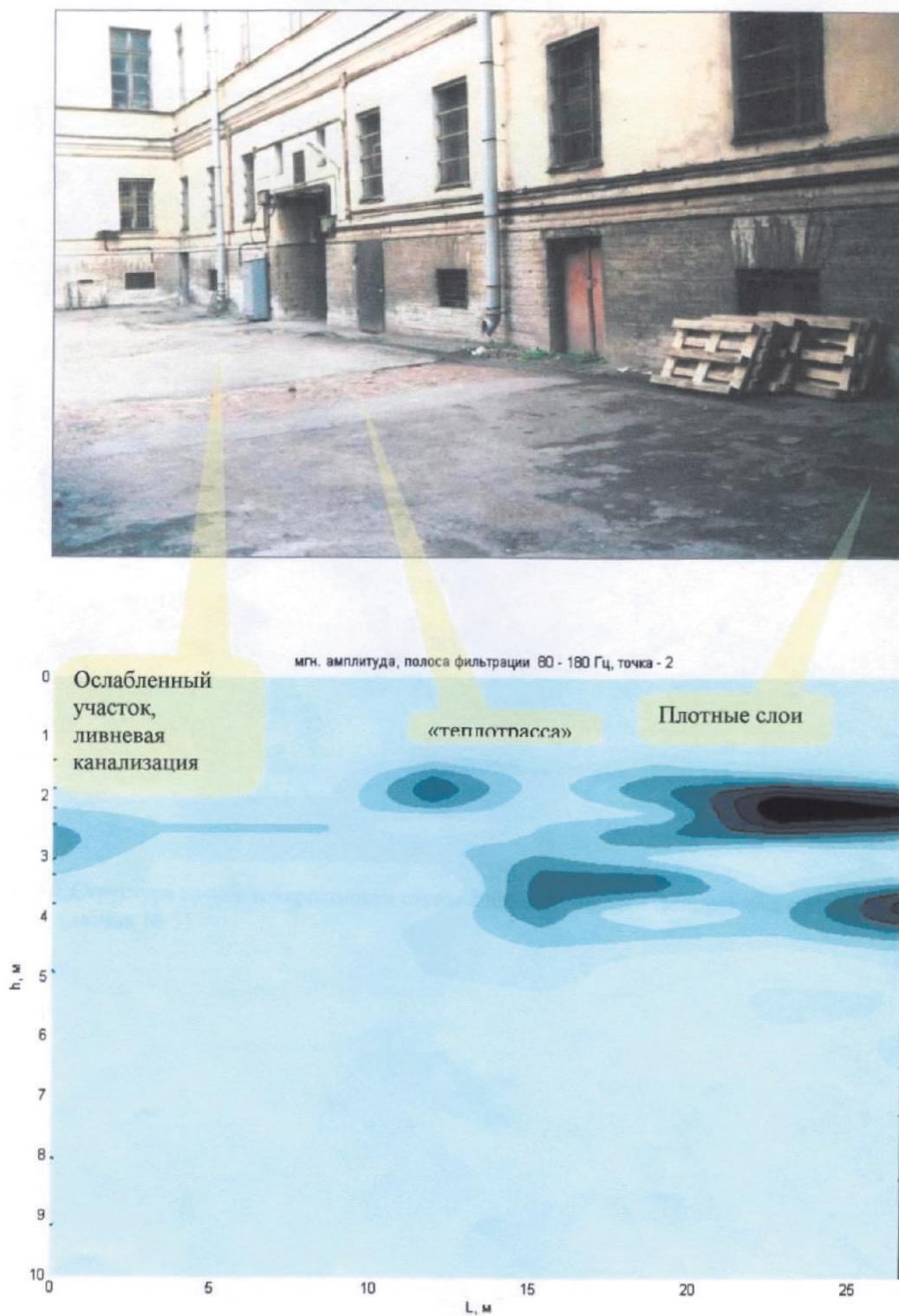


Рис. 8.8.3

Структура грунта в окрестности стены 2 здания синода после фильтрации отклика датчика 2 в полосе частот 80-180 Гц

7.9. Исследования причин аварии высоковольтного маслонаполненного кабеля на набережной Обводного канала у Ново-Каменного моста.

В процессе строительных работ по устройству набережной Обводного канала между Предтеченским и Ново-Каменным мостами были обнаружены существенные (до 1 м) осадки кабеля по отношению к положению, зафиксированному ранее. Для выяснения возможных причин возникновения аварийной ситуации были проведены измерения уровней вибрации.

Методика натурного моделирования возникновения аварийной ситуации состояла в следующем. На глубине заложения кабеля проводились статистические измерения уровней вибрации от автомобильного транспорта в связи с тем, что на период строительства маршруты его движения были перенесены и длительное время находились на расстоянии не более 0,5 м от кабельной трассы. Замерены уровни вибрации в грунте от погружения шпунта при устройстве подпорной стенки. Измерения проводились в нескольких точках по трассе кабеля в различные периоды времени. Одновременно были выполнены расчёты уровней воздействия вибраций на грунты основания кабеля.

Коэффициент передачи энергии определялись при возбуждении колебаний с помощью искусственного источника – измерительного молотка. Далее полученные данные с помощью цифрового анализатора 3348 подвергались спектральному анализу в диапазоне частот 1-200 Гц, с разрешающей способностью 0,1 Гц.

Расчётная оценка уровней вибраций у основания кабеля для продольных и поперечных волн производилась по формулам

$$L(\text{транспорт, шпунт}) = q(\text{транспорта, шпунта}) + k,$$

где q – уровень вибрации на расстоянии 0,5 м от источника возбуждения, k – коэффициент передачи, зависящий от расстояния от источника возбуждения до измеряемого объекта, дБ. Общий уровень вибрации (ускорение) определялся путём суммирования энергетических спектральных составляющих сигнала.

На рис. 8.9.1 приведены спектральные составляющие коэффициентов передачи уровней вибраций в дБ. На рис. 8.9.2, 8.9.3, 8.9.4 приведены уровни вибраций на грунте от движущегося транспорта и места погружения шпунта на расстоянии 0,5 и 5 м соответственно. Как видно из них резонансные частоты грунта, транспорта и забиваемого шпунта близки по значениям, что свидетельствует о больших коэффициентах динамичности.

На рис.8.9.5, 8.9.6. приведены общие уровни вибраций в полосе 1-100 Гц (ускорение м/сек²) для вертикального и горизонтального направлений. Уровни вибраций грунта у основания кабеля от забивки шпунта в 4-10 превышают нормы ВСН-490-87.

Причины оседания основания высоковольтного кабеля: а) длительное воздействие вибраций от движущегося в непосредственной близости от кабеля транспорта, которое могло привести к расжижению и уплотнению рыхлых водонасыщенных песков в основании кабеля; б) вибровоздействие от погружения шпунта с большими коэффициентами динамичности на частотах собственных резонансов системы «грунт-кабель». Заключение было использовано институтом «Ленинжпроект».

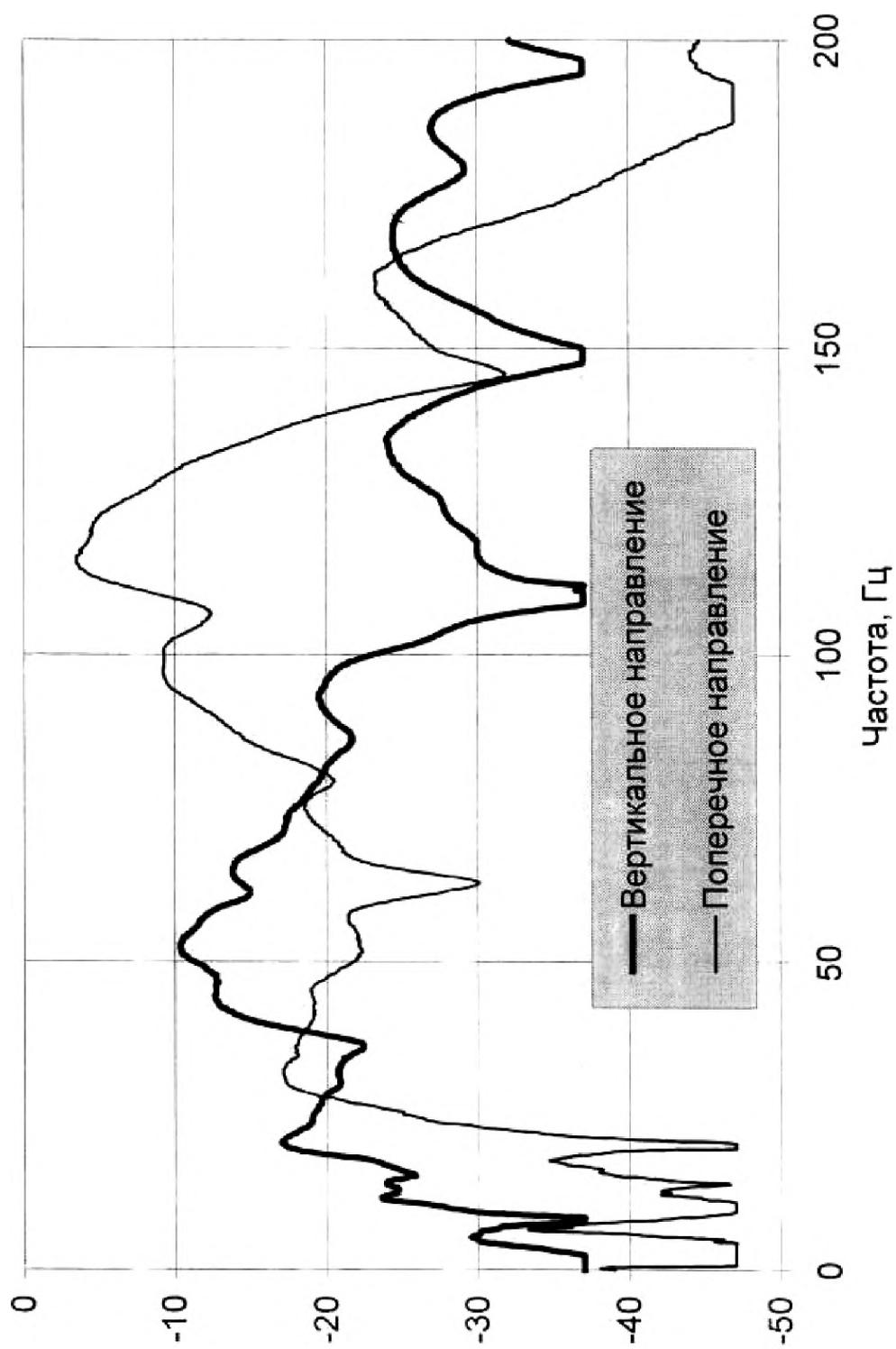


Рис. 8.9.1

Спектральные составляющие коэффициентов передачи уровней вибрации, дБ

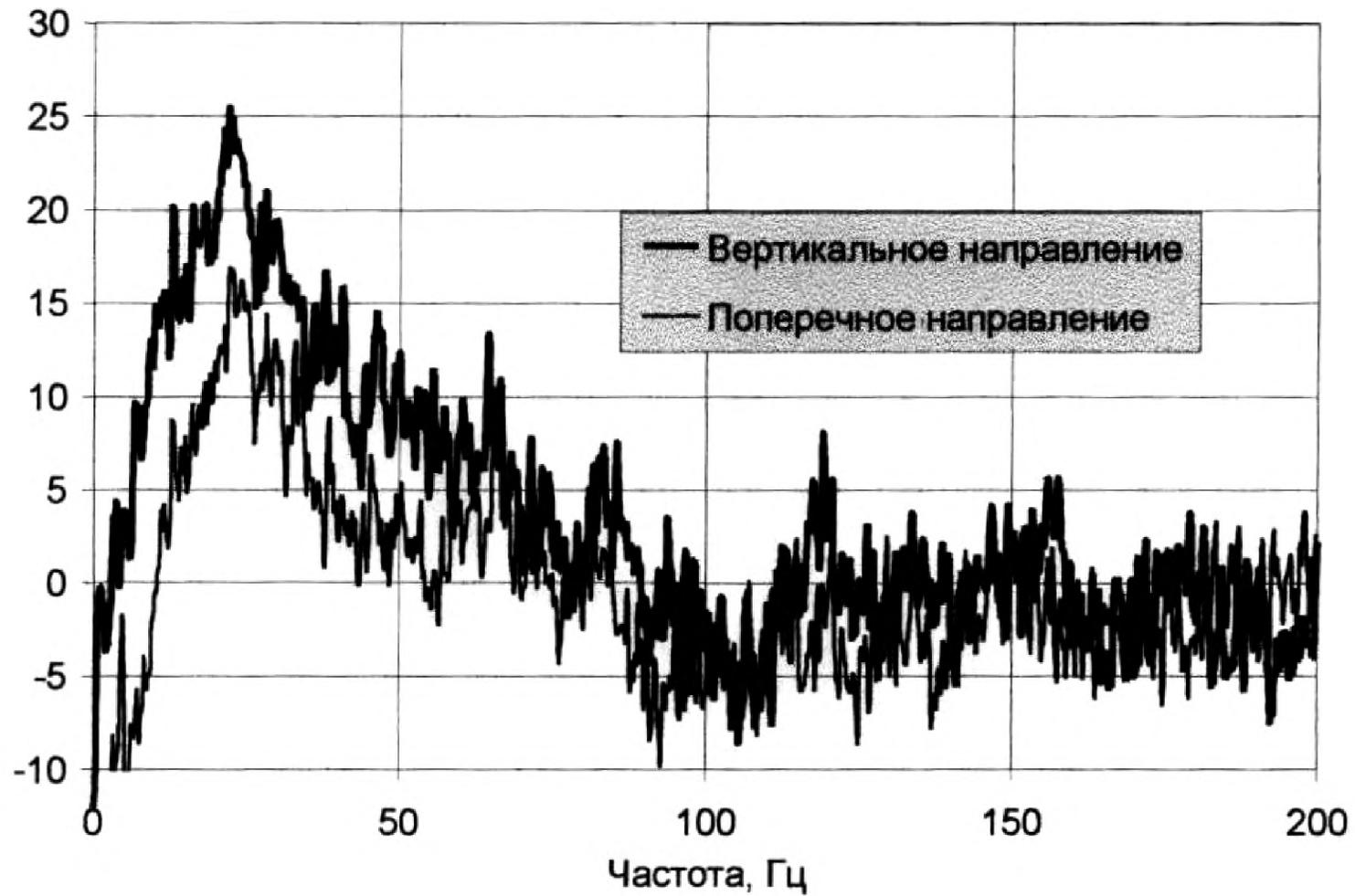


Рис. 8.9.2
Спектральные составляющие уровней вибрации, возникающей при движении транспорта, дБ

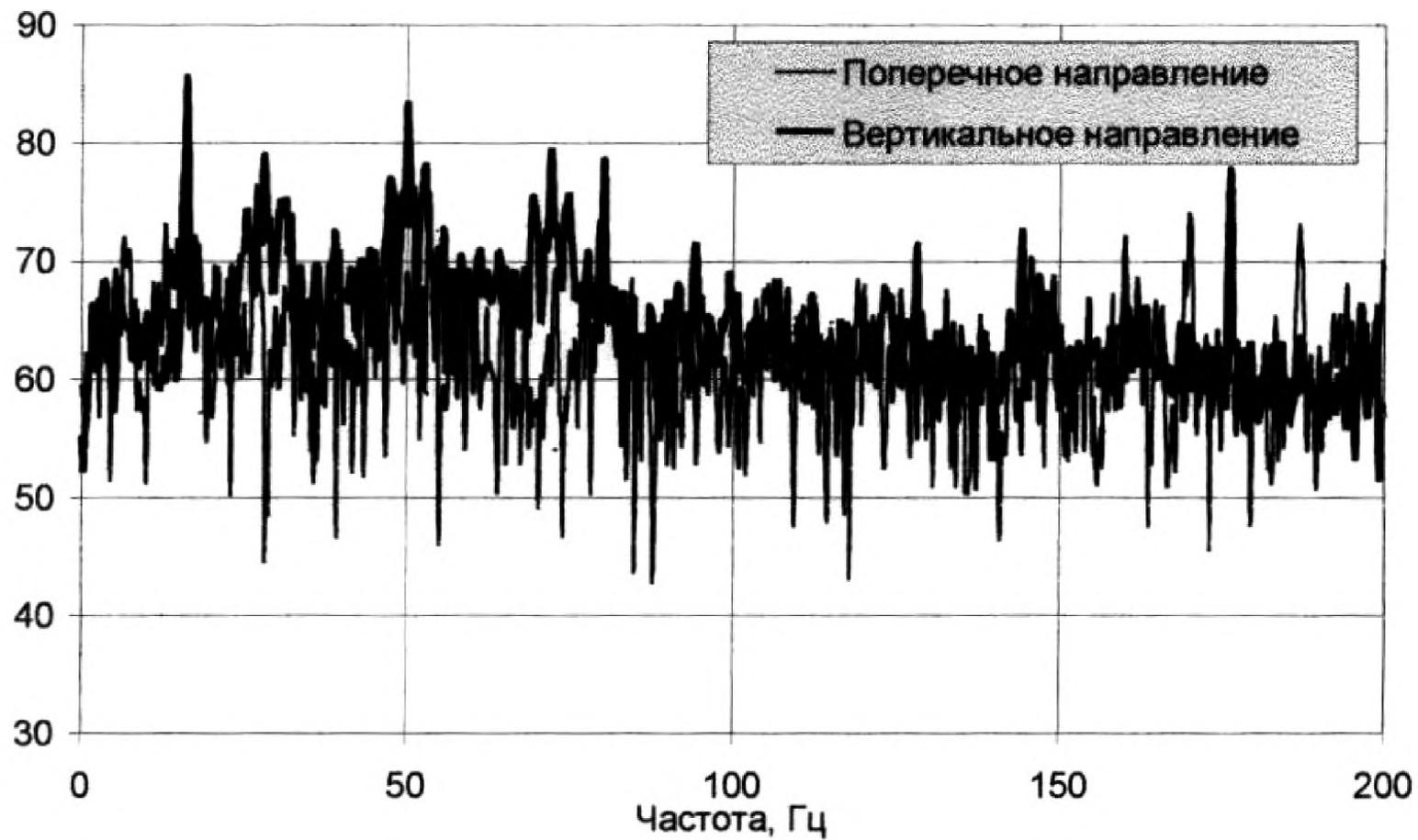


Рис. 8.9.3

Спектральные составляющие уровней вибрации при вибропогружении шунта на расстоянии 0,4-0,6 м, дБ

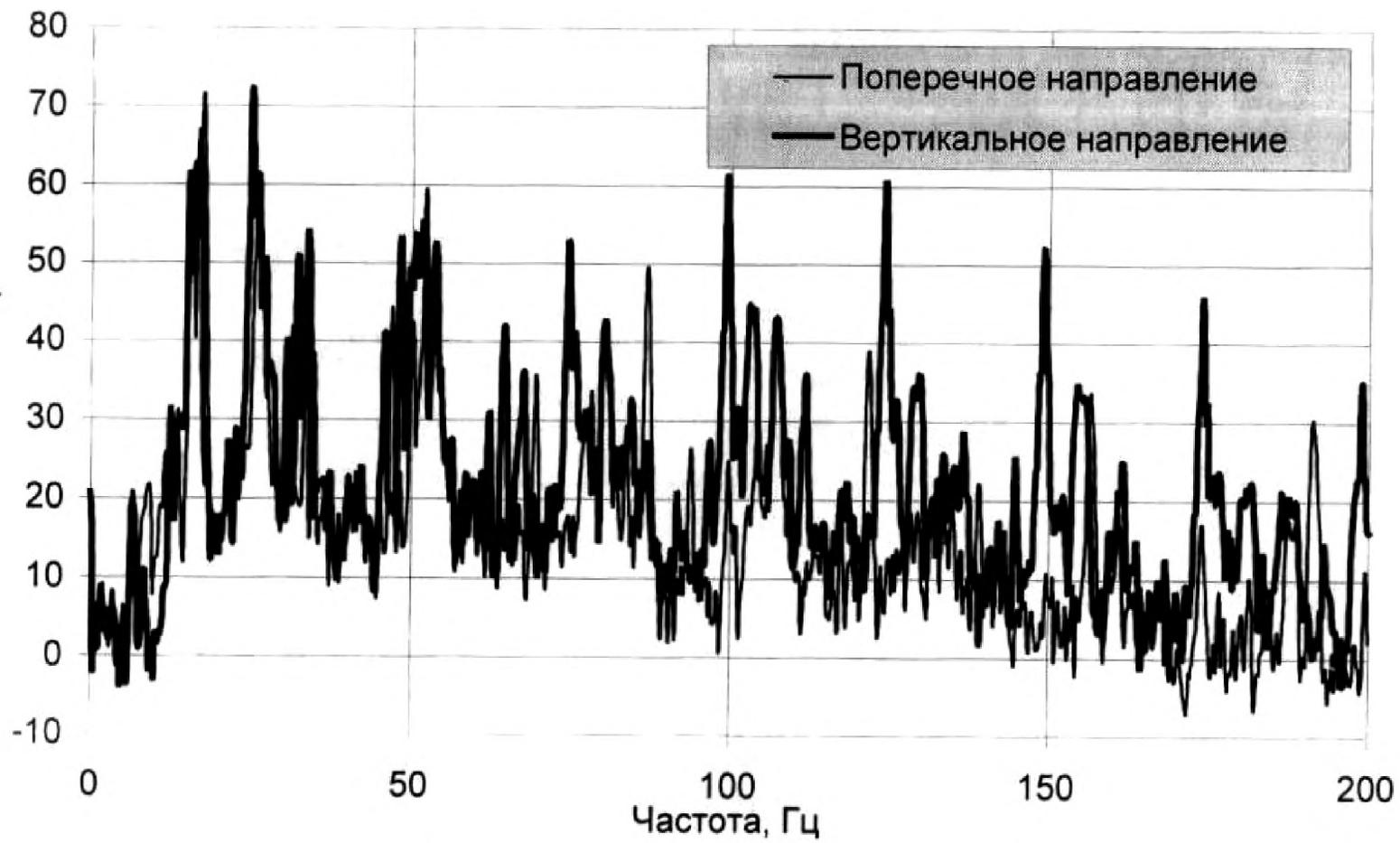


Рис. 8.9.4

Спектральные составляющие уровней вибрации при вибропогружении шунта на расстоянии 4,5-5,5 м, дБ



Рис. 8.9.5

Расчетная оценка общего уровня вибрации грунтов основания кабельных линий, м/с². Вертикальное направление.

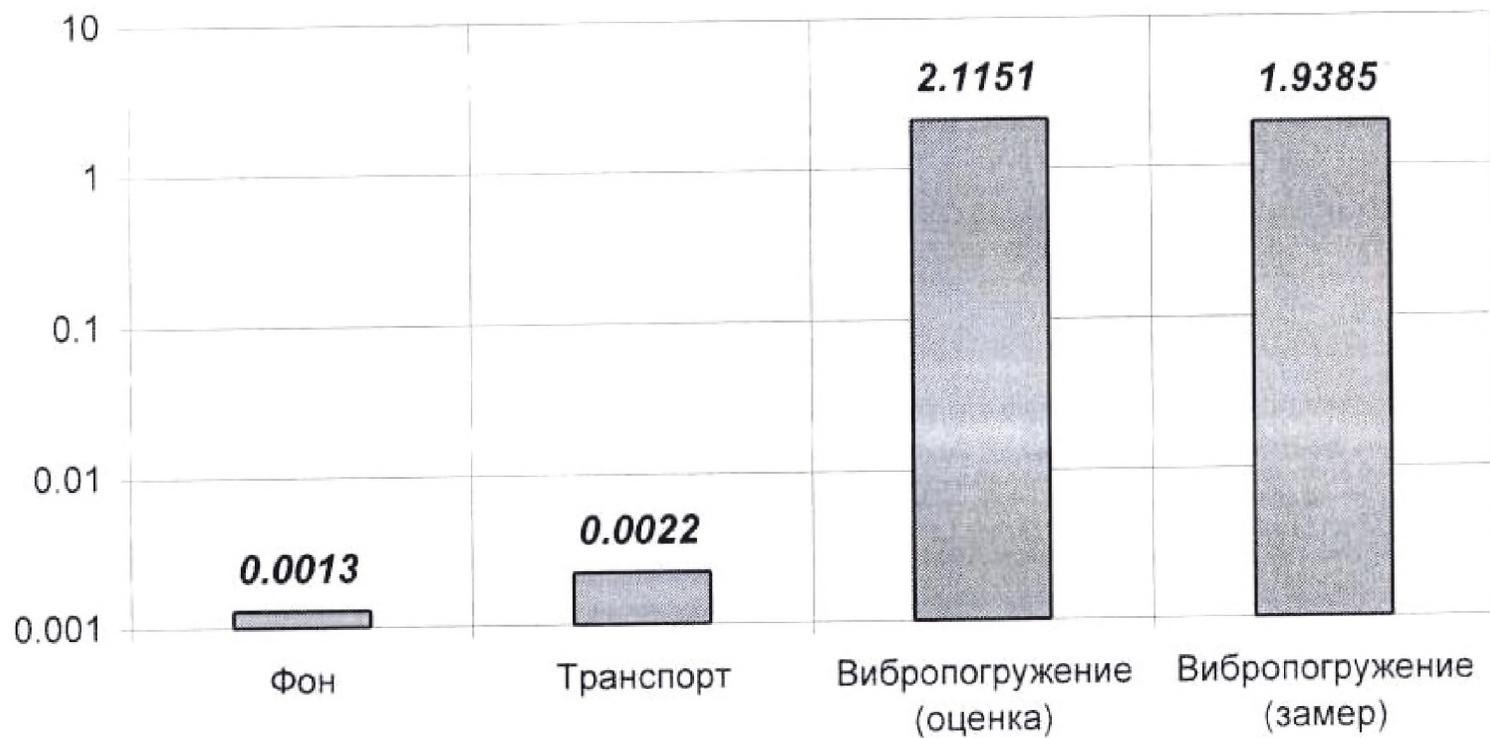


Рис. 8.9.6

Расчетная оценка общего уровня вибрации грунтов основания кабельных линий, м/с². Поперечное направление.

7.10. Мониторинг нефтепродуктопровода на реке Б.Охта при вибропогружении свай для временных опор моста КАД.

При строительстве кольцевой автодороги (КАД) на мостовом переходе через реку Б.Охта возникла необходимость устройства опор для временного моста. Вблизи временных опор проходят две нитки нефтепродуктопровода.

Основанием опор моста служат сваи, погружаемые в грунт с помощью вибраторов.

Измерение уровней вибраций при вибропогружении свай для временных опор мостового перехода КАД через р. Большая Охта проводилось с целью не допустить возможного разуплотнения грунта основания, провисания нефтепродуктопровода и возникновения аварийной ситуации. С той целью был проведен мониторинг.

Предварительно были изготовлены специальные герметичные высоко-чувствительные вибродатчики, диапазон измерения частот 1-100 Гц, а также металлические крепления их на грунте. Дальнейший приём и обработка сигнала по обычной схеме. Измерительная аппаратура размещалась на специальном понтоне. Вибродатчики были установлены на грунте в нескольких местах у основания трубы нефтепродуктопровода.

Предварительно были измерены уровни помех. Они составляли 0,0004 м/сек². Измеренные уровни вибраций при вибропогружении свай практически мало изменялись при изменении глубины погружения и составили 0, 06- 0,08 м/сек², т.е. ниже норм ВСН 490-87.

По данным обследования, выполненного водолазами ООО НПО «Шельф» дно реки Большая Охта вблизи двух ниток нефтепродуктопровода на участке сооружения временных опор мостового перехода КАД сложено до глубины ~1,0 м очень слабыми текучими илами. В верхней придонной части толщиной ~ 0,2 м грунтово-водяная взвесь. В слое илов водолазами обнаружены уплотнённые прослойки толщиной 0,3-0,45 см. Это свидетельствовало о том, что произошли изменения в основании трубы, что является признаком опасности. Однако, окончательные результаты визуального обследования показали, что существенных изменений рельефа дна, подвижек нефтепродуктопровода не обнаружено.

Результаты проведения мониторинга получили одобрение ОАО «Мостостроительный трест № 6» и позволили успешно продолжить строительство мостового перехода.

В заключение следует отметить, что при проведении мониторинга на особо ответственных объектах, в качестве критерия для приостановки при необходимости предотвращения аварийной ситуации строительных работ необходимо использовать не только уровни вибрационного воздействия, но и другие признаки, например, изменение фазовой скорости в грунте основания, как признак начала возможного расструктурирования грунта.

8. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ, ГЕОРАДАР

8.1. Применение методов электроразведки для определения характеристик слабых водонасыщенных грунтов.

Грунты обладают геоэлектрическими свойствами. Каждый слой грунта характеризуется своим удельным электрическим сопротивлением. Чем больше разница в значениях удельного сопротивления различных слоёв грунта, тем точнее результаты измерений. Удельное сопротивление грунта имеет взаимосвязь со скоростями распространения волн. Наибольшее применение при инженерно-геологических изысканиях нашли вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), электропрофилирование и метод заряженного тела.

При обследовании внутреннего двора Дворца Меншикова в г. Ораниенбауме стояла задача обнаружения заброшенной старинной дренажной системы и определения причины поступления подземных вод на нижнюю террасу дворцового ком-

плекса. С этой целью был применён метод заряженного тела. Измерения проводились путём наведения электромагнитного поля через заглублённые на исследуемой площади электроды и измерения возбуждаемого магнитного поля приёмной магнитной антенной. Результаты измерений были нанесены на схему, рис. 9.1.1. Голубым цветом нанесены старый засыпанный накопительный пруд, новая действующая дренажная система и участки скопления подземных вод у внутреннего фасада Дворца. Пунктиром нанесена старая разрушенная дренажная система. Основной причиной появления воды на нижних террасах Дворца является разрушение старой дренажной системы, скопление подземных вод у внутреннего фасада. Выданы рекомендации по устранению этих причин.

8.2. Применение электромагнитных волн для обследования.

Метод основан на возбуждении на поверхности и приёме электромагнитных волн, отразившихся от границ раздела объектов, контрастных по электрофизическим свойствам. Основная цель метода состоит в определении расстояний от точки наблюдения до границы слоя или дефекта в конструкции.

Признаком для расчленения толщи является контрастность слоёв по диэлектрической проницаемости. В свою очередь, диэлектрическая проницаемость и скорость волн сильно зависят от обводнённости грунтов.

При обследовании нескольких зданий применялся георадар. В подвалах здания Невский проспект д. 126 были обнаружены разрывы слоёв гидроизоляции, дефекты в шельге арок сводов между этажами (см. рис. 9.2.1.), разрывы слоёв грунта в основании фундамента.

При выяснении причин аварии канализационного коллектора у домов 102 и 104 по пр. Просвеще-

ния на глубине 6-7 м был с помощью георадара обнаружен плотный слой цементированного песка (песчаника) палеорусла. При погружении шпунта ограждения нового участка коллектора наличие плотных песков (песчаника) было подтверждено.

Однако, на больших глубинах в водонасыщенных грунтах применение георадара практически оказалось невозможным. Подтверждением этому служат работы по участку на В.О., где на глубине 20 м находится канализационный коллектор диаметром 2 м. Многочисленные проходы по трассам георадаром «Геон» по профилям «в крест» трассы не дали положительных результатов. Коллектор не был обнаружен.

Таким образом, в условиях залегания мощной толщи водонасыщенных грунтов, применение георадара ограничивается малыми глубинами (первые метры).



Рис. 9.1.1
Результаты электроразведки грунта

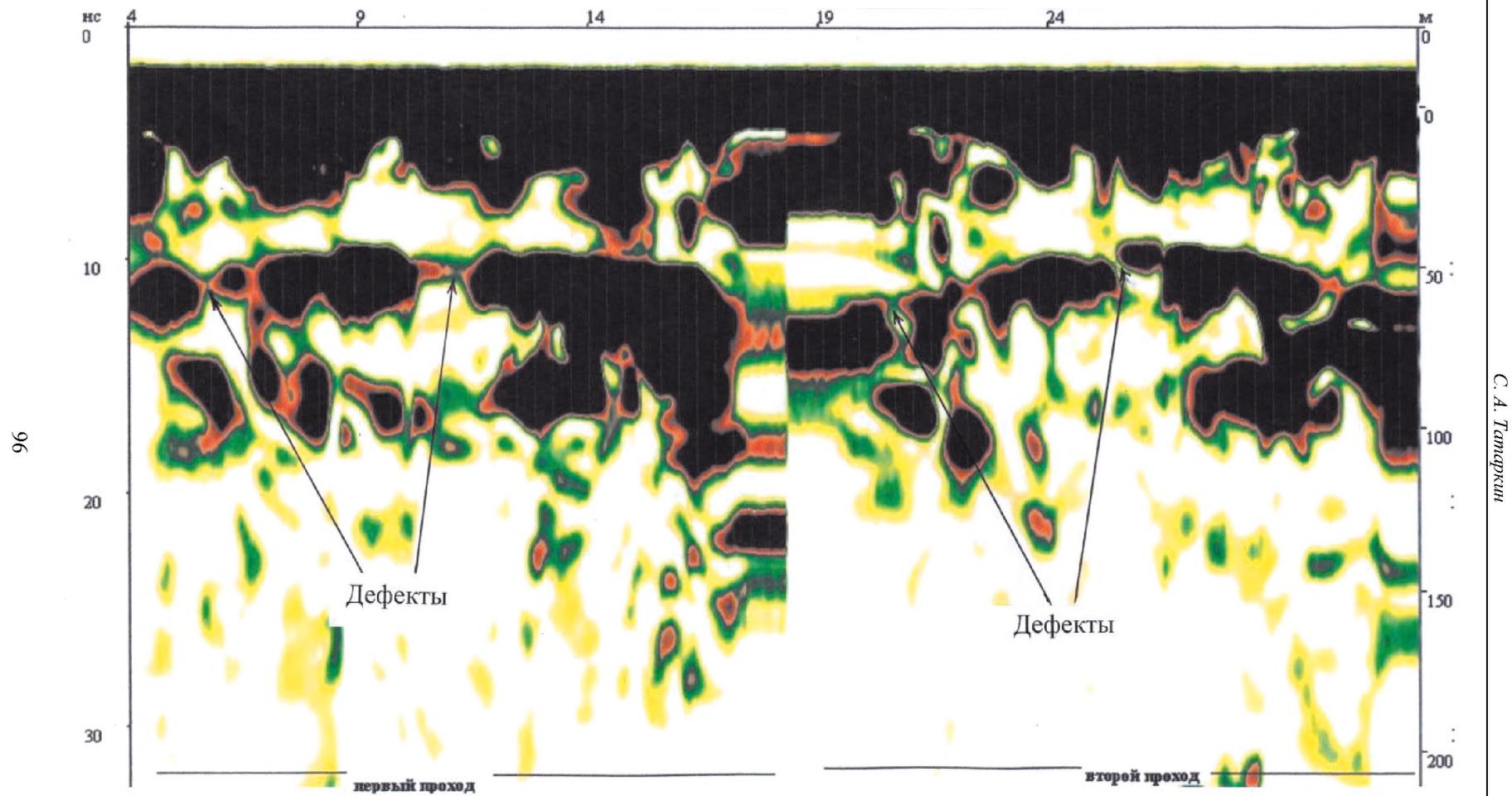


Рис. 9.2.1
Обследование арок и сводов здания георадаром. Видны дефекты в шельге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей брошюре приведены результаты экспериментальных работ с применением кратномасштабного анализа (вейвлет-анализ) при обработке нестационарных сейсмических сигналов в приповерхностных слоях грунта, в конструкциях зданий, подземных сооружений и др. С помощью этого анализа, обладающего повышенной помехоустойчивостью, исследованы физические явления в грунте.

К ним относятся: частотно зависящая фазовая и групповая скорости распространения сигнала, эффект волновода (каустики и зоны конвергенции), дифракционные (конические) волны, угловые вейвлет-спектры, обусловленные коэффициентом анизотропии и его изменением. Эти общеизвестные физические явления ранее не использовались при геотехническом моделировании и инженерных изысканиях. Измеренные параметры указанных явлений использованы в качестве признаков для

определения изменений структуры грунта, наличия слабых мест, неоднородностей, соотношений упругопластических свойств, толщины и границ литологических слоёв, коэффициентов анизотропии. Эти параметры дополнительно уточняют физикомеханические свойства грунтов, устанавливая дефекты в сваях, фундаментах и подземных сооружениях.

Использование различных геофизических методов в комплексе с традиционными инженерно-геологическими изысканиями позволит повысить надёжность принятия геотехнических решений. Рекомендуется применение геофизических методов, как обязательных, на этапе проведения инженерных изысканий для особо ответственных зданий (в том числе высотных) и при мониторинге строительства и эксплуатации подземных сооружений (коллекторы автомобильные тоннели, тоннели метро).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреховских Л.И.* Волны в слоистых средах. Л. Судостроение, 1975 г.
2. *Болотин П.* Вибрации в технике. М. Мир, 1979 г.
3. *Гамильтон Э.* Акустика морских осадков. М. Мир, 1970 г.
4. *Гоноровский В.Б.* Радиотехнические сигналы. М. Мир, 1985 г.
5. *Гуревич И.И., Боганик Г.Н.* Сейсмическая разведка. М. Недра, 1980 г.
6. *Дашко Р.Э.* Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М. Недра, 1977 г.
7. *Дашко Р.Э.* Геотехническая диагностика коренных глин СПб. Региона (на примере нижнекембрийской глинистой толщи). СПб. Реконструкция городов и геотехническое строительство, 2000 г.
8. *Долматов Б.И.* Механика грунтов, основания и фундаменты. Л. Стройиздат, 1988 г.
9. *Клей К., Толстой А.* Акустика морских осадков. М. Мир, 1979 г.
10. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлет-анализ. М. Физматлит, 2003 г.
11. *Ломтадзе В.Д.* Инженерная геология. М. Недра, 1977 г.
12. *Массарж Р.* Лекции на международном симпозиуме геофизиков в г. Порто, Португалия. 2003 г.
13. *Маслов Н.Н.* Механика грунтов. М. Стройиздат, 1977 г.
14. *Притчетт П.* Надёжные данные сейсморазведки. М. Мир, 1994 г.
15. *Сейсмическая стратиграфия* под редакцией Пейтона Ч.М. Мир, 1982 г.
16. *Скучик Е.* Сложные колебательные системы. М. Мир, 1980 г.
17. *В. Улицкий В.М., Шашкин А.Г.* Геотехническое сопровождение реконструкции городов. М., 1999 г.
18. *Урик Д.* Сейсмика мелкого моря. М. Мир, 1972 г.
19. *Шпольский В.* Квантовая механика. М. Физика, 1965 г.
20. *Савин О.* Современные методы обследования зданий. Стройиздат, 2002 г.
21. *Шлоссер Б.* Использование вейвлет-анализа для исследования грунта на малых глубинах. Интернет-статья, 2003 г.
22. *Аппаратура статического зондирования грунта* с применением геофона и вейвлет-анализом сигналов. Интернет-статья, Голландия, 2003 г.
23. *Использование вейвлет-анализа для исследования вибраций высотных зданий при пульсациях ветра.* Интернет-статья, группа авторов, США, 2005 г.