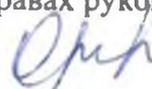


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О. Ю. ШМИДТА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК (ИФЗ РАН)

На правах рукописи



ОРЛОВА ИРИНА ПЕТРОВНА

Разработка технологии сейсмического мониторинга состояния транспортных
сооружений в условиях Крайнего Севера и Сибири

Специальность 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Капустян Наталия Константиновна

Москва - 2022

Оглавление

Введение	4
Глава 1 Опасные геологические процессы и методы обследования грунтов оснований железнодорожных путей	14
1.1 Строение земляного полотна ж/д пути, основные характеристики подвижного состава	14
1.2 Неблагоприятные грунтовые условия и опасные процессы	19
1.3 Основные методы инструментального обследования состояния пути	35
1.4 Нерешенные проблемы, постановка задачи	37
Выводы по главе 1	39
Глава 2 Основные представления о взаимодействии подвижного состава и грунтов основания пути.....	41
2.1 Обзор представлений и моделей	41
2.2 Возможности конечноэлементных моделей на примере района исследования	49
2.3 Модель для деформирования грунта по вертикали (задача Буссинеска).....	56
2.4 Модель для деформирования грунта по горизонтали (задача Эльзассера) ..	61
Выводы по главе 2.....	63
Глава 3 Экспериментальные сейсмометрические исследования земляного полотна.....	64
3.1 Описание комплекса экспериментальных исследований.....	64
3.2 Сравнение возможностей сейсмической аппаратуры разного типа	67
3.3 Характеристика экспериментального материала и решаемые задачи	71
3.4 Предобработка записей, основные характеристики волновых форм компонент	73
Выводы по главе 3.....	76
Глава 4 Основы технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов	78
4.1 Анализ высокочастотной составляющей записи колебаний и основные параметры, характеризующие состояние грунтов	78
4.2 Анализ среднечастотной и низкочастотной составляющих записи колебаний и основные параметры, характеризующие состояние грунтов	86
4.2.1 Вертикальная компонента	86
4.2.2 Горизонтальные компоненты	92
4.3 Совокупность информативных параметров сейсмической записи и тестирование на мониторинге сезонных изменений	97

4.4 Автоматизация определения информативных параметров	104
4.5 Блок-схема технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов	106
4.6 Комплексование технологии с другими методами обследования	109
Выводы по главе 4.....	111
Заключение	113
Список литературы	116

Введение

Актуальность темы исследования. К транспортным сооружениям на железной дороге относятся земляное полотно, верхнее строение пути, дорожные одежды, защитные сооружения, искусственные сооружения, здания, другие объекты дорожной инфраструктуры, а также примыкающие к дорогам склоны. Одним из важных объектов железной дороги, влияющих на бесперебойность и безопасность, является геотехническая система «земляное полотно – основание», причем ее стабильность существенно зависит от состояния грунтов основания. В работе рассматривается преимущественно взаимодействие движущегося железнодорожного состава с земляным полотном и его основанием. Это составляет основу разрабатываемой технологии, к которой могут подключаться дополнительные способы обследования транспортных сооружений. Полученные результаты могут быть использованы для оценки состояния оснований других транспортных сооружений.

Железные дороги России расположены в различных климатических зонах и геологических условиях. Антропогенная деятельность и, прежде всего, техногенные нагрузки на железнодорожный путь, а также климатические изменения влияют на состояние земляного полотна, что требует к нему пристального внимания для обеспечения безопасности. Наибольшие проблемы возникают на участках земляного полотна в районах распространения карста, вечной мерзлоты, на участках, подверженных оползням, селям, сходам снежных лавин и т.д.

Развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта РФ до 2030 г. [1], в том числе, подразумевает проведение строительных работ и работ по реконструкции и восстановлению земляного полотна в районах со сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями на территориях Крайнего Севера и Сибири. Работы требуют научно-технического сопровождения, включающего разработку новых, более чувствительных к

изменениям в грунтах, методов обследования и мониторинга. Это определяет практическую значимость и актуальность постановки задачи исследования.

В зонах распространения многолетнемерзлых грунтов эксплуатируется около 5 тыс. км линий на Северной, Свердловской, Восточно-Сибирской, Забайкальской и Дальневосточной железных дорогах. Характерной особенностью этих участков является повышенная деформируемость пути, вызванная криогенными процессами, происходящими в грунтах оснований. Наибольшей деформируемостью характеризуется северный ход Дальневосточной железной дороги (БАМ), где доля дефектного полотна порядка 25%, что считается чрезмерно высоким показателем. Уровень дефектности земляного полотна более 10 % протяжения зарегистрировано на Красноярской и Забайкальской ж/д, 5-10% на Северо-Кавказской, Восточно-Сибирская и Сахалинской ж/д. Суммарная протяженность этих дорог составляет 27,6 % от эксплуатационной длины сети железных дорог, при этом на них приходится 68,6 % деформирующегося земляного полотна всей сети [2].

В последние десятилетия происходят значительные увеличения объемов грузопотоков и скоростей поездов, увеличиваются статические и динамические нагрузки, что приводит к еще большей потере несущей способности насыпи на слабых основаниях [3]. Как следствие, учащаются отказы в работе и повышаются затраты на текущее содержание пути, особенно на участках с криогенными деформациями.

Степень разработанности темы исследования. Существующие диагностические системы, применяемые на железных дорогах, основаны на совместном применении современных геофизических комплексов, лабораторных методов и компьютерного моделирования [4, 5].

Среди геофизических методов для изучения состояния транспортных сооружений, включая конструкции и грунты основания, используются следующие виды: радиолокационный, электромеханический, электродинамического зондирования, вибрационной диагностики и сейсмические методики.

Для исследования земляного полотна одним из наиболее эффективных геофизических методов считаются сейсмические наблюдения [6]. Так для получения представлений о вещественном составе среды анализируются разрезы насыпи, полученные путем сейсморазведки. Преимущественно, этот метод опирается на интерпретацию кинематики упругих волн. Динамику волн, а именно амплитуды и спектры, используют крайне редко, хотя именно эти параметры волнового поля наиболее чувствительны к изменениям деформационных свойств среды [7].

Так как движущийся транспорт оказывает на грунт не только статистическую, но и динамические нагрузки проводятся дополнительные исследования для оценки динамической неустойчивости. Экспериментальное изучение нагрузок и реакции на них среды позволяет определить возможности разрушения или накопления критических для данного транспортного сооружения деформаций грунтов, определить характер изменения напряженно-деформированного состояния земляного полотна под действием динамической нагрузки поездов, оценить дополнительные деформации грунтов и земляных сооружений, а также указать возможности сейсмического разжижения грунтов [8]. Наиболее широко применяемые полевые методы – это сейсмическое зондирование, динамическое зондирование, стандартная пенетрация и статическое зондирование с пьезоконусным зондом. В первую очередь они применяются для оценки возможности сейсмического разжижения песчаных грунтов, хотя известны работы по оценке динамической неустойчивости и связных грунтов полевыми методами [9]. Особенность существующего подхода состоит в том, что изучаются критические для сооружения ситуации, связанные со значительными изменениями свойств грунтов (по сравнению с проектируемыми или нормальными), т.е. «сильные» вариации свойств. Но всякий опасный процесс начинается на ранней стадии с малых («слабых») изменений. Кроме того, обследования проводятся эпизодически, по регламенту или по мере надобности. Непрерывного слежения за

изменениями состояния грунтов оснований (мониторинг) не проводится, в первую очередь потому, что нет соответствующей технологии.

Еще одна, ранее мало проработанная возможность – использование движущегося поезда как источника зондирующих сигналов. Существенно, что поезд генерирует совокупность типов воздействий: вибрационное в традиционном сейсмическом диапазоне частот (выше 1-5 Гц) и деформирующее (как движущийся штамп). Первый тип наблюдался, строились модели воздействия [10, 11, 12, 13, 14, 15] и были попытки использования его для оценки состояния сооружений вблизи полотна [16]. Второй тип регистрировался только для верхнего строения пути тензодатчиками (месдозами) [3], но работы не были ориентированы на мониторинг состояния грунта. На сейсмических записях это деформирующее воздействие от поезда впервые наблюдалось исследовательской группой ФИЦКИА УрО РАН и ИФЗ РАН [17], к которой присоединилась автор диссертации. Такие наблюдения стали возможны благодаря применению принципиально иной, чем традиционно используемой на транспорте, аппаратуры - широкополосных сейсмологических датчиков с возможностью регистрировать колебания с периодами более 100 с. Эта аппаратура, а также применение различных наработок в сейсмическом просвечивании [7, 16, 17, 18, 19] в первую очередь использование динамических характеристик волнового поля, более чувствительных к изменению в среде, чем кинематика, являются основой нового направления в обследовании пути, в том числе разрабатываемой технологии.

С целью увеличения безопасности и также снижения расходов на ремонтные работы на участках пути с деформациями, вызванными неблагоприятными процессами изменения состояния земляного полотна, необходимо разработать технологию мониторинга их выявления, в том числе на ранней стадии. Существенным элементом технологии должна быть автоматизация процесса наблюдений для возможности вести мониторинг из удаленной точки (центра сбора данных). Данная технология дополняет существующие методы для выявления изменения, происходящие в земляном полотне и грунтах основания.

Цель работы – Разработать технологию сейсмического мониторинга состояния земляного полотна железнодорожных путей на основе анализа сейсмических волновых полей, регистрируемых при прохождении поезда, рассмотреть возможность распространения технологии на основания транспортных сооружений вблизи путей.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Систематизировать сведения о деформациях и методах обследования земляного полотна в сложных природных и инженерно-геологических условиях.
2. Разработать и верифицировать численные и аналитические модели взаимодействия в системе железнодорожный экипаж–геологическая среда для основных негативных природно-техногенных процессов, характерных для территорий Крайнего Севера и Сибири.
3. Систематизировать сведения о сигналах, используемых при сейсмическом мониторинге ж/д пути, и провести анализ возможностей регистрирующей аппаратуры, сформировать требования к сейсмическим датчикам.
4. Детально проработать схему и алгоритмы обработки данных для сейсмической технологии выявления на ранней стадии негативных природно-техногенных изменений в земляном полотне железнодорожных путей с использованием в качестве зондирующего сигнала движение поезда.
5. Разработать основы технологии ранней диагностики и мониторинга негативных природно-техногенных изменений земляного полотна и подстилающих грунтов железнодорожных путей

Методология и методы исследования. Выполняются обследования грунтов оснований железнодорожной насыпи путем применения пассивных (т.е. без специализированных источников сигналов) сейсмических методов с использованием современных трехкомпонентных широкополосных сейсмических датчиков (сейсмометры ТС-120s фирмы Nanometrics). Работа построена на экспериментальных наблюдениях двух типов: одновременно на тестируемом

(«плохом») и опорном участках, и длительная регистрация (более 50 дней) с записью сигнала от 1590 поездов. Выявление зависимости параметров записей колебаний от свойств грунтов выполнялось путем подбора упругих моделей среды и анализа волновых форм, получаемых в аналитических решениях задачи воздействия на среду движущегося поезда. Использовался статистический анализ параметров, полученных при обработке экспериментальных данных для выявления надежных оценок. Для выявления изменений в грунтах применялись две методики: 1) сопоставление параметров сейсмических записей, полученных одновременно на тестовом и ослабленном участках земляного полотна, 2) при мониторинге состояния грунта анализировались кривые временного хода информативных параметров записи. Для оценки чувствительности методики мониторинга к изменениям состояния земляного полотна как реакции на природные явления применялось построение численных конечноэлементных моделей взаимодействия подвижного состава и грунтов основания пути.

Научная новизна и практическая значимость. Применяемые сегодня геофизические методы обследования земляного полотна эффективны для верхних слоев разреза, и тогда, когда изменения в свойствах грунтах насыпей велики и близки к аварийным. Полученные в данной работе параметры характеризуют состояние как верхних, так и более глубоких слоев и дают возможность выявить изменения состояния грунтов из-за сезонных и погодных вариаций, что ранее было невозможно. Экспериментально показана и подтверждена моделированием возможность проведения непрерывного сейсмического мониторинга состояния грунтов с выявлением изменений, свойственных ранней стадии опасных процессов.

Технология использует движущийся поезд в качестве источника зондирующего сигнала, т.е. работы ведутся без нарушения расписания движения ж/д транспорта, что существенно снижает расходы по сравнению с методами, требующим изменения или прекращения движения на период проведения диагностики.

Впервые исследовано поведение грунтов основания насыпей при низкочастотных нагрузках в трех взаимно перпендикулярных направлениях, создаваемых подвижным составом. Полученные сейсмические записи позволили выявить информативные параметры для трех частотных диапазонов сигнала (ВЧ - 2-8 Гц, СЧ – 0.1-2 Гц, НЧ – ниже 0.1 Гц), по которым можно судить об изменениях на ранней стадии несущей способности верхней (насыпь) и нижней части разреза (естественное основание) земляного полотна. Это позволит своевременно произвести необходимые работы по укреплению земляного полотна до развития опасных процессов.

Показано, что аналитические решения задач деформирования насыпи, включающие параметры, характеризующие среду, в том числе вязкость подстилающих грунтов основания, согласуются с экспериментом. Данные модели позволяют объяснить процессы, происходящие в верхнем и нижнем строениях земляного полотна, предсказать поведение грунтов при климатических изменениях, дать количественные оценки параметров упругости и вязкости в условиях естественного залегания грунтов (*in situ*).

Данная разработка применима для любых видов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты. Технология нацелена на выявление начала опасных процессов в земляном полотне, а также на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы, при проведении комплексных геофизических исследований.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические модели деформирования земляного полотна при воздействии на него движущего поезда, использующие решения задач Буссинеска и Эльзассера, составляют основу интерпретации для получения количественных значений упругости и вязкости грунта в условиях естественного залегания для верхнего строения пути (1-2 м) и его основания (до ~10 м)

2. Набор параметров для автоматизированной обработки сейсмической записи движения поезда, не критичных к весу состава и его скорости, определяемый при мониторинге величинами изменений деформационных свойств грунтов основания пути. Это: 1) отношение мощностей высокочастотных колебаний на горизонтальной и вертикальной компонентах; 2) амплитуда вертикальной компоненты первых вступлений колебаний от поезда; 3) для низкочастотной составляющей записи после прохождения поезда – отношение амплитуд на горизонтальных компонентах и 4) временной интервал между концом движения поезда и максимумом всплеска амплитуд на горизонтальной компоненте поперек пути.
3. Основы технологии мониторинга железнодорожного полотна путем сейсмометрической регистрации движущегося поезда трехкомпонентными широкополосными датчиками (периоды не менее 100 с), для выявления в грунтах опасных процессов на ранних стадиях их развития.

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается использованием калиброванной аппаратуры мирового уровня, статистической обработкой больших массивов данных, согласованием с результатами проведенных теоретических расчетов и выполненным численным моделированием в среде PLAXIS 2D.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

1. 8-й Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. Г. Москва, 18-19 декабря 2019
2. 7-й Международный научно-практический симпозиум «Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси», Свято-Троицкая Сергиева Лавра, г. Сергиев Посад, Московская обл., Россия, 14-16 ноября 2018 г.

3. Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, г. Москва 28-29 октября 2020 г.
4. Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Г. Москва, 19-22 октября 2020г.
5. "XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ Чтения, посвященные памяти Г.М. Шахунянца, 19 ноября 2020 г. Москва, РУТ (МИИТ)
6. 17-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2021» 26-30 апреля 2021 г. Г. Геленджик.

Публикации

Общее количество работ 7, опубликованных по теме диссертации:

1. N. K. Kapustian, G. N. Antonovskay, I.P. Orlova. Soil State Testing Using. Heavy Vehicle Vibrations Energies 2022, 15(3), 830; <https://doi.org/10.3390/en15030830>
2. Орлова И.П., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М. Возможности сейсмического оборудования для мониторинга основания железнодорожных путей в районах со сложными грунтовыми условиями. Вестник геонаук. 2020. № 4 (304). С. 33-39. DOI: 10.19110/geov.2020.4.5
3. Антоновская Г.Н., Добровольский И.П., Капустян Н.К., Орлова И.П. Определение in situ упругих свойств нижнего строения железнодорожного пути при сейсмометрических наблюдениях. Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 44-55. DOI: 10.21455/si2020.1-4
4. Орлова И.П., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М. Возможности мониторинга основания железнодорожного пути пассивными сейсмическими методами. В книге: Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе. сборник тезисов научно-практической конференции. Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. Москва, 2020. С. 157-161.
5. Орлова И.П., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Возможности сейсмического оборудования для мониторинга основания железнодорожных путей в

районах со сложными грунтовыми условиями. В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2020. С. 51.

6. Осика В.И., Кочетков Б.М., Павлов Е.И., Качан (Орлова) И.П. Мониторинг деформационного состояния ответственных и технически сложных объектов. Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 46-52. DOI: 10.18358/np-27-1-i4652
7. Осика В.И., Кочетков Б.М., Павлов Е.И., Качан (Орлова) И.П., Пчелинцев В.А. Применение геофизических датчиков из кварцевого стекла в системах контроля строительных сооружений и крупных механизмов. Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 1. С. 19-32. DOI: 10.21455/std2017.1-2

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации: 124 страниц текста, 42 рисунков, 10 таблиц. Список литературы включает 112 наименований.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность научному руководителю – доктору физико-математических наук Капустян Наталии Константиновне за неоценимую всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы. Автор благодарен сотрудникам лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН, и в первую очередь руководителю, доктору технических наук Антоновской Галине Николаевне за важные дискуссии, советы и предоставленные материалы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-35-90071 «Разработка методики обследования оснований транспортных сооружений сейсмическими методами, с использованием движущегося транспорта в качестве зондирующего сигнала» руководитель Капустян Н.К.

Глава 1. Опасные геологические процессы и методы обследования грунтов оснований железнодорожных путей

1.1 Строение земляного полотна ж/д пути, основные характеристики подвижного состава

Наиболее емкое и краткое описание объекта исследования дано в [20, 21]. В соответствии с ним приведем его краткую характеристику, важную для неспециалистов-путейцев.

Сложный геотехнический комплекс - железнодорожный путь, служит бесперебойному и безаварийному движению подвижного состава, обеспечивает необходимые скорости, учитывает, как статические, так и динамические нагрузки колесных пар на рельсы и, в целом, на земляное полотно.

Железнодорожный путь — это единая инженерная конструкция, состоящая из верхнего и нижнего строения, работающих совместно в различных эксплуатационных и погодно-климатических условиях (Рис. 1.1.1).

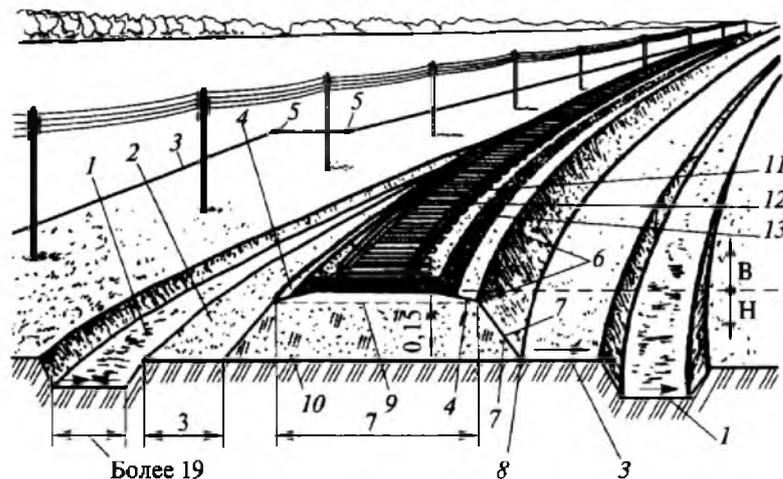


Рисунок 1.1.1 - Типовой поперечный профиль железнодорожного пути: В – верхнее строение пути; Н – нижнее строение пути; 1 – резерв; 2 – берма; 3 – граница полосы отвода; 4 – обочина; 5 – межевой знак; 6 – бровка откоса; 7 – откос; 8 – подошва откоса; 9 – основная площадка; 10 – основание насыпи; 11 – рельс; 12 – шпалы скрепления; 13 – балластная призма (размеры указаны в м)

Верхнее строение включает в себя рельсы, шпалы, их крепления, конструкции, обеспечивающие соединение пересекающихся путей. Нижнее строение представляет собой само подготовленное земляное полотно, искусственные сооружения (при пересечении водоемов, оврагов и т.д.), а также мосты и тоннели.

Земляное полотно является несущей конструкцией для железнодорожного пути, служит для выравнивания подстилающих грунтов, воспринимает динамические нагрузки от поездов и статические верхнего строения пути, передавая их на естественное основание насыпи. Поэтому земляное полотно играет важнейшую роль в обеспечении безопасности движения поездов. Надежность земляного полотна является залогом соблюдения основных эксплуатационных параметров: скорости движения составов, их предельной массы.

Земляное полотно - это сложное инженерное сооружение, состоящее из неоднородных по составу насыпных грунтов, изменяющихся во времени и в зависимости от погодных условий (например, плотность насыпи зависит от времени года, температуры окружающей среды и т.д.), вызывающих изменение несущей способности полотна.

Поперечное сечение или поперечный профиль дает представление о его структуре, подразделяется на основную площадку, земляное полотно и основание.

Основная площадка - главный элемент земляного полотна, фундамент верхнего строения пути, воспринимающий наибольшую статическую нагрузку от верхнего строения пути и динамическую - от передвижения составов. Земляное полотно ограничивается откосами - искусственными наклонными насыпями, геометрическая форма которых обеспечивает устойчивость полотна.

Подстилающие грунты являются естественным основанием для всей конструкции ж/д пути и земляного полотна, в частности.

Основными видами земляного полотна являются: насыпи, выемки, полунасыпи, полувыемки, полунасыпи- полувыемки и нулевые места. В

зависимости от рельефа местности земляное полотно размещается либо в выемке, либо на насыпи рис. 1.1.2 [21].

Характеристики земляного полотна:

- прочность грунтов – противостояние разрушениям под воздействием статических и динамических нагрузок
- устойчивость – способность полотна сохранять равновесие при статических и динамических нагрузках
- долговечность – способность в течение длительного срока сохранять эксплуатационные качества

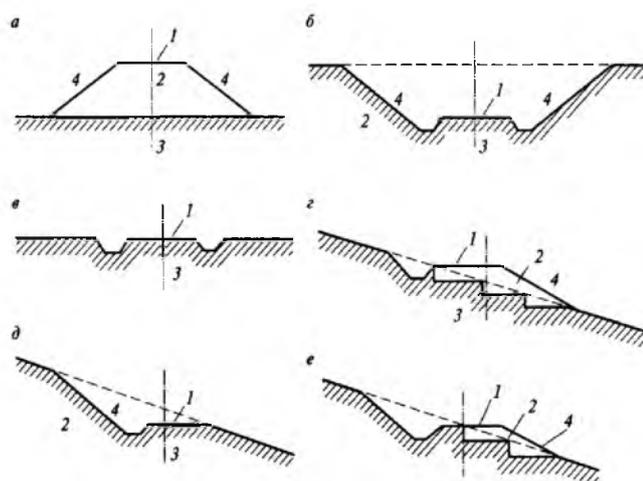


Рисунок 1.1.2 – Типы земляного полотна: а – насыпь; б – выемка; в – нулевое место; г – полунасыпь; д – полувыемка; е – полунасыпь-полувыемка; 1 – основная площадка; 2 – собственно земляное полотно; 3 – основание; 4 – откосы

На состояние земляного полотна влияют погодно-климатические условия и нагрузки, создаваемые подвижным составом.

Путь и, воздействующий на него, подвижной состав являются единой инженерно-конструкторской взаимосвязанной системой. Статическое и динамическое воздействие от колесных групп на все элементы пути вызывают напряжение и упругие деформации в земляном полотне.

Специфика устройства ходовых частей подвижного состава определяет характер и степень их воздействия на путь. Ходовая часть вагонов имеет в своем

составе колесные пары, буксы с подшипниками и рессорное подвешивание, через которые передается нагрузка от вагонов на железнодорожное полотно. Эти элементы объединяются рамой в тележки в многоосных вагонах, что обеспечивает возможность плавного прохождения подвижным составом криволинейных участков железной дороги. Надежность этих элементов обеспечивается строгой нормативной базой, для обеспечения безопасности движения. Жесткую базу экипажей (расстояние между крайними осями) относят к важнейшим характеристикам, обеспечивающим безопасное взаимодействие подвижного состава и пути

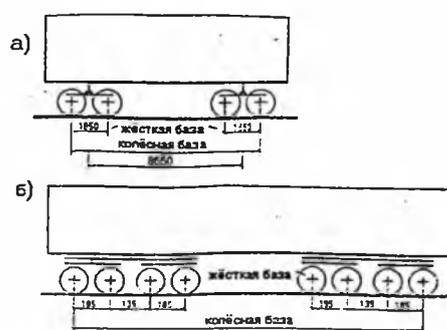


Рис. 1.1.3 - Типы жестких баз вагонов: а) четырехосного; б) восьмиосного [3]

В настоящее время созданы справочники и таблицы с расчетными значениями основных характеристик подвижного состава [3]. Так ключевыми параметрами, влияющими на взаимодействие системы «подвижный состав-земляное полотно» со стороны состава являются:

- статическая нагрузка от колеса на рельс;
- отнесенный к колесу вес необрессоренных частей;
- приведенная к колесу жесткость рессорного подвешивания;
- статический прогиб рессорного подвешивания;
- диаметр колеса по кругу катания;
- количество осей тележки;
- расстояние между центрами осей колесных пар тележки экипажа;
- расстояние между последней осью первой тележки и первой осью

второй тележки;

- конструкционная скорость - наибольшая допустимая скорость, которая закладывается в процессе проектирования для расчета прочности, надежности, динамических свойств взаимодействия подвижного состава с железнодорожным полотном.

При своем движении поезд оказывает на путь как статическую нагрузку от веса экипажа (рассчитываемого на каждое колесо), так и вертикальную и продольную динамические нагрузки. Дополнительные нагрузки возникают при движении колес по неровностям и деформированным участкам пути. Существуют и другие факторы, повышающие нагрузки на земляное полотно, такие как, неровности самого колеса, колебания наддресоренного строения и недресоренных масс, движение по скривленным участкам пути, причем с увеличением скорости подвижного состава увеличиваются и дополнительные динамические силы [3]. Из всех перечисленных сил наибольшая дополнительная динамическая нагрузка на колеса, возникает при движении по неровности пути.

Движущийся состав создает переменное силовое воздействие на земляное полотно через рельсошпальную решетку. Введение высокоскоростного и тяжеловесного движения, и увеличение объемов движения в целом, приводит к повышению осевых и погонных нагрузок на них.

Земляное полотно – самый уязвимый для разрушения компонент путевой инфраструктуры железных дорог [2, 20, 22]. Именно состояние земляного полотна является основным критерием, определяющим работоспособность пути. Деформация земляного полотна является главной причиной преждевременной деградации пути и выхода из строя его компонентов, повышающей затраты на текущее содержание.

Необходимо учитывать проблемы деградации земляного полотна как при повышенной динамической нагрузке на путь, так и при деформации земляного полотна, связанные с природными-климатическими процессами, происходящими в грунтах основания. Рассмотрение двух этих факторов, влияющих на состояние

земляного полотна, в совокупности позволяет разработать максимально эффективную систему мониторинга земляного полотна для выявления на ранних стадиях дефектов и контроля начала процессов ухудшения состояния на уровне подстилающих грунтов.

1.2 Неблагоприятные грунтовые условия и опасные процессы

Земляное полотно железных дорог является частью ж/д инфраструктуры, которая рассчитана на долгий срок службы и не подлежит замене во время эксплуатационного периода, и только в случае необходимости принимаются меры по усилению или организации капитального ремонта. Однако земляное полотно оказывается под воздействием различных внешних, переменных во времени, как природных, так и техногенных факторов. Такие воздействия влекут за собой изменения, приводящие к образованию деформаций и дефектов в земляном полотне.

Территория Российской Федерации огромна, инженерно-геологические и климатические условия мест расположения линий железных дорог очень разнятся, в том числе, значительна площадь территорий, где распространены неблагоприятные для земляного полотна процессы и явления. Так протяженность ж/д путей в районах многолетнемерзлых грунтов составляет около 5 тыс. км (рис. 1.2.1, рис. 1.2.2).

К сооружению железных дорог на территории России в разное время предъявлялись нормативные требования различной жесткости, что, в совокупности с тенденцией к оттаиванию вечномерзлотных грунтов основания, способствует развитию критических деформаций земляного полотна [24].

Общая протяженность криогенных деформаций железнодорожных путей составляет 34,3 % (1758 км) от общей протяженности российских железных дорог [2]. В дополнение к этим - нужно отнести и существенные участки деформаций

путей, обусловленных потерей устойчивости и их осадки на насыпях во время весеннего оттаивания грунтов со значительным их переувлажнением.



Рисунок 1.2.1 - Распространение мерзлоты на территории РФ [23]

Деформации происходят вследствие изменения условий теплообмена. Независимо от толщины слоя насыпи ее оттаивание происходит гораздо быстрее, поскольку она сложена в основном несвязными (дренирующими) грунтами для отвода дождевой и талой воды, поэтому влажность насыпи значительно ниже влажности грунтов основания. И в период таяния поверхность таких грунтов и обводненная поверхность нагреваются в несколько раз больше, чем в естественных условиях (соответственно от 4 до 16 °С и от 0.4 до 6 °С в дневном цикле) [25].

Деформирование ж/д путей в зоне вечной мерзлоты происходит в том числе и вследствие образования участков незамерзающей породы, распространяющейся вглубь среди многолетней мерзлоты. По данным П.И. Дыдышко [26] в некоторых зонах эти участки простираются вглубь на 0.6–1.5 м от верха насыпи, не смыкаясь с сезоннопромерзающим слоем. На прилежащих к железным дорогам территориях толщина сезонно-талого слоя грунтов в зависимости от вида изменяется от 0.6 до 1.5 м.

Начальная просадочность [27] образуется при вытаивании ледяных включений в грунте, вследствие понижения верхней границы вечной мерзлоты. В образующиеся полости постепенно выдавливаются талые текуче-пластичные глинистые грунты. В результате грунтовые основания ослабляются и оседают, происходит расползание насыпи. Такое ослабленное земляное полотно неизбежно подвергнется существенной деформации при динамическом воздействии подвижного состава [5, 28, 29].

Большинство криогенных деформаций вызывают не только постепенные отказы в работе, но и вызывает значительный суммарный ущерб от их возникновения для всей сети ж/д из-за их большого числа.

Текущее содержание пути на участках интенсивного оттаивания многолетнемерзлых грунтов основания возрастает многократно. По расчетам, проведенным Е.С. Ашпизом для БАМа в 1990 году, трудозатраты на содержание таких участков пути превышали основные нормы в 3–4 раза [30].

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» от 2008 г. активно осваиваются территории северных и сибирских регионов, после 2030 г. строительство новых и реконструкция старых железнодорожных линий в районах со сложными грунтовыми условиями будет только расти рис. 1.2.2. [30].

В этой связи становится всё более актуальной задача создания эффективных способов обследования земляного полотна, в том числе подстилающих грунтов, для выявления деформационных процессов, как на этапе строительства, так и для действующих линий, подверженных различным внешним воздействиям, природного и техногенного характера.

Очевидно, что для контроля за деформационными процессами необходимо в первую очередь определить причины и механизмы их возникновения, и классифицировать деформации по типам.

Деформации земляного полотна — это изменения формы или размеров полотна, или его частей под воздействием внешних нагрузок, термодинамических

условий, изменения влажности и прочих техногенных и природных факторов, которые приводят к снижению эксплуатационных характеристик. Деформации разделяются на остаточные и упругие, в том числе сезонные.



Рисунок 1.2.2 – Планы развития железнодорожной сети в «Стратегии развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030г» (по [30]).

Накоплен значительный статистический материал по видам деформаций, дефектам земляного полотна - их классификацией занимались видные ученые в области геологии и геофизики: Б.Н. Веденисов [31], Г.М. Шахунянц [32], Г.М. Моченов и В.П. Титов [33], В. И. Грицык [34], Т.Г. Яковлева [35].

Обобщая работы разных ученых, можно выделить 4 основных подхода к классификации дефектов и деформаций земляного полотна:

- 1) по месту проявления;
- 2) по причинам, их вызывающим;
- 3) по внешнему характеру;
- 4) комбинированно, чаще всего, по внешнему характеру деформаций и по месту их проявления.

Рассмотрим четвертый комбинированный подход. Согласно «Справочнику по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог» [36] среди этой категории можно выделить 4 группы деформаций: I группа — основной площадки; II группа — насыпей из-за суффозионного разрушения грунтовыми водами (вынос мелких частиц грунта); III группа — тела земляного полотна: расползание насыпи — постепенное смещение откосных частей насыпи из-за оседания основной площадки на оттаивающих вечномёрзлых грунтах и изменение их геометрии; сползание насыпи по наклонному основанию на косогорах; оседание насыпи — постепенное опускание основной площадки без изменения основных очертаний из-за уплотнения слагающих ее грунтов; IV группа — основания земляного полотна: оползень — смещение грунта под действием силы тяжести в сторону понижения рельефа; оседание основания насыпи — оседание поверхности без боковых смещений, происходящее из-за недостаточной прочности слагаемых грунтов, и постепенного их уплотнения; провалы — катастрофичные деформации, вплоть до внезапного разрушения, вызываемого разрывом торфяной корки на болотах или размывом сводов карстовых пустот; просадка над горной выработкой — происходит обрушение кровли над горными выработками в шахтах из-за дополнительного динамического воздействия на нее движущихся составов [36]. Основные виды остаточных деформаций земляного полотна представлены в таблице 1.

Таблица 1 Основные виды остаточных деформаций земляного полотна

Вид деформации	Причины возникновения	Внешние проявления и процесс протекания	Методы наблюдения
<p>балластное корыто (<i>одностороннее или двустороннее углубление в глинистых грунтах заполненное балластными материалами</i>)</p> <p>Разновидности: балластное ложе (<i>замкнутое, углубление, образующееся сразу под несколькими шпалами</i>)</p> <p>балластный мешок (<i>изолированное углубление, вдоль пути, достигает нескольких метров в длину, возникает при нарушении дренажных систем</i>)</p> <p>балластные гнёзда (<i>балластные мешки или ложа, с развитыми в них отростками-карманами</i>)</p>	<p>1) неравномерная передача давления через шпалы от подвижного состава из-за несоответствия мощности балластного слоя получаемым нагрузкам</p> <p>2) низкая прочность грунтов, из которых сооружена основная площадка земляного полотна</p> <p>3) при недостаточной защите грунтов от переувлажнения при оттаивании, выпадении атмосферных осадков или от грунтовых вод, скапливающихся в углублениях основной площадки</p>	<p>а) часто повторяющиеся просадки пути;</p> <p>б) выплески;</p> <p>в) появление трещин вокруг шпал,</p> <p>г) просачивание воды из тела насыпи на откосы и наличие на откосах ярко зелёной растительности;</p> <p>д) выпучивание откосов;</p> <p>е) появление продольных трещин по концам шпал или вдоль обочин земляного полотна;</p> <p>ж) появление пучин. Балластное корыто является скрытым и наиболее распространённым дефектом ж/д насыпей, в меньшей степени — выемок.</p>	<p>систематическое наблюдение за неустойчивыми участками, где выявлены даже незначительные нарушения, особенно в межсезонье, в период оттаивания грунта и ливневых дождей; проверка толщины балластного слоя; визуальное и инструментальное обследование поддерживающих и водоотводных сооружений; в периоды дождей и весеннего таяния в дренажных колодцах производятся замеры накопленной воды, а также интенсивность стока ливневых вод водоотводных каналов, лотков; нивелировка по контрольным точкам, визирование по выставленным створам, бурение для выявления состояния грунта</p>

<p>выпирание грунтов в выемке (<i>оседание или поднятие основной площадки слабого грунта при резком напряжении разуплотненных пластичных грунтов</i>)</p>	<p>пластические деформации грунта, при которых происходит его выпор вбок, происходящие в результате выдавливания разуплотненных глинистых грунтов, давлением масс плотного грунта высоких откосов, а также наличия выемок, образующих неравномерные поднятия грунтов в основании.</p>	<p>наблюдаются на насыпях при слабых грунтах в основании и под основной площадкой. Признаками определения выпирания являются интенсивные просадки и перекосы пути; вспучивание откосов насыпи; трещины и выпирающие валы на поверхности балластных слоев; изменение конфигурации опор контактной сети и т.п.</p>	<p>визуальное обследование обочин земляного полотна, отслеживание изменений геометрии откосов выемки и состояния системы водоотводов</p>
<p>пучины (<i>неравномерные поднятия поверхности грунта, приводящие к изменению геометрии рельсовых нитей в продольном и поперечном направлениях, к образованию горбов, впадин, перепадов</i>)</p>	<p>обводнение грунтов в предзимний период приводит к их промерзанию и льдообразованию при низких температурных режимах и к образованию неравномерного морозного пучения</p>	<p>нарушение спокойного хода поезда при прохождении деформированного, вспученного участка полотна: визуально наблюдаемое провисание рельсов над такими участками; продольные трещины снежных покровов на откосах; деформация грунтов в виде выпирания, выплесков; нарушения технических эксплуатационных характеристик кюветов,</p>	<p>из-за непрерывного роста пучин, вызываемых низкими зимними температурами производится постоянный замер высоты поднятия головок рельсов по определенному регламенту; по визуальным наблюдениям определяют местоположение пучины (или пучинного участка), величины пучинных горбов (или впадин); измеряют толщины пучинных подкладок на каждой шпале; высчитывают скорости нарастания и оседания пучинных неровностей, суммируя пучения всех слагающих грунтов</p>

		канал и лотков, изменение их геометрии	
весенняя пучинная просадка (<i>резкая локальная деформация колеи железнодорожного пути в продольном и поперечном направлении</i>)	деформации верхнего слоя в связи с интенсивным оттаиванием грунтов основания, усиливающиеся при движении поездных составов; пучение более 40-50 мм резко снижает несущую способность выстилающих грунтов; интенсивные атмосферные осадки в совокупности с неудовлетворительным отводом грунтовых вод и этих осадков, приводящих к дополнительной деформации полотна	неравномерные просадки рельсов; появление толчков и перекосов, вызывающих нарушение уровня полотна и изменение геометрии его поперечного сечения; разжижение грунта основания шпал; смещение откосов; просачивание воды на поверхность откосов и скапливание ее между шпал	в период таяния снега с последующим оттаиванием грунта оснований определяются, вызванные ими, участки пучинных просадок; инспекция состояния земляного полотна и всех водоотводящих систем
осыпи (являются продуктами эрозии и выветривания на более крутых склонах, переносимыми к подножию откосов земляного полотна)	эрозия насыпных поверхностей из-за некачественного функционирования водоотводных устройств; выветривание насыпных слоев откосов, состоящих из слабых пород, особенно на склонах большой крутизны	образование скоплений мелких частиц грунтов у основания откоса и (или) склона; мелкая растительность, забивающая образовавшиеся трещины на откосах; значительные перемещения переувлажненных поверхностей откоса при наклоне поверхности откоса большим или равным углу склона	выявление критичности состояния образовавшихся осыпей; организация защитных сооружений; выявление зон возможного поступления скальных обломков; систематическая проверка рабочего состояния водоотводных сооружений

<p>Вывалы одиночных скальных обломков из откосов выемок или склонов скального массива;</p>	<p>нарушение технологии зачистки откосов выемок при строительстве и в процессе эксплуатации; интенсивное выветривание слабых слоев скальных пород; тектонические нарушения структуры скальных пород в результате землетрясений или проведения взрывных работ</p>	<p>скопление щебенистых и каменных обломков у основания откоса выемки, нависающие скальные карнизы, окруженные слабыми породами; появление новых раскрывающихся трещин, потенциально опасные для отделения крупных частей скального массива.</p>	<p>систематическое визуальное обследование скальных откосов (склонов); фиксация признаков неустойчивости массивов (карнизов, останцев и др.) с привлечением специалистов-верхолазов; анализ выявленных нарушений с целью организации профилактической зачистки ослабленной поверхности скальных грунтов</p>
<p>обвалы (<i>обрушения скальных пород откосов полотна, проложенного в скальных выемках</i>)</p>	<p>природные факторы – такие как образование трещин и дроблению под воздействием сильного выветривания; техногенные факторы – массовые взрывы при строительстве тоннелей или выемок, создающие ослабленные зоны в скальных породах; нарушение технологии зачистки откосов; сильное раздробление пород скальных массивов может привести к катастрофическому обрушению пород и полному загромождению пути скальными обломками.</p>	<p>скопление скальных обломков у оснований откосов, в траншеях и возле защитных валов, с возможным загромождением самого железнодорожного пути; наличие нависающих карнизов, напластований слоистых пород, близкое расположение неустойчивых глыб, неуклонно отделяющихся от основного скального массива</p>	<p>систематическая проверка состояния откосов и склонов на предмет появления новых трещин, отслаивающихся фрагментов скальных пород; наблюдение за степенью подвижек отдельных глыб и оценка прочности нависающих карнизов; неусыпный контроль технического состояния защитных и противообвальных сооружений ; организация противообвальных команд скалолазов, осуществляющих надзор</p>

<p>смещение насыпей (медленное смещение полотна насыпи, расположенного на наклонной каменной россыпи (куруме) в направлении движения)</p>	<p>скальные обломки имеют слабое подвижное сцепление, усугубляемое их смачиванием грунтовыми водами и атмосферными осадками; расположение полотна на крутых склонах</p>	<p>уменьшение высоты насыпи с расползанием ее в ширину; из-за смещения полотна, вслед за движением курума в направлении движения – происходит искривление рельсовой колеи; в верхней части глыбового развала нередко наблюдается просадка пути из-за осколочных скальных пород вниз по склону</p>	<p>постоянный анализ состояния земляного полотна; систематическое наблюдение за технической исправностью водоотводных сооружений; при обнаружении неисправности скорейшее их устранение, а в крайних случаях, для обеспечения безопасности движения, уменьшение скорости движения составов</p>
<p>расползание насыпи (медленное оседание насыпи, сопровождающееся смещением и изменением первоначальной геометрии основной площадки и откосов в горизонтальном направлении)</p>	<p>грубое нарушение технических условий возведения насыпи из переувлажненных грунтов; сооружение насыпи в зимнее время грунтами со значительными включениями мерзлых комьев глины, кусков льда и снега; недостаточное исходное уплотнение грунта и последующее его проседание вследствие динамических нагрузок на полотно движущимися составами; при сложении насыпи пересушенными неуплотненными грунтами</p>	<p>постепенная просадка основной площадки и, расположенных на ней, рельсовых нитей; уменьшение высоты насыпей с соответствующим увеличением ширины ее основания; изменение первоначальной геометрии откосов с образованием в их покровной толще трещин и выпучиваний; интенсивное оседание грунтов, особенно вблизи</p>	<p>расчет величины оседания насыпи по сравнению с первоначальным верхним строением пути; контроль технического состояния и проверка работоспособности водоотводящих сооружений; проведение визуальных и инструментальных наблюдений за изменением геометрических очертаний откосов полотна</p>

	происходит их излишнее насыщение водой, что приводит к ее оседанию	водоотводящих сооружений	
оседание насыпи, вызванные уплотнением слагающих ее грунтов	набухающие и просоленные грунты (гумуссированные, засоленные), заложенные в основание насыпей; нарушение структуры составляющих грунтов, вызванные несоблюдением технологии их укладки и низким коэффициентом уплотнения; нарушение требований содержания железнодорожного;	значительное понижение продольного профиля пути; просадка пути; длительное оседание насыпей, особенно возле водоотводящих систем и мостов; искажение очертаний откосов; продольные трещины на откосах, застой воды у их основания; выпирание грунта основания полотна; повышенная вибрация подвижного состава при прохождении таких участков	усиление надзора за вероятными просадками пути в период интенсивных дождей и весеннего оттаивания грунта; тщательный осмотр поверхностей откосов насыпей, особенно в местах появления трещин в грунте; систематический осмотр и контроль работоспособности водоотводных и защитных сооружений
осадки и расползание насыпей на оттаивающих вечномерзлых грунтах (<i>оседание пути в процессе оттаивания сезоннопромерзающего слоя</i>)	слоистость вечной мерзлоты, с неравномерным оттаиванием ее слоев; вытаивание линз льда и кусков мерзлого грунта, заложенных при строительстве; выдавливание талого пластичного слоя глинистых и смешанных с песком и скальными обломками грунтов под	изменение первоначальных очертаний основной площадки, откосов насыпи, при оседании полотна пути; неравномерное изменение продольного профиля с критическим понижением отдельных участков; предельное уменьшение верхней части насыпи;	систематическое наблюдение, применяя инструментальные измерения, за состоянием земляного полотна, особенно в местах значительных осадок во избежание скоротечно протекающих провалов насыпей;

	<p>воздействием динамических нагрузок движущихся составов; нарушение допустимых пределов оттаивания грунта для данного типа основания пути; несоблюдение технологии отсыпки насыпей, ускоряющее расползание</p>	<p>трещины на откосах, застой воды в канавах у их основания, образование термокарстовых озер; выпирание грунта основания полотна;</p>	
<p>сдвиг (сползание) насыпи или ее низовой части по наклонному основанию</p>	<p>конструкции, ранее возведенных земляных полотен не соответствуют современным нормам; нарушение проектной подготовки основания насыпи на этапе строительства; устройство насыпи на недопустимом уклоне дренированного дна болот</p>	<p>рельсовая колея смещена вниз вместе с грунтом насыпи; значительная просадка пути в целом; продольные трещины насыпей; выпирание грунтов внизу основания под воздействием статических и динамических нагрузок</p>	<p>визуальный и инструментальный контроль границ участков нарушенной конфигурации составляющих пути; отслеживание поведения ранее обнаруженных трещин и фиксация новых; особый контроль в местах сдвига насыпи за укрепляющими сооружениями, анализ их работоспособности</p>

Деформации основной площадки земляного полотна являются одними из самых распространенных и протяженных среди других видов деформаций [2]. На рисунке 1.2.3 представлены осциллограммы напряжений на основной площадке земляного полотна в различных сечениях по длине шпалы. Так же известно, что существующие расчетные схемы для оценки устойчивости насыпей из глинистых грунтов (протяженность таких линий составляет около 40% от общей сети) чаще всего не учитывают влияния динамического воздействия поездов [10].

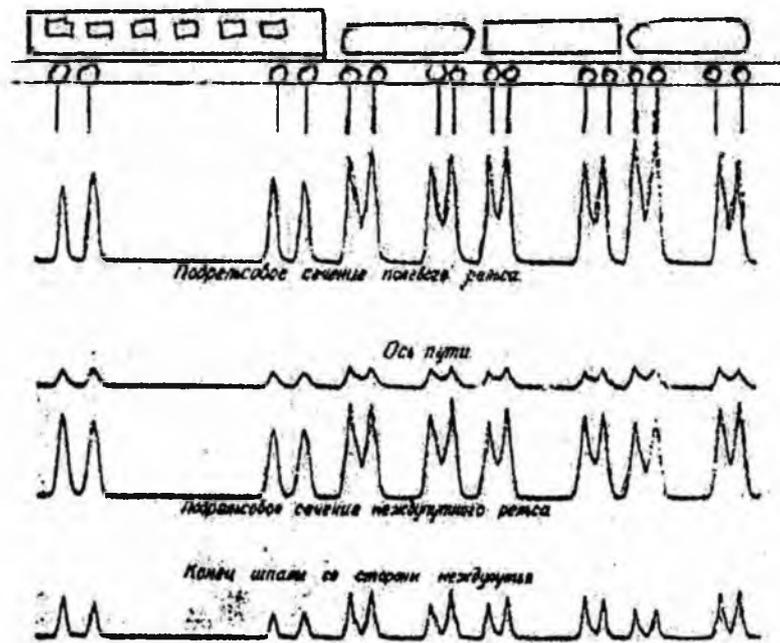


Рисунок 1.2.3 – Пример осциллограммы напряжений на основной площадке земляного полотна в различных сечениях по длине шпалы (масштаб записей одинаковый) [20]

Меры по устранению разрушений, связанных с остаточными деформациями, являются очень затратными и часто оказываются несвоевременными, и всегда требует прекращения движения на деформированных участках. Поэтому очень важно изучать процессы, предшествующие образованию остаточных деформаций и вести мониторинг упруго-деформационного состояния земляного полотна, контролировать не только пластические, но и упругие деформации, так как процессы, влияющие на свойства грунтов, протекают крайне медленно, позволяя своевременно предотвратить катастрофические ситуации.

Грунты земляного полотна обладают особыми свойствами и постоянно подвергаются различным воздействиям, которые изменяют эти свойства и их состояние, что в свою очередь приводит к деформациям.

Основных причин возникновения деформаций в земляном полотне – две: вибродинамическое воздействие движущихся составов и неблагоприятные климатические условия, связанные с их сезонными колебаниями и глобальными изменениями климата в целом.

При воздействии нагрузки на земляное полотно происходит осадка грунта, после снятия нагрузки от любого уровня напряжений происходят как упругие деформации, возвращающие грунты в исходное состояние, так и наиболее опасные – пластические. Последние происходят при воздействии на грунты интенсивных касательных напряжений [37]. Состояние пластического деформирования возникает при достижении предельного значения касательных напряжений, возникает, так называемое, течение грунта.

Это говорит о том, что развитие пластических деформаций приводит к сдвиговому разрушению грунта и полной потери им прочности. Такое состояние называется предельным. С большей нагрузкой, а, следовательно, с увеличением действующего на полотно давления - грунт основания проходит все три стадии от упругого (линейно-деформированного) состояния в пластическое (линейно-деформированное) и, наконец, в предельное текучее состояние. Состояние грунта, в зависимости от величины действующей нагрузки, классифицируется как допредельное и предельное [38].

Таким образом, важной задачей является не допустить переход грунта в предельное текучее состояние и обеспечить эффективный мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния грунтов земляного полотна. Для этого необходимо разобраться, какие процессы в грунтах являются наиболее опасными и какие грунты наиболее уязвимы к развитию деформаций.

К особым структурно неустойчивым грунтам, таким, которые при определенных условиях достаточно быстро деформируются, относятся [39, 40]:

- лёссовые грунты состоят из макропористых осадочных пород, легко деформирующихся при увлажнении и под воздействием нагрузки;
- мерзлые и вечномёрзлые, достаточно прочные грунты, но подвержены нарушениям структуры при сезонном оттаивании;
- рыхлые пески с небольшой степенью водонасыщения резко уплотняются при динамических воздействиях;
- илы и чувствительные глины, характеризующиеся высокой влажностью, как правило, недоуплотненные и легко разжижаются даже при небольших нагрузках;
- набухающие грунты – структурно неустойчивые грунты, подверженные резкому изменению структуры при увлажнении, увеличению в объеме;
- торфы и заторфованные грунты - обладают очень низкой плотностью и, соответственно, большой степенью сжатия и низкой прочностью под воздействием нагрузки.

Земляное полотно, обустроенное на участках вечномёрзлых грунтов, подвергается значительной степени деформаций. Несмотря на то, что вечномёрзлыми называют грунты с отрицательной температурой, не подвергающимися сезонными колебаниями, в связи с глобальным потеплением, сегодня и они подвергаются негативным криогенным процессам.

В России мерзлые и вечномёрзлые грунты составляют 70% всей территории. Поэтому при строительстве магистралей, проходящих частично или полностью по таким территориям, необходимо учитывать их потенциальную опасность, связанную с высокой степенью деформации таких криогенных грунтов. Осуществлять неослабный контроль состояния железнодорожного полотна и технических сооружений.

Самые распространенные криогенные деформации – температурные деформации грунтов, вызываемые увеличением объемов грунта при замерзании, и, соответственно, уменьшением его в процессе таяния. Различают морозно-пучинные деформации, возникающие при увеличении объема и морозобойное

растрескивание, вызванное сжатием породы, под воздействием низких температур [2, 42, 43].

Многолетнее оттаивание вечной мерзлоты, вызванное меняющимся климатом в совокупности с сезонными промерзанием и оттаиванием, приводит к постепенному снижению прочности грунтов [41].

Как правило, такие нарушения проявляются деформацией полотна дороги, вызывая искажение продольного профиля колеи и выявляются при визуальном осмотре, однако для установления однозначной причины возникновения этих дефектов чаще всего необходимо проводить дополнительные обследования [2].

На практике же существующие методы диагностики в районах распространения мерзлоты не всегда способны определить пучинные деформации и осадки, связанные с недостаточной прочностью оттаивающих грунтов основания.

Среди известных методов оценки осадок насыпи метод проф. Н.А. Цытовича [40] стал наиболее применяемым и, в последствии, вошел в нормативные документы [44, 45]. Но этот метод, как и другие, оценивает лишь вертикальные осадки по оси насыпи, не учитывая боковые деформации оттаивающих грунтов основания.

Кроме вертикальных деформаций под насыпями, оттаивающие грунты испытывают пластическую деформацию и перемещаются в горизонтальной плоскости [41, 46]. При исследовании земляного полотна восточной железной дороги – БАМ, были выявлены слабые глинистые связные грунты природного залегания в прослойке между основанием и подошвой насыпи, толщина их доходила до 30 см. По мнению П.И. Дыдышко, под руководством которого проводилось это обследование, такая структура вполне вероятно может вызвать пластическое течение грунта основания [41].

Оценке устойчивости земляного полотна и его основания посвящено огромное количество полевых исследований с применением современной диагностической аппаратуры, проведены теоретические исследования на основе полученных результатов. На их основе разработаны нормативные документы,

методики по оценке устойчивости земляного полотна и его оснований [2, 5, 8, 10, 46, 47, 48, 49, 50]. Существующие представления не в полной мере отражают реальные процессы, происходящие в грунтах под воздействием природно-климатических факторов и динамических нагрузок от транспорта.

1.3 Основные методы инструментального обследования состояния пути

Диагностика состояния земляного полотна осуществляется и традиционными методами, и новыми геофизическими с применением современной высокоточной измерительной аппаратуры. Обработка результатов производится с привлечением сложного математического аппарата, в том числе и численного моделирования на основе компьютерных технологий. В последнее время разработано несколько передвижных диагностических лабораторий-комплексов для оценки состояния земляного полотна: ВИГО (вагон инженерно-геологического обследования); нагрузочное устройство ЛИГО (лаборатория инженерно-геологического обследования), обеспечивающее заданную нагрузку на путь; диагностические поезда ВНИИЖТ, разработанные для различных климатических условий; самоходные и несамоходные путеизмерительные вагоны для контроля параметров пути в динамике.

Диагностика необходима для обеспечения бесперебойного и безопасного движения составов и нацелена на определение неблагоприятных изменений в земляном полотне, возникающих под воздействием меняющихся климатических условий и вибродинамических нагрузок движущегося транспорта. Результаты диагностических исследований дают возможность прогнозирования стабильности или изменчивости состояния земляного полотна в будущем.

Существующие методики диагностики нацелены на решение конкретных, но узких проблем, комплексный подход, объединяющий все требования, пока не выработан.

Традиционные методы диагностики позволяют оценить внешние признаки деформаций (эксплуатационные наблюдения и инженерно-геодезические), внутреннее строение и состояние грунтов земляного полотна (инженерно-геологические). Существенной проблемой этих методов, кроме больших временных затрат, является отсутствие возможности обследования земляного полотна под действием динамической нагрузки его реакцию в момент прохождения подвижных составов.

К геофизическим методам диагностики относятся: радиолокационный, электромеханический, электродинамического зондирования, вибрационной диагностики и сейсмические методы.

Геофизические методы используются для обнаружения аномалий физических полей. Причины аномалий: неоднородности геологического строения, изменение физических свойств и геометрических параметров слоев изучаемых объектов [20].

Источником зондирующего поля в земляном полотне могут быть искусственные воздействия, направленные на объект (тестовая диагностика) или вибрационные воздействия, создаваемые подвижным составом (функциональная диагностика).

Тестовая диагностика предназначена для оценки технического состояния железнодорожного полотна, путем воздействия тестовыми нагрузками. Дефекты в рельсах определяются путем подачи ультразвуковых или электромагнитных сигналов. Для обнаружения деформаций земляного полотна возбуждают упругие волны, используя методы сейсморазведки (ударных нагрузок типа молота по грунту); метод электроконтактного динамического зондирования (ЭДЗ); радиолокационный метод.

Области применения геофизических методов, проблемы диагностики состояния железнодорожных сооружений, решаемые с их помощью, хорошо изложены в [20].

Функциональная диагностика земляного полотна основана на изучении колебаний грунта от движущего поезда - вибрационный метод, базирующийся на исследовании взаимодействия упругих волн с грунтами земляного полотна.

Тело насыпи и грунты основания земляного полотна рассматриваются в виде системы, которая преобразует входное динамическое воздействие в выходной сигнал ее отклика на этой воздействие. В результате формируется модель состояния земляного полотна, характеризуемая различными параметрами колебаний, такими как: продолжительность во времени, времен вступления и скорости распространения волн, максимальные амплитуды и амплитудно-частотные спектры. В качестве измерительного оборудования используются различные сейсмометрические датчики, измерения обычно проводятся непосредственно в теле насыпи, под основной площадкой и у основания насыпи, и изучаются изменения среды под действием средне- и высокочастотной нагрузках от движущихся поездов [10,51].

Современное сейсмометрическое оборудование открывает новые возможности для совершенствования сейсмических методов [48, 52, 53].

1.4 Нерешенные проблемы, постановка задачи

Анализ известных методов исследования земляного полотна показывает, что:

- используемые методы обследования преимущественно нацелены на выявления сплывных и оползневых деформаций, вызывающих полные отказы земляного полотна, а также существенных криогенных деформаций, включая деформации основной площадки (пучины и деформации основной площадки в период оттаивания), также вызывающих превышение допустимого уровня деформативности [2] «Слабые» вариации деформационных параметров среды практически не исследуются.
- при изысканиях на основе сейсмических методов анализируются, как правило, кинематические характеристики записей (времена прихода волн,

т.е. скорости распространения), динамические характеристики подключаются в основном при анализе затухания волн. Опыт сейсмологического мониторинга показывает существенно большую тензочувствительность динамических характеристик (амплитуд, частотного состава) [7]. Таким образом, именно эти параметры должны служить основой для выявления слабых изменений в грунтах;

- при проведении обследований на транспорте основное внимание приковано к верхней части разреза пути, глубины ниже 5 м считаются не подверженными воздействиям поезда, т.е. не учитываются в системе «движущийся поезд-грунт» [54]. Это связано с тем, что детальные изыскания проводились месдозами, не позволяющими увидеть эти взаимодействия. Современное сейсмологическое оборудование дает такую возможность [55];
- исследование деформирования полотна при движении поезда ведется в основном по вертикали [54], а значительные горизонтальные перемещения остаются без внимания. Сейсмологические датчики позволяют одновременно регистрировать деформации по трем координатам;
- свойства грунтов в волновом поле изучалось преимущественно при высокочастотных вибромеханических воздействиях от транспорта [10], но пока недостаточно данных о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках [56].

Таким образом, встает вопрос о необходимости развития, совершенствования и дополнения существующих методов диагностики инструментального обследования и выявления новых параметров, по которым можно будет судить о начинающихся неблагоприятных процессах в земляном полотне и грунтах основания.

Задача исследования состоит в расширении данных о поведении земляного полотна и подстилающих грунтов при высокочастотных и низкочастотных воздействиях движущегося поезда с использованием современного сейсмологического оборудования и разработка, на основе анализа регистрируемых

сейсмических волновых полей, технологии сейсмического мониторинга состояния земляного полотна железнодорожных путей.

Для разработки методики сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути необходимо провести натурные наблюдения для оценки вибрационных воздействий, создаваемых подвижными составами, с применением широкополосной сейсмической аппаратуры, выполнение численного моделирования изменения НДС насыпи при малых изменениях свойств и различного состояния грунтов.

Натурные наблюдения проводилась на участке СЖД, Онежского района Архангельской области в течение двух полевых сезонов. Объектом исследований являлись изменения, происходящие в земляном полотне железной дороги.

Выводы по главе 1

Проблема деградации земляного полотна является причиной частичного и полного отказа работы ж/д пути и выхода из строя его компонентов. Инженерно-геологические и климатические условия мест расположения линий железных дорог очень разнятся, в том числе значительна площадь территорий, где распространены неблагоприятные для земляного полотна процессы и явления. Наиболее масштабными являются деформации, имеющие криогенную природу. В районах со сложными грунтовыми условиям все составные части ж/д пути испытывают значительные деформации при динамическом воздействии подвижного состава.

Важной задачей является обеспечение эффективного мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния земляного полотна. Несмотря на разнообразие существующих методов диагностики, комплексного подхода к обследованию железнодорожного пути до сих пор не существует, а также остаются неизученными целый ряд проблем, связанных с выявлением негативных изменений в грунтах на ранних стадиях.

Задача исследования состоит в расширении данных о поведении земляного полотна и подстилающих грунтов под высокочастотными и низкочастотными воздействиями движущегося поезда с использованием современного сейсмологического оборудования и, на основе анализа регистрируемых сейсмических волновых полей, разработке технологии сейсмического мониторинга состояния земляного полотна железнодорожных путей.

Глава 2 Основные представления о взаимодействии подвижного состава и грунтов основания пути

2.1 Обзор представлений и моделей

Взаимодействие пути и подвижного состава изучается давно, изучаются механические процессы, происходящие в подвижном составе при его воздействии на железнодорожный путь и на целостность самого пути.

Для определения критически важных показателей безопасного движения поездов (траектория пути, ширина колеи, скорость движения составов и их масса, статическая нагрузка железнодорожных вагонов и составов в целом) чрезвычайно важно исследование динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути.

Изучению вопросов взаимодействия элементов пути с элементами подвижного состава посвящены работы многих ученых: В.Г. Альбрехта, М.С. Боченкова, М.Ф. Вериги, О.П. Ершкова, Н.И. Карпущенко, Г.Г. Коншина, Е.С. Ашпиза, Ю.С. Ромена, А.Я. Когана, В.С. Лысюка, В.А. Покацкого, Г.М. Шахунянца, Thompson, Kouroussis, Johnson, Picoux, Houedec, Burdzik, Nowak, Zhang, Dhanasekar.

В условиях развития высокоскоростного движения поездов и увеличения объемов грузоперевозок необходимо получать точные представления о характере воздействия со стороны поездов на грунтовые среды.

Есть ряд работ, сосредоточенных на исследовании поведения грунтов земляного полотна под действием динамической нагрузки от высокоскоростных поездов [57,58]. И хотя эта тема вызывает большой интерес ученых, пока изучены лишь частные случаи, всеобъемлющего исследования динамических воздействий еще нет. В частности, пока оставлено без внимания исследование принципиальной проблемы воздействия низкочастотных волн (ниже 0.5 Гц) на грунты, тогда как от реакции земляного полотна на низкочастотные воздействия, создаваемые поездом, как раз и зависят его деформационные свойства.

Рассмотрим существующие принципы математического моделирования и аналитических представлений процессов, описывающих изменения свойств грунтов при динамическом воздействии, а также модели, описывающие взаимодействие системы «рельс-колесо».

Воздействие на земляное полотно складывается из суперпозиции высокочастотных и низкочастотных нагрузок. В первом случае это взаимодействие колес и рельсов, во втором – нагрузка от ж/д состава, аналогичная действию движущегося штампа с возможностью колебаний по горизонтали.

Схематично силовое воздействие движущего колеса подвижного состава можно разложить (по виду действия на внешнюю среду) на вертикальное и горизонтальное (поперечное и продольное).

Вертикальное давление вызывает изгиб рельсов, вызывающих, в свою очередь проседание грунта основания пути, а горизонтальное давление пытается сдвинуть грунт в поперечном направлении.

Движущийся состав оказывает на нижележащую структуру как статическое, так и динамическое воздействие. Статическое воздействие от подвижного состава рассчитывается от силы тяжести всего состава, находящегося в неподвижном состоянии. Эта сила воздействует на рельс перпендикулярно и рассчитывается на одну ось (статическая нагрузка), величины ее достигает 250 кН (25 тс) – 300 кН (30 тс). Статическая нагрузка, как одна из составляющих воздействия состава, передается, соответственно, на нижележащее земляное полотно.

Научные группы многих стран мира при исследовании поведения динамической системы «рельс–колесо» используют численное моделирование. Так в [60, 61] используется метод конечных элементов для сопоставления расчетных и измеренных данных. В [62] исследована простая модель «рельс–колесо», где контактная сила была определена в интегральной области. В [14] волновые процессы в грунте моделировались с помощью метода конечных элементов, проанализированы типы дефектов колеса, вызывающих вибрацию, для

моделирования пути была взята приближенная модель с сосредоточенной массой (lumped mass model (CLM)).

В работе [63] железнодорожный путь рассматривался, как упругое тело и проводились расчеты с применением сеточно-характеристического численного метода. Для описания состояния сплошной линейно-упругой среды в системе “движущийся состав – земляное полотно” в работе представлена разработка аналитических выражений, позволяющих решить полную систему уравнений, учитывающих возможность изменения скорости упругих волн, плотности основания и его геометрии.

Если говорить о деформационных процессах в грунтовых средах земляного полотна, то в настоящий момент число существующих моделей постоянно растет, и с развитием компьютерных технологий сами модели становятся более сложными, учитывающими все больше характеристик, присущих слабым грунтам. Наиболее известные модели представлены в таблице 2 [64].

Таблица 2 Модели деформационного поведения грунтов (на основе [64])

№	Название модели	Допущения	Преимущества	Недостатки
1	Модель теории линейного деформирования грунта [65, 66, 67, 68]	Зависимость при однократном нагружении между напряжениями и деформациями линейна	Простота аналитических соотношений	Модель пригодна для ограниченного набора грунтов
2	Теория нелинейного деформирования грунта [69, 70, 71 и др.]	Основана на теории малых упругопластических деформаций	В инженерной практике дает приемлемые результаты расчетов	Определение параметров уравнений состояния, необходимые для расчета, требуют сложных экспериментов
3	Теория фильтрационной консолидации [65, 66, 69]	Напряжение в грунте распределяется на скелет грунта и поровое давление	Развитый аналитический аппарат	Применима только к полностью водонасыщенным грунтам
4	Идеально-упруго-пластическая модель (модель Мора-Кулона)	Основана на гипотезе Мора о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения и гипотезе Кулона, представляющей, что эта зависимость обусловлена внутренним трением в твёрдом теле	Быстрые, простые расчеты, пригодные для первоначального анализа.	Ограничение модели при достижении предельных состояний сопротивления сдвигу грунта. Подходит только для допредельных состояний грунта.
5	“Шатровые” модели. Модифицированная модель Cam-Clay	Грунт рассматривается как упруго-пластический материал, в котором деформации грунта полностью обратимы	Простой аналитический аппарат, с небольшим количеством требуемых параметров	Рассчитанные сдвиговые деформации грунта не всегда соответствуют данным, полученным реальными измерениями.

6	<p>Модель упрочняющегося грунта Hardening Soil Model</p>	<p>Модель строится на предположении, что изменение жесткости происходит только при первичном трехосном нагружении – принимается гиперболическая зависимость между вертикальной относительной деформацией и девиатором напряжений. При разгрузке или повторном нагружении эта зависимость становится линейно-упругой.</p>	<p>Возможность моделирования нелинейной деформации и переуплотнения грунтов основания</p>	<p>Сложность математического аппарата. Невозможность использования для расчетов оснований из сильносжимаемых грунтов. Не позволяет моделировать динамические процессы.</p>
7	<p>Комбинированная вязко-упругопластическая модель [72]</p>	<p>Принимается, что до наступления предельного равновесия в модели происходят только упругие деформации, а после – только пластические, необратимые формоизменения.</p>	<p>Простая модель, использующая стандартные параметры, получаемые в традиционных инженерно-геологических изысканиях.</p>	<p>Получение параметров расчета требуют длительных лабораторных и натурных испытаний, допущения часто имеют эмпирическое, а не научное обоснование.</p>

Данные модели описывают деформационное поведение сплошной среды, как линейное, так и нелинейное. Однако, линейные модели деформации грунтов имеют ограниченную сферу применения, их допустимо использовать лишь при небольших изменениях давления в грунтах. Идеально-упруго-пластическая модель Мора-Кулона, приведенная в таблице 2, была использована на первом этапе решения проблемы, представленной в данной работе.

В таблице 3 представлены методы, применяемые для расчета деформаций и осадок грунтов насыпей и их оснований [64].

Таблица 3 Методы, применяемые для расчета деформаций грунта (на основе [64])

Наименование метода	Достоинства метода	Недостатки метода	Область применения
Метод послойного суммирования [72], [73]	Достоверная оценка многослойных оснований при моделировании	Применить послойного суммирования для связанных грунтов - ограничено	Многослойные основания осадок грунтов, ограниченных размеров
Метод эквивалентного слоя [74]	Достаточная практическая точность при проектировании строительных объектов	Применим для определения осадки только для упругого слоя фундамента и ограничен для связанных грунтов.	Расчет конечных осадок и их развитие во времени и для многослойных упруго деформируемых грунтов.
Билинейная (упругопластическая модель) [75]	Применяется для интегрированного расчета как упругих, так и пластических деформаций грунта.	Не применим в условиях вероятного возникновения резкого повышения текучести грунтов.	Проектирование фундаментов технических сооружений на упруго-пластичных грунтах
Модель Винклера: допущение – прямая зависимость между давлением и осадкой [76]	Применима для некоторых видов упрочняющихся грунтов	Модель неприменима для плотных, скальных грунтов	Создание моделей при проектировании сооружений на рыхлых и несвязных оснований
Двухконстантная модель [76]	Физические и механические характеристики грунтов используются в качестве	Высокая степень упрощения реакции грунтов основания на внешние воздействия.	Модель широко распространена, реализована во множестве компьютерных программ

	параметров расчетной модели		
Метод расчета осадки основания на структурно-неустойчивых грунтах [77]	Метод показал достаточную практическую значимость для исследования структурно-неустойчивых грунтов – с резко меняющейся структурой под воздействием нагрузки.	Определение параметров грунтов – трудоемкий, длительный процесс	Используется при расчете оснований структурно неустойчивых основаниях: на лессовых грунтах, замачивающихся под воздействием нагрузки, вечные и вечномерзлые грунтовые основания
Метод расчета осадки на основе вязко-упруго-пластической модели [78]	Метод позволяет получить величину конечных осадок для сложнопрогнозируемых пластических деформаций, длительно развивающихся во времени	Большая трудоемкость метода обусловлена сложностью определения параметров грунтов	Применяется при расчете нелинейных деформаций глинистого грунта при осадке сооружений
Усложненные модели расчета осадки на основе численных методов (МКЭ, МГЭ и др.)	Сложный математический аппарат дает возможность учитывать реальную нелинейность и неоднородность структур грунтов	Усложнение моделей расчета соответствующего программного обеспечения	Используется для анализа состояний напряженно-деформированных неоднородных грунтовых оснований

В настоящее время для решения сложных задач механики сплошных сред применяется численный метод конечных элементов (МКЭ), в основе которого лежит решение дифференциальных уравнений с частными производными и интегральных уравнений, необходимых для решения задач прикладной физики. Создание и развитие МКЭ имеет длительную историю, на протяжении десятилетий многие ученые развивали этот метод, например: А.Ю. Хренников [79], Р. Галлагер [80], О. Зенкевич [81], Ж.-Л. Лионс [82] и другие.

Суть метода заключается в том, что двух- или трехмерная исследуемая область разбивается на конечное число элементов (малых областей), таких, что для каждого элемента можно выбрать подходящую аппроксимирующую функцию.

Первым этапом использования МКЭ является оптимально достаточная разбивка исследуемой области на комбинацию различных типов (или одинаковых) конечных элементов. Следующий важный этап – определение наиболее возможно простых аппроксимирующих функций. После чего формируется система линейных алгебраических уравнений – СЛАУ, включающую и аппроксимирующие функции конечных элементов, и их соединения в узлах, и граничные условия системы.

Алгоритмы МКЭ, представленные в качестве примера двухмерной задачи [83], в рамках теории упругости, можно применить и для трехмерной модели, имеющую аналогичную систему линейных уравнений, решаемых тем же методом.

2.2 Возможности конечноэлементных моделей на примере района исследования

Численное моделирование земляного полена железной дороги в данной работе выполнялось в программном комплексе PLAXIS 2D, работающем на основе метода конечных элементов, которая предназначена для статических расчетов напряженно-деформированного состояния, устойчивости и фильтрации в условиях плоской задачи. Геометрия слоев и основные параметры задавались по данным малоглубинной сейсморазведки на изучаемом нами объекте [17, 53].

Расчеты проводились в осесимметричной форме (половина схемы) в статической постановке, что качественно соответствует длиннопериодным колебаниям (период 100 с и более). Моделирование нелинейного, зависящего от времени и анизотропного поведения грунтов в PLAXIS осуществляется с помощью ряда моделей, достаточно полно отражающих особенности поведения грунтов при нагружении и разгрузке, являющимися математическим аналогом стандартных лабораторных испытаний грунтов. В качестве модели грунта использована упругопластическая модель Кулона-Мора, позволяющая выполнять расчет напряжений и деформаций. Поле напряжений определяется решением двумерной задачи с использованием конечных элементов треугольной формы. Матрица жесткости элементов, которая связывает силы и перемещения в узлах, определяется, исходя из минимизации полной потенциальной энергии. Система совместных уравнений, базирующаяся на общей матрице жесткости, решается для перемещения каждого узла. После определения перемещений для каждого элемента определяются напряжения.

Таким образом, становятся известными нормальные и касательные напряжения для каждой точки грунтового массива, которые позволяют определить прочность на сдвиг из условия Кулона-Мора:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (2.2.1)$$

$$\tau = -\tau_{xy}\cos 2\theta - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta \quad (2.2.2)$$

Расчет по нашему техническому заданию выполнен Е.В. Федоренко («НИИ-Информатика») [55]. В нашем расчете вес поезда задавался 40000 т.

Три модели описывают следующие ситуации. Модель I (рис. 2.2.1а) позволяет оценить НДС в различных слоях насыпи, это исходная модель для мониторинга, относительно которой рассматриваются возможные изменения НДС. Модель II (рис. 2.2.1б) – вариант сезонных изменений при зимнем промерзании,

модель III (рис. 2.2.1в) – появление обводнения или возможность деградации мерзлых грунтов. Параметры грунтов для моделирования задавались по значениям скоростей и приведены в таблице 4, приняты значения параметров, позволяющие получить необходимую в нашей задаче картину на качественном уровне. Разбивка сетки конечных элементов грубая, что позволяет получать результаты расчетов без значительных временных затрат расчета.

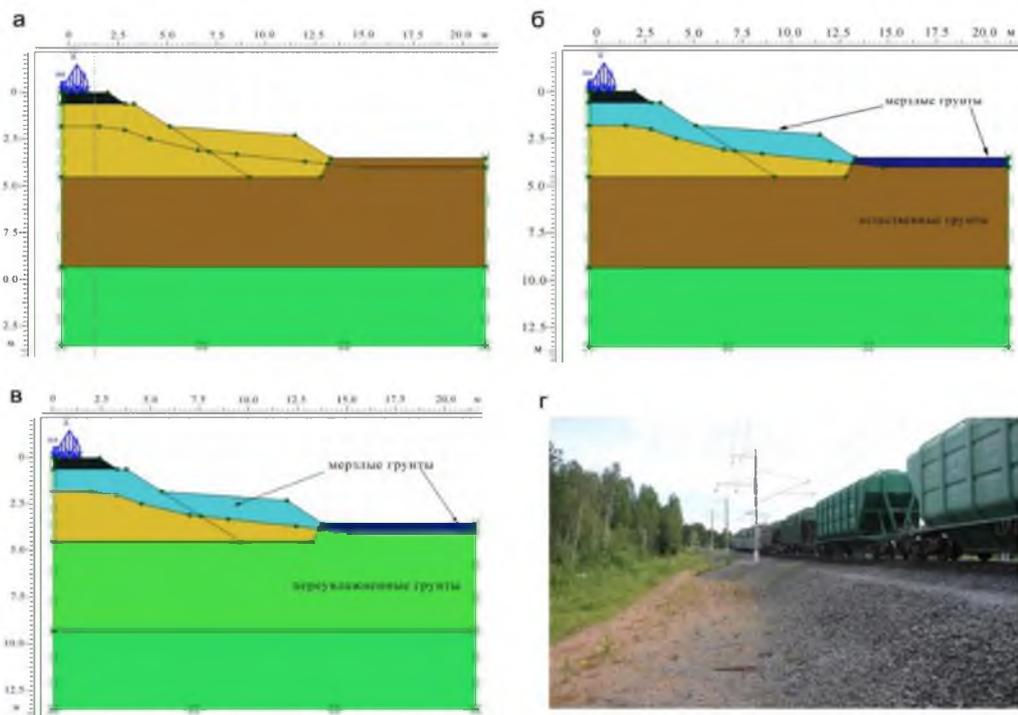


Рисунок 2.2.1 – Варианты расчетных схем, задаваемых для моделирования: а – модель I, грунты в естественном состоянии; б – модель II, глубина промерзания грунта 2 м, ниже грунты в естественном состоянии; в – модель III, глубина промерзания 2 м, ниже грунты в переувлажненном состоянии; г – фото моделируемой насыпи

Таблица 4 Расчетные характеристики грунтов [53]

Параметры	Модуль упругости, Е, кПа	Удельное сцепление, С, кПа	Угол внутреннего трения ϕ , град
Насыпь (мерзлый)	100000	–	–
Насыпь	50000	3	36
Суглинок (мерзлый)	100000	–	–
Суглинок	50000	22	19
Суглинок (увлажненный)	30000	10	12
Гравелистый грунт	100000	4	40

Были получены изополя вертикальных (Z) и горизонтальных (Y – поперек пути) смещений, объемных и сдвиговых деформаций для транспортной нагрузки для всех трех моделей (рис. 2.2.2). Объемные деформации соответствуют изменению только объема грунта без учета сдвиговых деформаций. Сдвиговые деформации определяют зоны, в которых касательные напряжения преобладают над нормальными. Как правило, эти области формируют потенциальные поверхности обрушения, контролируемые расчетами устойчивости. Это видно на рисунке 2.2.4в для модели III, где максимальные касательные деформации образуют наклонный «язык» скольжения.

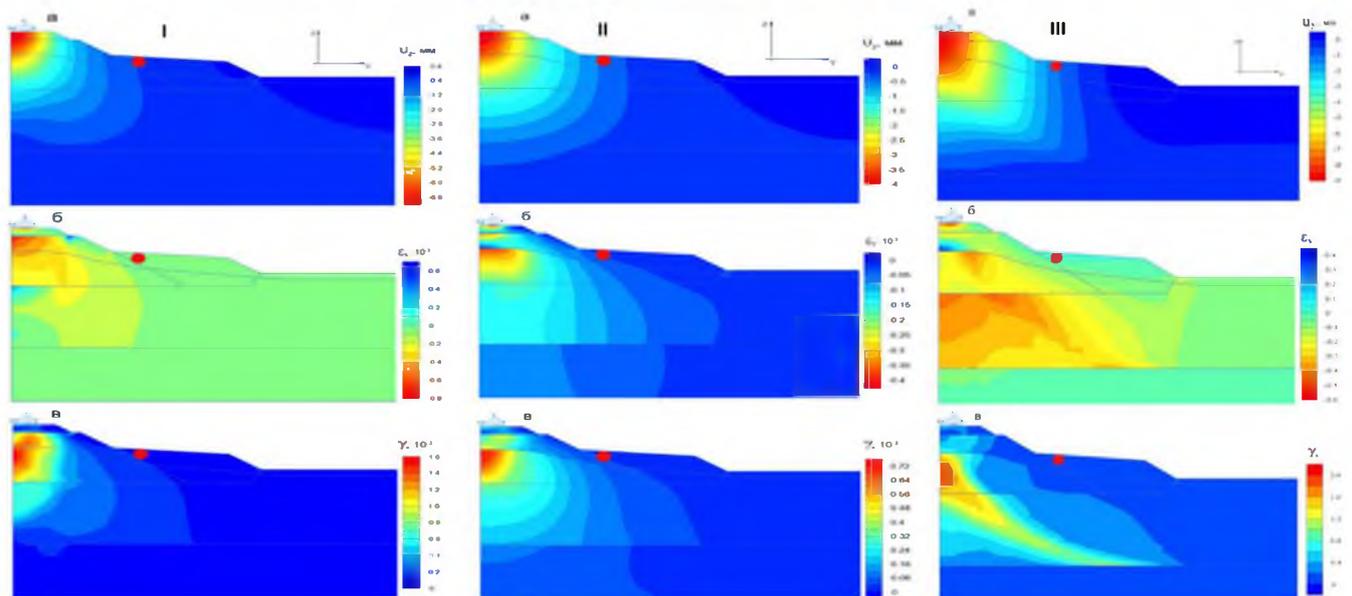


Рисунок – 2.2.2 Для моделей I, II, III изополя вертикальных смещений (а), объемных (б) и сдвиговых (в) деформаций. Красный кружок – место размещения широкополосного датчика.

Для модели III максимальное значение смещений составляет 8.9 мм и располагается в подрельсовом сечении на основной площадке. Для модели II – 3.9 мм, снижение значений по сравнению с моделью III связано с более прочными грунтами в промерзшем состоянии. Максимальные смещения в подрельсовом сечении для модели I составляют 7.1 мм, что отражает возникновение обводненного слоя. На всех моделях видно уменьшение значений смещений с расстоянием от оси пути, в месте установки широкополосного датчика оно достигает 1 мм и менее (рис. 2.2.2). Эти величины доступны для регистрации

широкополосными датчиками, в частности использованными нами ТС-120s. Таким образом, моделирование обосновывает возможность наблюдения этих явлений экспериментально.

Далее были построены изополя разности в вертикальных и горизонтальных смещениях для пар моделей (II-III, I-III, I-II) для оценки возможности регистрации изменений свойств состояния земляного полотна (например, при переходе к мерзлому состоянию или к влагонасыщенному), полученные результаты представлены на рисунке 2.2.3.

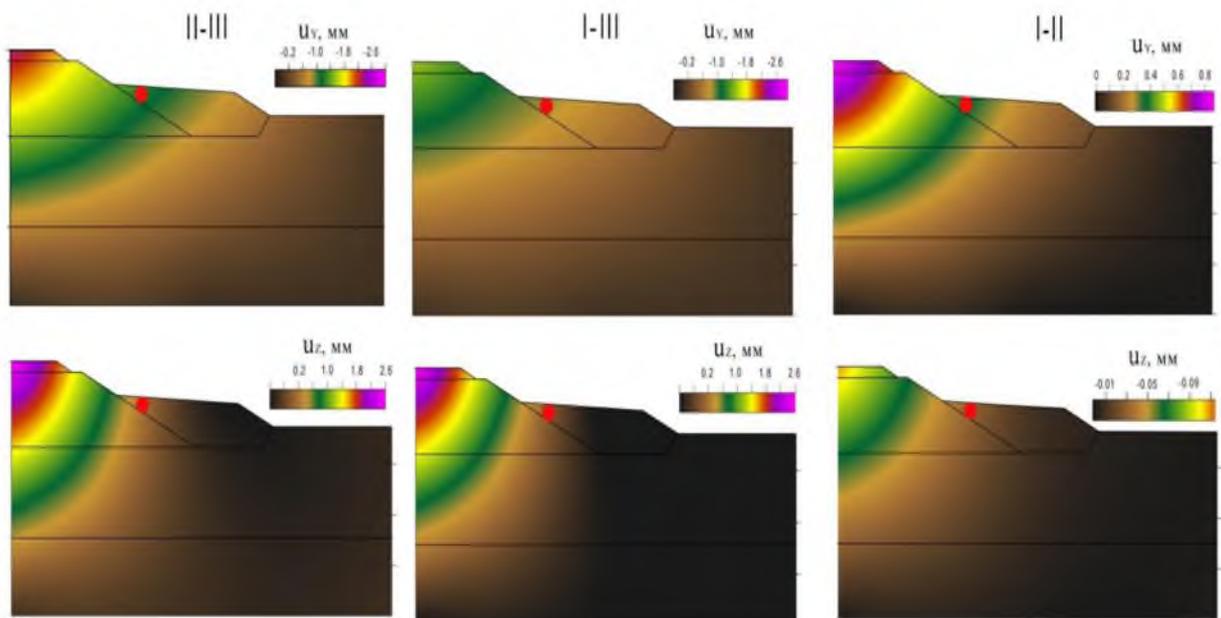


Рисунок 2.2.3 – Модели изменения изополей смещений, где цифрами показано между какими моделями находилось приращение, красный кружок – место размещения широкополосного датчика

Из рисунка 2.2.3 видно, что максимальные изменения происходят непосредственно в подрельсовой области насыпи (основная площадка) – значения от 1 до 3 мм, что и следовало ожидать. Тем не менее, в месте установки широкополосного датчика, согласно моделированию, приращение смещений составляет менее 1 мм. Учитывая, что ведется регистрация не виброперемещений, а виброскоростей на периодах около 100 с, значения будут менее 0.05 мм/с.

Данные изменения физических величин соответствуют техническим возможностям измерительной аппаратуры, что говорит в пользу их применения для решения подобных задач.

Рассмотрим вопрос о возможности экспериментального наблюдения эффектов, выявленных при моделировании. В таблице 5 для некоторых точек насыпи, где может быть размещен сейсмометр, приведены значения амплитуд вертикальных вибросмещений, виброскоростей и виброускорений для моделей I-III. Для точки установки в эксперименте проведено сравнение расчетов с реальными значениями амплитуд виброскоростей для низкочастотных составляющих. Расчетные значения виброскоростей и виброускорений были получены путем пересчета значений вибросмещений, приняв средний период колебаний за 100 с. Сопоставление результатов компьютерного моделирования и натурных наблюдений (выделено жирным шрифтом), показывает достаточно хорошую сопоставимость данных, т.е. для низкой частоты не критична детальность расчетных моделей и, вообще говоря, квазистатическое приближение. Результаты и анализ численного моделирования в среде PLAXIS 2D деформирования грунтов земляного полотна под статической нагрузкой грунтов, полученные нашей научной группой, опубликованы в [53, 55].

Таблица 5 Значения амплитуд вертикальных вибросмещений, виброскоростей и виброускорений для моделей I-III в зависимости от места установки датчика. в сравнении с экспериментальными значениями для модели II амплитуд виброскоростей в диапазоне частот ниже 0,1 Гц.

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных вибросмещений, мм, для моделей	I	7,00	6,50	1,00
	II	4,00	3,50	0,70
	III	9,00	8,00	1,70

Продолжение Таблицы 5

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных виброскоростей, мм/с, для моделей	I	0,44	0,41	0,06
	II	0,25	0,22	0,04
	III	0,57	0,50	0,11
вертикальных ускорений, мм/с ² , для моделей	I	0,03	0,03	0,004
	II	0,02	0,01	0,003
	III	0,04	0,03	0,007
экспериментальных виброскоростей, мм/с, по компонентам	X	–	–	0,07
	Y	–	–	1,48
	Z	–	–	0,04

Для более высоких частот 2–8 Гц (таблица 6) расчетные и реальные значения амплитуд не совпадают. Более того, разницу в моделях III и II можно уподобить возникновению обводнения (III), ситуация 2019 г., при этом в расчете имеем большее значение амплитуд, чем для модели II. В реальности соотношение обратное. Таким образом, для частот 2–8 Гц квазистатическое приближение не удовлетворяет результатам эксперимента.

Таблица 6 Значения амплитуд вертикальных виброскоростей (мм/с) в месте установки датчика для моделей II и III в сравнении с экспериментальными значениями амплитуд виброскоростей в диапазоне частот 2–8 Гц

Значения амплитуд:		Подрельсовое пространство (основная площадка)	Основная площадка, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)	Берма, основание откоса, глубина 2 м (ниже уровня промерзания)
вертикальных вибросмещений, мм, для моделей	II	4,00	3,50	0,70
	III	9,00	8,00	1,70
вертикальных виброскоростей для моделей	II	50.4	44	8.8
	III	113	100.5	21.4
эксперимент 2017 г.	X	–	–	
	Y	–	–	4
	Z	–	–	3.1
Эксперимент 2019 г.				
	Y			3.2
	Z			1.8

Математическое моделирование дает понимание роли различных существенных изменений в состоянии грунтов на величины смещений в массиве на качественном уровне [55]. Также численные методы позволяют оценить необходимую чувствительность датчика, чтобы выявить те или иные процессы в среде. Однако, чтобы учесть все разнообразие грунтовых условий и ситуаций их изменения, для понимания возможности мониторинга опасных явлений на ранней стадии, придется рассматривать огромное количество моделей, но это не даст ясности в том, что мы можем наблюдать экспериментально. Более эффективным кажется путь получения аналитических решений задачи деформирования насыпи, включающие параметры, характеризующие грунты.

2.3 Модель для деформирования грунта по вертикали (задача Буссинеска)

Рассматриваемая теоретическая задача является, вообще говоря, динамической. Однако, если принять во внимание характерные размеры, скорость нарастания нагрузки и скорость распространения упругих волн, то хорошим приближением будет процесс, проходящий через множество равновесных состояний. Иными словами, в теоретическом исследовании будут использоваться статические задачи, в которых время играет роль параметра. Данный подход для деформирования грунтов движущимся поездом был предложен д.ф.-м.н. И.П. Добровольским, с теоретическим моделированием в программе MAPLE и нашим участием при задании параметров среды и вариантов расчета с последующим обсуждением применимости модели [84].

Общая схема задачи приведена на рисунке 2.3.1. В декартовой системе координат (x, y, z) полупространство занимает область $z \geq 0$. На полупространстве расположена насыпь, имеющая в сечении форму трапеции, в которой высота значительно меньше ширины. По существу, это толстая пластина со скошенными краями. Нагрузка приложена к верхней плоскости насыпи, и насыпь является объектом передачи нагрузки на поверхность полупространства.

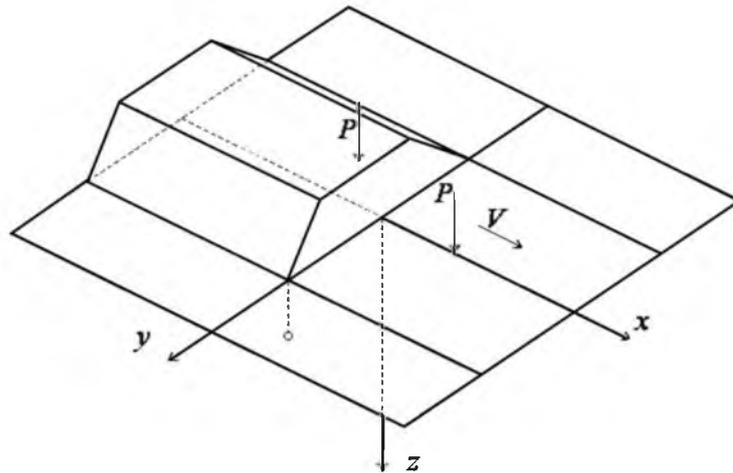


Рисунок 2.3.1 – Схема задачи деформирования грунта. Светлый кружок – датчик

Ниже будут обсуждаться разные формы передачи нагрузки. В итоге, мы получаем задачу о деформировании полупространства под действием системы сил, приложенных к поверхности. Полупространство считается линейно–упругим, и мы полагаем, что особенно в случае опасных процессов на ранней стадии для такого допущения имеются достаточные основания. Кроме того, полупространство принято изотропным, однородным, а нагрузки – вертикальными. Важно отметить: задача исследуется только для датчика, расположенного вне зоны приложения реальной нагрузки.

Нагрузку на рельсы и далее осуществляют колесные пары. Следовательно, элементом нагрузки является нагрузка от одной колёсной пары, и прежде всего, будет рассматриваться этот случай. Действие нескольких элементарных нагрузок, в том числе, распределённых по площади вычисляется по принципу суперпозиции. В таком приближении для рассматриваемой проблемы исходной становится задача Буссинеска. Задача Буссинеска – это статическая задача о вертикальной сосредоточенной силе, приложенной к поверхности линейно-упругого, однородного изотропного полупространства. Задача рассматривается в декартовой системе координат (x, y, z) для полупространства $z \geq 0$. Вектор перемещения \mathbf{u} имеет компоненты (u, v, w) вдоль осей (x, y, z) соответственно.

Решение задачи Буссинеска для перемещений имеет вид [85]:

$$\begin{aligned}
u &= P(X, Y) \frac{x - X}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right) \\
v &= P(X, Y) \frac{y - Y}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right) \\
w &= P(X, Y) \frac{1}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right)
\end{aligned} \tag{2.3.1}$$

где P – вертикальная сила, μ – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, (x, y, z) – координаты точки датчика, (X, Y) точка приложения силы, $R = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2}$

Изотропная среда характеризуется двумя независимыми модулями. Между различными вариантами этих модулей имеются определённые соотношения [86]:

$$\begin{aligned}
\mu &= \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \\
\lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2\nu\mu}{1-2\nu}, \quad E = \frac{9\mu K}{3K + \mu}, \quad \lambda = K - \frac{2}{3}\mu
\end{aligned} \tag{2.3.2}$$

где λ, μ – постоянные Ламе, E – модуль Юнга (модуль продольной упругости), K – модуль объёмного деформирования (объёмный модуль). Соотношения (2.3.2) позволяют выбрать для конкретной задачи наиболее удобную пару модулей.

Подвижная сосредоточенная сила. Предположим, что движущийся объект моделируется сосредоточенной силой. Предполагается также, что эта сила без изменений (например, диссипации) переносится на поверхность полупространства. Тогда на поверхности мы рассматриваем силу P , движущуюся вдоль оси x со скоростью V . Точка наблюдения расположена на оси y . Следовательно, в третьей формуле (2.3.1) полагаем $X=Vt$, $Y=0$, $x=0$. Итак, имеем смещение и скорость смещения в виде

$$\begin{aligned}
w &= \frac{P}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right) \\
\frac{dw}{dt} &= -\frac{PV^2t}{4\pi\mu} \left(\frac{3z^2}{R^5} + \frac{2(1-\nu)}{R^3} \right)
\end{aligned} \tag{2.3.3}$$

где $R = \sqrt{(Vt)^2 + y^2 + z^2}$.

В формулах (2.3.3) момент $t=0$ соответствует положению, когда сила находится напротив датчика. Если вместо Vt подставить $Vt-l$, то получим силу,

движущуюся на l метров позже силы с Vt . Таким приёмом можно получить результат от одновременного действия нескольких сил.

Подвижная сила, распределённая по площади. Наиболее точно будет отражать реальность ситуация с произвольной нагрузкой по площади.

В общем случае считаем, что действует распределённая по площади S нагрузка плотностью $q(x,y)$. Размерность q – Н/м². Тогда общая сила

$$P = \iint_S q(x,y) dy dx \quad (2.3.4)$$

Третья формула из (2.3.1) получает вид

$$w_1(X,Y,t) = \frac{q(X-Vt,Y)}{4\pi\mu} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \quad (2.3.5)$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y-y)^2 + z^2}$.

В итоге смещение определяется формулой

$$w = \iint_{S(t)} w_1(X,Y,t) dY dX \quad (2.3.6)$$

Колебательная скорость (амплитуда на записи велосиметра) определяется как производная по времени от этого выражения.

Конкретный вид (2.3.6) зависит от вида нагрузки и формы области. Ниже рассмотрим два частных случая. Формулы для них получаются более конкретными, что позволяет относительно простыми способами оценить реальную ситуацию.

В случае нагрузки, равномерно распределённой по длине в прямоугольнике $L \times 2b$, полная нагрузка имеет вид

$$P = L \int_{-b}^b q(y) dy \quad (2.3.7)$$

Третья формула из (2.3.1)

$$\bar{w}(X,Y) = \frac{q(Y)}{4\pi\mu L} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \quad (2.3.8)$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y-y)^2 + z^2}$.

Перемещение и скорость колебаний точки

$$w = \int_{Vt-L/2-b}^{Vt+L/2+b} \int_{-b}^b \bar{w}(X,Y) dY dX \quad (2.3.9)$$

$$\frac{dw}{dt} = V \left[\int_{-b}^b \bar{w} \left(Vt + \frac{L}{2}, Y \right) dY - \int_{-b}^b \bar{w} \left(Vt - \frac{L}{2}, Y \right) dY \right]$$

Для нагрузки, равномерно распределённой по площади в прямоугольнике $L \times 2b$, для третьей формулы из (2.3.1) имеем:

$$w_s(X, Y) = \frac{P}{8\pi\mu Lb} \left(\frac{z^2}{R^3} + \frac{2(1-\nu)}{R} \right), \quad (2.3.10)$$

где $R = \sqrt{X^2 + (Y - y)^2 + z^2}$.

Тогда перемещение и скорость колебаний для компоненты Z датчика:

$$w = \int_{Vt-L/2-b}^{Vt+L/2+b} \int w_s(X, Y) dY dX \quad (2.3.11)$$

$$\frac{dw}{dt} = V \left[\int_{-b}^b w_s \left(Vt + \frac{L}{2}, Y \right) dY - \int_{-b}^b w_s \left(Vt - \frac{L}{2}, Y \right) dY \right]$$

Скорость по X :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} u = & -\frac{1}{4} \frac{1}{\text{Pi} \mu} \left(P V \left(\frac{1}{(V^2 t^2 + 50)^{3/2}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1-2\nu}{\sqrt{V^2 t^2 + 50} (\sqrt{V^2 t^2 + 50} + 1)} \right) \right) \\ & - \frac{1}{4} \frac{1}{\text{Pi} \mu} \left(P V t \left(-\frac{3V^2 t}{(V^2 t^2 + 50)^{5/2}} \right. \right. \\ & + \frac{(1-2\nu)V^2 t}{(V^2 t^2 + 50)^{3/2} (\sqrt{V^2 t^2 + 50} + 1)} \\ & \left. \left. + \frac{(1-2\nu)V^2 t}{(V^2 t^2 + 50) (\sqrt{V^2 t^2 + 50} + 1)^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

Скорость по Y :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} v = & \frac{7}{4} \frac{1}{\text{Pi} \mu} \left(P \left(-\frac{3V^2 t}{(V^2 t^2 + 50)^{5/2}} \right. \right. \\ & + \frac{(1-2\nu)V^2 t}{(V^2 t^2 + 50)^{3/2} (\sqrt{V^2 t^2 + 50} + 1)} \\ & \left. \left. + \frac{(1-2\nu)V^2 t}{(V^2 t^2 + 50) (\sqrt{V^2 t^2 + 50} + 1)^2} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.3.13)$$

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными приведено в Главе 4. Здесь отметим, что данная модель дает хорошее согласие с волновыми формами вертикальной компоненты скоростей смещения на среднечастотном фильтре (единицы Гц), но не объясняет наблюдаемую нами картину для компонент вдоль и поперек пути. Тут необходима другая модель, учитывающая слой насыпи с параметрами, отличающимися от подстилающих грунтов.

2.4 Модель для деформирования грунта по горизонтали (задача Эльзассера)

Модель Эльзассера рассматривает упругий слой на вязком полупространстве и описывает распределение напряжения в среде [87]. Такая среда может моделировать насыпь и подстилающий грунт, модель дает решение в зависимости от расстояния от места приложения нагрузки и времени после воздействия, в нашем случае - поезда.

Вязкая среда может соответствовать зоне пониженных скоростей, типичной для верхов разреза. Напряжения распространяются вдоль контакта насыпь-грунт в горизонтальном направлении от ж/д пути по диффузионным законам [88]. Схема приведена на рис. 2.4.1.

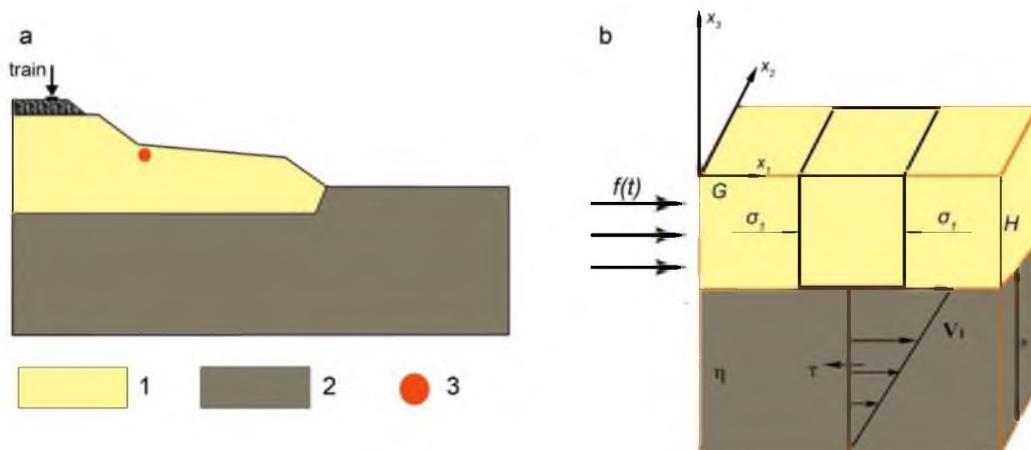


Рисунок 2.4.1 – Модель передачи напряженных возмущений, создаваемых поездом в земляном полотне в горизонтальном направлении: а - схематический разрез железной дороги, б - геометрия системы земляное полотно и возмущение его напряженно-деформированного состояния, 1 - земляное полотно, 2 - грунт (валунный суглинок), 3 - сейсмический датчик

Принимаем давление со стороны поезда $p_r = const$, оно служит источником воздействий, создаваемых в насыпи. Пусть процесс длится в течение промежутка времени T , при этом возмущения приобретают скорость $V_1(t) > 0$ и дополнительное напряжение $\sigma_1(t) > 0$. В результате необходимо определить функцию распространения по оси x возмущения $f(x_1, t)$, удовлетворяющую уравнению:

$$\frac{\partial f(x_1, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 f(x_1, t)}{\partial x_1^2}, \quad (2.3.14)$$

начальному условию:

$$f(x_1, 0) = 0 \text{ при } 0 < x_1 < \infty$$

и граничному условию

$$f(0, t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t < T \\ 0, & \text{при } T < t < \infty \end{cases}$$

Коэффициент a определяется как:

$$a = \frac{2\mu}{\eta(1-\nu)} Hh,$$

где μ – модуль сдвига, η – коэффициент вязкости, ν – коэффициент Пуассона, H – мощность насыпи, h – мощность грунта.

Задача (2.3.14) имеет аналитическое решение [86], представленное в виде:

$$f(x_1, t) = \begin{cases} \Phi^* \left(\frac{x_1}{2\sqrt{at}} \right), & \text{при } 0 < t < T \\ \Phi^* \left(\frac{x_1}{2\sqrt{at}} \right) - \Phi^* \left(\frac{x_1}{2\sqrt{a(t-T)}} \right), & \text{при } T < t < \infty \end{cases} \quad (2.3.15)$$

где

$$\Phi^*(\xi) = 1 - \Phi(\xi),$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi - \text{интеграл ошибок.}$$

Решение задачи (2.3.15) зависит от параметра a и промежутка времени T , в течение которого прикладывается возмущение.

Следует отметить, что на использование модели Эльзассера нас натолкнула работа [89], в которой она успешно использовалась для описание пространственно-

временного распределения сейсмичности платформенных территорий. Литосфера была представлена жесткой корой на упруго-вязкой астеносфере, воздействие – толчок, создаваемый землетрясениями срединно-океанического хребта. Расчеты для исследуемого участка будут представлены в Главе 4.

Выводы по главе 2

Материал, изложенный в данной главе, относится к обоснованию защищаемого положения 1. Были рассмотрены известные модели деформационного поведения грунтов и представления о взаимодействии поезда с земляным полотном. Для высокочастотного воздействия применяются модели, описывающие поведение системы «колесо-рельс», для низкочастотного – при моделировании рассматривается нагрузка от движущегося ж/д состава на грунт.

Выполненное в программном комплексе PLAXIS 2D численное моделирование поведения грунтов под действием статической нагрузки позволило выявить пространственную картину напряженно-деформированного состояния среды, а также при переборе моделей и нагрузок получить зоны изменения состояния грунта. Однако, именно описание нагрузки во времени позволяет выявить основные факторы, существенные для наблюдения изменений в грунтах. Эффективным для этих целей оказывается получение аналитических решений задачи деформирования насыпи, включающие параметры, характеризующие грунты.

Было предложены две модели: однородное деформируемое полупространство с поездом в виде движущейся силы, создающей смещения в заданной точке грунта – задача Буссинеска, упругий слой на вязком полупространстве, напряжения развиваются в среде, включающей насыпь и подстилающий грунт и распространяются по горизонтали по диффузионным законам – модель Эльзассера.

Глава 3 Экспериментальные сейсмометрические исследования земляного полотна

3.1 Описание комплекса экспериментальных исследований

Натурные наблюдения проводились на участке Северной железной дороги (СЖД) в Онежском районе Архангельской области в течение двух полевых сезонов 2017 и 2019 гг. ФИЦКИА УрОРАН. Объектом исследований являлось земляное полотно в районах заторфованных (неблагоприятных) и устойчивых грунтов. Регистрировались вибрации, создаваемые подвижными составами разного типа. Преимущественно, это были товарные поезда с количеством вагонов 50-70 шт., длительность прохождения относительно точки наблюдения составляла 60-100 с.

Инженерно-геологические условия территории Онежского района определяются равнинным и слабоволнистым характером местности, развитием на преобладающей части территории поверхностных песчано-глинистых ледниковых отложений, песчано-глинистых осадков последних морских трансгрессий, различной их мощности [90, 91, 92].

Существенным фактором, от которого зависит состояние железнодорожного полотна, являются инженерно-геологические характеристики грунтов, уровень грунтовых вод и литологический состав подстилающих пород. Согласно СП 11-105-97 [93], территория района отнесена ко II категории сложности инженерно-геологических условий. Участок исследований находится в пределах аккумулятивной равнины озерно-ледникового происхождения, приморской низменности [17]. В пределах низменных равнин залегают неоднородные, тонкослоистые, текучие глинистые водонасыщенные отложения, мощность которых колеблется от нескольких метров до 10 м [92].

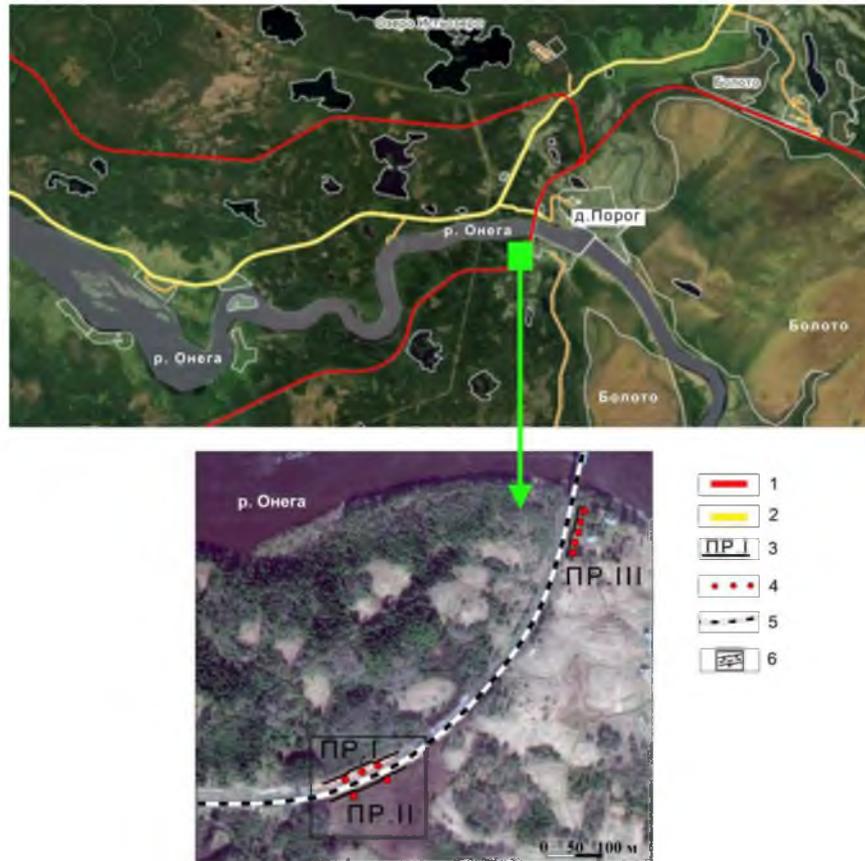


Рис. 3.1.1 Схема проведения работ: 1 – линия железной дороги; 2 – автомобильная трасса; 3 – профили малоуглубинной сейсморазведки; 4 – места установки сейсмической аппаратуры; 5 – железная дорога; 6 – участок обследования

Особенности климата района (избыточное увлажнение) и литологический состав слабопроницаемых покровных отложений характеризуют приповерхностное залегание грунтовых вод (менее 2 м). Поверхность грунтовых вод повторяет очертания пологоволнистого рельефа и местами, во впадинах между холмами и грядами, смыкается с болотными водами. На заболоченных территориях мощность торфа колеблется от десятых долей метра до 2 м. На болотных массивах мощность торфа, как правило, составляет 3-6 м, местами достигает 8-10 м. Торф подстилается обычно слабыми грунтами.

Для данного участка железнодорожной насыпи в связи с отсутствием информации об инженерно-геологических изысканиях и типе земляного полотна, исходя из общих сведениях о районе проведения работ [89, 91, 92] и СП 32-104-98 [47], было сделано предположение, что насыпь высотой до 3 м, спроектирована и

выполнена с полным или частичным удалением торфа из основания с заменой его минеральным грунтом (песчано-гравийная смесь).

В 2017 г. измерялись вибрации, создаваемые подвижным составом, на двух участках пути: неблагоприятном (А) и благоприятном (В). Неблагоприятный участок пути также характеризуется разным состоянием грунтов (АI - ослабленное, АII – укрепленное ослабленное) с целью получения сведений о смещении грунта.

Одновременно проводились традиционные структурные исследования методом малоглубинной сейсморазведки на преломленных (МПВ) и отраженных (ОГТ) волнах, профили проходили с обеих сторон вдоль насыпи. В результате были построены геолого-геофизические разрезы, определены скоростные характеристики среды, что в итоге позволило построить модель насыпи. Подробно о схемах проведения работ и результатах изложено в [17, 55].

В 2019 г. в конце апреля – середине июня были проведены длительные непрерывные наблюдения на том же участке, характеризуемым наибольшей деформируемостью. Был смонтирован автономный пункт наблюдений с записью данных на флеш-носитель в регистраторе. Электропитание оборудования обеспечено за счет солнечной электростанции [53].

Для измерения вибрации, создаваемой подвижным составом, использовались широкополосные сейсмическое оборудование, которое устанавливалось непосредственно в грунт. В качестве схемы наблюдений была принята расстановка сейсмических датчиков у основания насыпи земляного полотна в местах, допустимых по правилам безопасности на ж/д, на глубине 80 см и на расстоянии около 5 м от ж/д пути. Горизонтальные компоненты датчика ориентированы поперек (Y, направление на насыпь) и вдоль (X) пути.

Таблица 7 Параметры участков наблюдений

Обозначение участка	Сейсморазведочный профиль	Средние скорости* V_p , м/с	Характеристики основания
АI	I	350	Ослабленное
АII	II	400	Укрепленное ослабленное
В	III	650	Хорошее

* до отложения глинистых пород

Точность измерений вибраций зависит от параметров датчиков и характеристик измерительной аппаратуры. В РЖД применяют сейсмоприемники, которые широко используются на практике при структурных исследованиях, но все наблюдения вибрационного воздействия ведутся в относительно высокочастотной области (выше 10 Гц) [54, 55].

3.2 Сравнение возможностей сейсмической аппаратуры разного типа

Для проведения эксперимента принципиальным было измерение низкочастотных колебаний в полосе 0.01–0.1 Гц. Для этих частот велосиметры имеют преимущества перед акселерометрами (см. табл. 8) [53]. Помимо регистрации низкочастотных сигналов, существенна также запись более высоких частот, до примерно 20 Гц или даже выше, т.е. датчики должны быть широкополосными.

При подборе измерительного оборудования нами были рассмотрены широкополосные велосиметры двух типов – Trillium Compact 120 s с регистратором Centaur (Nanometrics, Канада) (ТС-120s) [94] и CMG-6TD (Güralp Systems Limited, Великобритания) [95], и короткопериодный датчик CMG-40T (Güralp Systems Limited, Великобритания) с регистратором GSR-24 (GeoSig, Швейцария) [96].

Перед выполнением первого цикла экспериментальных исследований были проанализированы АЧХ некоторых датчиков [55]. Наиболее полную информацию о динамике колебаний земляного полотна при вибрациях, создаваемых подвижными составами, ожидалось получить при использовании широкополосных датчиков и анализ АЧХ показывает, что наиболее эффективно должен оказаться датчик ТС-120s (рисунок 3.2.1) [55].

При этом в первый цикл наблюдений в 2017 г. решено было использовать в эксперименте два датчика (ТС-120s и CMG-6TD) для сравнения и обоснования выбора оптимального использования для мониторинга земляного полотна железнодорожного пути.

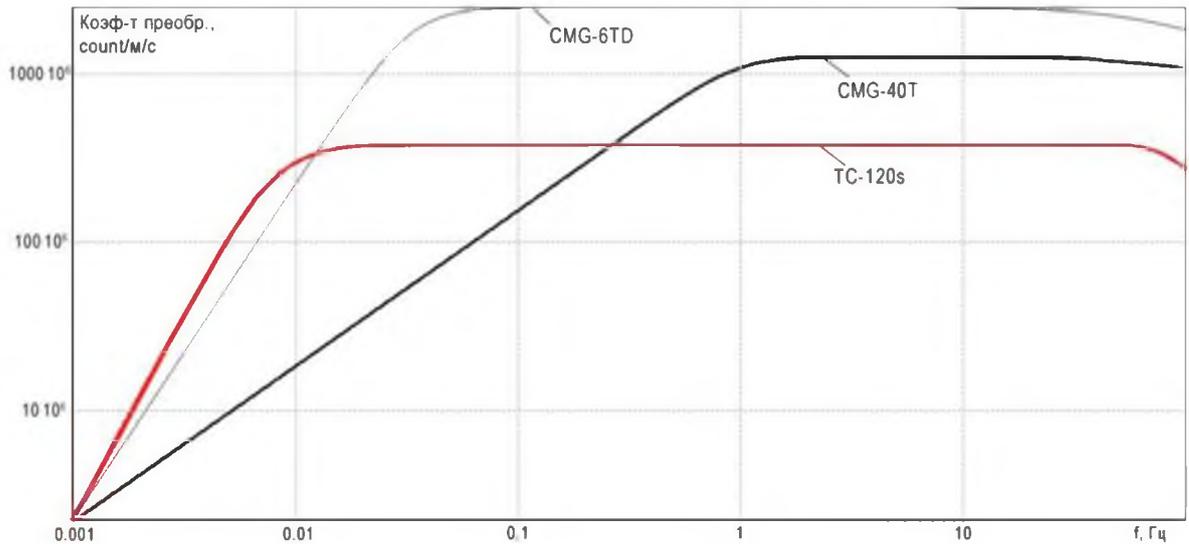


Рисунок 3.2.1 – АЧХ велосиметров TC-120s, CMG-6TD и CMG-40T

На рисунке 3.2.2 представлены характерные записи скоростей смещений, зарегистрированные обоими датчиками при движении поезда, а также эти же записи с применением низкочастотного фильтра 0.5 Гц.

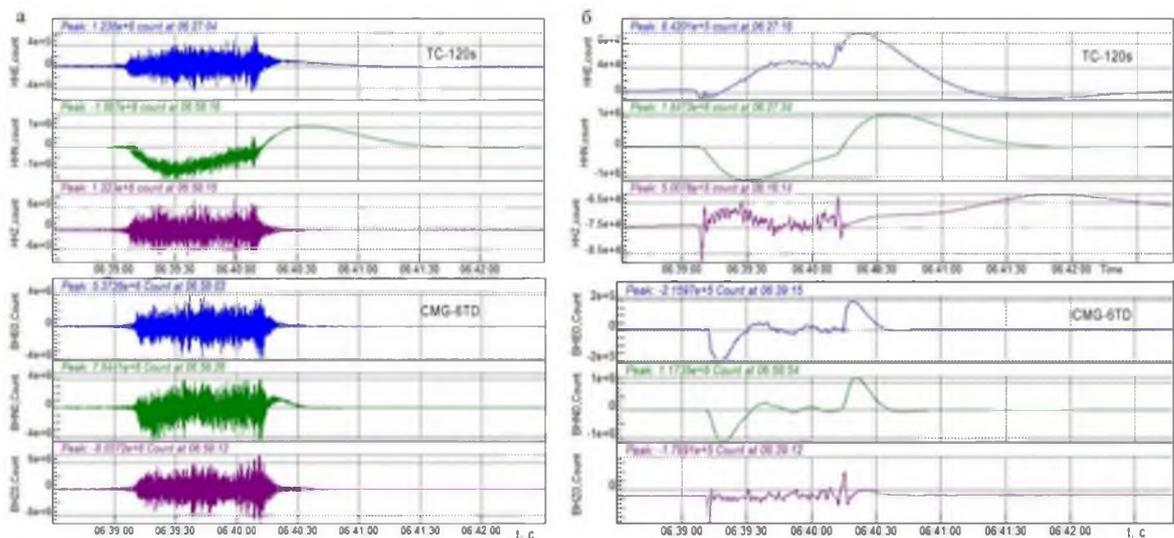


Рисунок 3.2.2 – Характерный вид волновых форм записей датчиками TRI-120 и CMG-6TD прохождения поезда: а – исходная сейсмограмма, б – с применением низкочастотного фильтра 0.5 Гц [55]

Из рисунка 3.2.2 видно, что при прохождении поезда так и после него присутствует низкочастотная составляющая колебаний грунта, в хвостовой части сейсмограммы длительностью минута и более.

На кривых АЧХ (рис. 3.2.1) нижняя частота среза для CMG-6TD начинается с 0.03 Гц (30s), когда у TC-120s с 0.008 Гц (120s), поэтому мы наблюдаем лучшую запись низкочастотных колебаний у TC-120s.

Для мониторинга важна хорошая повторяемость записей и, соответственно, значений амплитуд A , именно на сопоставлении амплитуд разных частотных составляющих строится разрабатываемая методика, подробнее обсуждение в Главе 4. Здесь существенным являются два фактора: повторяемость амплитудно-частотной характеристики для разных экземпляров датчиков и влияние условий установки при замене датчика. Три датчика-велосиметра были размещены на берме насыпи вдоль пути с интервалом 30 м, два - одного типа (TRI), между ними – другого CMG-6TD (PSS). На рисунке 3.2.3 приведены отрезки записей прохождения дрестины, виден временной сдвиг, что соответствует движению со скоростью примерно 60 км/час. Для всех датчиков наблюдается подобие волновых форм, особенно первых минимума и максимума, но соотношение амплитуд максимума и второго минимума одинаково для обоих датчиков TRI и иное для PSS.

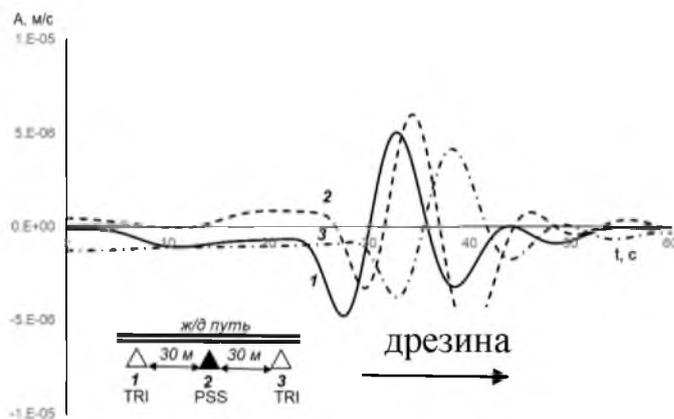


Рисунок 3.2.3 – Волновые формы записей Z-компоненты в полосе 0,01–0,1 Гц разными датчиками, прохождение дрестины

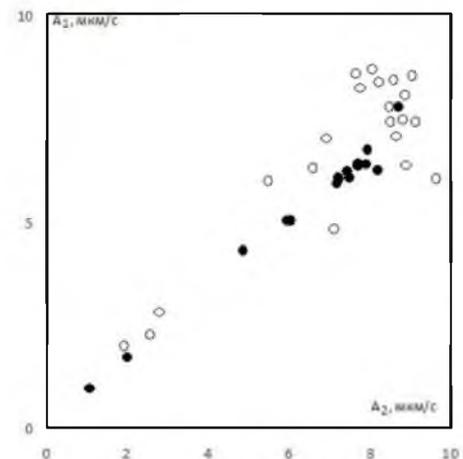


Рисунок 3.2.4. – Диаграмма разброса значений амплитуд A , записанных одновременно датчиками 1 и 2, черные кружки – TRI №1 и TRI №2, полые – PSS №1 и PSS №2.

Учитывая, что при наблюдениях определение свойств грунтов предлагается производить по величинам A , важно оценить их погрешность при наблюдении разными экземплярами датчиков одного типа. Для этого в экспериментах с одновременной регистрацией разными датчиками были подобраны записи прохождения экипажей любого типа. Для волновых форм после фильтрации 0.01–0.1 Гц определялась величина A и строились диаграммы разброса амплитуд, измеренных попарно для стоящих рядом датчиков №1 и №2 (рисунок 3.2.4). Видно, что для TRIN№1 и TRIN№2 точки ложатся практически на одну прямую, стандартное отклонение составляет 0,09 мкм/с, т.е. примерно 1% от измеряемой величины. Этот тип датчиков не чувствителен к условиям установки, наклон прямой может быть устранен при более тщательной калибровке. Для датчиков типа PSS разброс точек значительно больший, 0,4 мкм/с, т.е. примерно 5% от A , что может осложнять их использование для мониторинга.

Таблица 8 Технические характеристики приборов сейсмометрических наблюдений

Модель прибора	Акселерометр АС-73	Titan Posthole акселерометр	Сейсмометр Trillium Compact (ТС-120s/ТС-120s Posthole)	Trillium Cascadia сейсмометр + акселерометр	Скважинный деформометр МОЭД-1П
Измеряемая величина / кол-во каналов	Ускорение/3	Ускорение/3	Скорость/3	Скорость/3 и ускорение/3	Смещение/4
Чувствительность	от 2,5 до 20 В/г	от 5 до 80 В/г	750 В с/м	750 В*с/м; от 5 до 80 В/г	-
Диапазон измерений	± 0,5g, 1g, 2g, 3g или 4g	±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0,026 м/с до 10 Гц и 0.17g выше 10 Гц	для акселерометра: ±4 g, ±2 g, ±1 g, ±0,5 g, ±0,25 g, ±0,125 g	0...35 мм
Динамический диапазон	156 дБ (на 1 Гц, RMS)	> 155 дБ (RMS)	>152 дБ на 1 Гц	для сейсмометра : >152 дБ на 1 Гц; для акселерометра >155 дБ	-

Продолжение Таблицы 8

Модель прибора	Акселерометр АС-73	Titan Posthole акселерометр	Сейсмометр Trillium Compact (ТС-120s/ТС-120s Posthole)	Trillium Cascadia сейсмометр + акселерометр	Скважинный деформометр МОЭД-1П
Частотный диапазон	0 до 200 Гц	0 до 430 Гц	от 120 с до 108 Гц	для сейсмометра : >152 дБ на 1 Гц; для акселерометра >155 дБ	-
Минимально регистрируемый полезный сигнал	6,34E-8 g	7,11E-8 g	6,53E-10 м/с	для сейсмометра : 6,53E-10 м/с для акселерометра: 7,11E-8g	5 мкм
Источник	[97]	[98]	[99, 100]	[101]	[102]

В результате датчик ТС-120s был принят как основной при анализе экспериментальных данных. В настоящее время рассматривается возможность использования отечественных датчиков фирмы «Р-Сенсорс», которые подобны по параметрам, но существенно более дешевые [103].

3.3 Характеристика экспериментального материала и решаемые задачи

Основными задачами экспериментальных исследований были:

- определение чувствительности сейсмической аппаратуры к малым изменениям среды, связанными с климатическими факторами. Это гарантирует успех мониторинга, т.к. очевидно, что параметры, характеризующие опасные процессы, превосходят сезонные, а последние могут рассматриваться как шум или погрешность оценки;
- выявление признаков перехода грунтов в неблагоприятное состояние

- определение информативных параметров мониторинга, по которым можно судить о начале процесса негативных изменений;
- автоматизация определения параметров для возможности мониторинга из удаленной точки;
- получение статистически значимых оценок параметров мониторинга и некритичных к типу поезда и его скорости.

Работа построена на экспериментальных наблюдениях двух типов: одновременно на тестируемом и опорном участках, и при длительной регистрации (более 50 дней) с записью сигнала от 1590 поездов.

Первый цикл наблюдений – оценка возможностей технологии путем сравнения записей на двух участках пути: так называемом неблагоприятном (А), где постоянно требуется ремонт, и благоприятном (В). Неблагоприятный участок пути также характеризуется разным состоянием грунтов (АI, АII), с укреплением и без соответственно; выполнялся в августе 2017 г. при сухой погоде («сухой» период). Второй цикл – регистрация сезонных изменений, выполнялся на участке АI с той же аппаратурой с конца апреля до середины июня 2019 г., в период сезонного оттаивания с обильными дождями («мокрый» период).

Выявление зависимости параметров записей колебаний от свойств грунтов выполнялось путем подбора упругих моделей среды и анализа аналитических решений задачи воздействия на среду движущегося поезда. Использовался статистический анализ параметров, полученных при обработке данных для выявления надежных оценок. Для выявления изменений в грунтах применялись две методики: 1) сопоставление параметров сейсмических записей полученных одновременно на тестовом и ослабленном участках земляного полотна, 2) при мониторинге состояния грунта анализировались кривые временного хода информативных параметров записи. Для оценки чувствительности методики мониторинга к изменениям состояния земляного полотна как реакции на природные явления применялось построение численных моделей взаимодействия подвижного состава и грунтов основания пути, рассмотренные в главе 2.

Для обследования грунтов оснований железнодорожной насыпи применялись, как было сказано выше, современные трехкомпонентные широкополосные сейсмические датчики (сейсмометры TC-120s фирмы Nanometrics и CMG-6TD Güralp Systems Limited).

При работе с сейсмическим оборудованием необходимо помнить, что на выходе сейсмические данные могут формироваться в разных форматах, например: miniSEED, GCF, SAC, CSS. Для анализа полученных данных их необходимо пересчитать из условных отсчетов (каунтов) в абсолютные величины (м/с), если используется велосиметр. К примеру, в лаборатории сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА РАН для решения данной задачи была написана программа, позволяющая пересчитывать данные в физические единицы измерения путем умножения на коэффициенты преобразования. На выходе формируется txt файл, который далее загружается в программу обработки и анализа данных.

Для обработки экспериментальных материалов использовалась программа GeoDAS [104]. Программный комплекс GeoDAS позволяет оперативно выполнять пересчеты данных, например, из виброскоростей в виброускорения, производить фильтрацию данных, строить спектры, определять пиковые значения амплитуд и пр. Характерный вид волновых форм записей от прохождения поезда, полученные датчиками TRI-120 и CMG-6TD представлены на рис. 3.2.2.а (компонента X направлена вдоль пути, Y – поперек пути, Z – вертикально).

В главе 4 будет подробно рассмотрена совокупность информативных параметров сейсмической записи для создания технологии мониторинга земляного полотна раннего обнаружения негативных изменений. Далее рассмотрим основные характеристики волновых форм для каждой компоненты.

3.4 Предобработка записей, основные характеристики волновых форм компонент

Выше уже был представлен характерный вид волновых форм, регистрируемых при движении поезда мимо датчика. Сейчас обратимся к рисунку

3.2.2 Как видно, поперечные горизонтальные колебания (особенно по оси Y) как во время, так и после прохождения поезда являются преобладающими в колебаниях грунта на удалении от ж/д полотна.

Разрабатываемая технология нацелена на создание комплекса автоматизированной обработки записей для того, чтобы вести мониторинг из удаленной точки, анализируя не всю запись, а только ее информативные параметры. Начальным этапом обработки записей был отсев помех и выделение собственно записей поездов. Для этого применялся алгоритм STA/LTA, используемый в сейсмологии для автоматического выделения событий [105]. Затем проводилась фильтрация в трех частотных диапазонах: среднечастотная (СЧ) 0.1-2 Гц; низкочастотная (НЧ) ниже 0.1 Гц; высокочастотная (ВЧ) 2-8 Гц, что соответствует записям на рисунках 3.4.1, б, в, г соответственно. Каждый из частотных диапазонов характеризует процессы деформирования разных частей земляного полотна: СЧ – верхняя часть земляного полотна (насыпь), НЧ – более глубокий слой с возможной вязкостью (подстилающие грунты основания), ВЧ – самая верхняя часть земляного полотна, взаимодействующая непосредственно с рельсами.

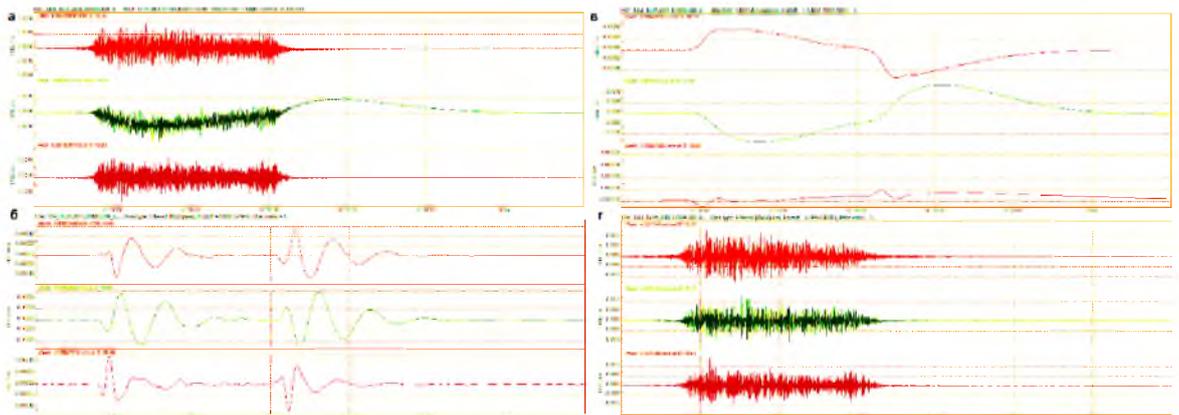


Рисунок 3.4.1 – Характерный вид волновых форм, зарегистрированных широкополосным сейсмометром ТС-120s при движении поезда мимо датчика: а) – запись поезда в широкой полосе; б) – СЧ фильтр 0.1–2 Гц; в) – НЧ фильтр ниже 0.1 Гц; г) – ВЧ фильтр 2–8 Гц

Перед нами стояло две задачи, выявления уже произошедших изменений в грунтах, и отслеживание сезонных изменений. Проведенные исследования

показали, что для первой задачи информативным является анализ ВЧ и НЧ, для более малых величин деформаций, связанных с сезонными и климатическими изменениями необходимо анализировать СЧ и НЧ записей.

После соответствующей фильтрации проводился визуальный просмотр записей прохождения различных типов поездов и выявление устойчивых, т.е. повторяющихся, особенностей волновых форм, рассмотрение их разных параметров и статистический анализ их значений для массива записанных поездов.

При обработке волновых форм применялись следующие процедуры:

- 1) анализ различных параметров, характеризующих запись (амплитуды фаз, мощность, временные задержки и пр.) и определение величин, пригодных для автоматизированной обработки,
- 2) создание алгоритмов и проведение автоматизированной обработки для выбранных параметров,
- 3) проведение статистического анализа параметров для получения информативных оценок, характеризующих состояние грунтов,
- 4) построение в зависимости от времени рядов параметров, выявление изменений во времени,
- 5) сравнение полученных изменений с экзогенными факторами (температура, осадки и пр.) для оценки чувствительности параметров для мониторинга.

Просмотр всех записей поездов показал следующее:

- высокочастотные вибрации при прохождении грузового состава на Z и X компонентах по амплитуде превосходят низкочастотные больше, чем на два порядка, для Y компоненты – сопоставимы по амплитуде,
- низкочастотные колебания Z -компоненты характеризуются своеобразной волновой формой с двумя интенсивными всплесками в виде периода синусоиды в начале и в конце записи, причем эти начальная и хвостовая синусоиды – в противофазе, (см. главу 4),
- вступление первой по времени синусоиды Z -компоненты практически совпадает с вступлением интенсивных колебаний на высокочастотной записи, а хвостовая

- синусоида вступает позже спада высокочастотных колебаний, т.е. эти колебания происходят после прохода состава мимо датчика, (см. главу 4),
- длительность колебаний на низкой частоте существенно больше, чем на высокой (рис.3.4.2), т.е. колебания происходят уже после прохождения поезда (хвост записи),
 - волновые формы низкочастотных колебаний во время прохождения поезда характеризуются разнообразием, связанным с особенностями движения (торможением, скоростью и пр.), формы хвостов – достаточно подобны, (см. главу 4),
 - для всех типов поездов после их прохождения на НЧ-волновых формах всегда наблюдался максимум амплитуд колебаний на компоненте Y (A_Y) и минимум на компоненте X (A_X). При этом A_Y на один-два порядка больше, чем A_X (рис. 3.4.2).

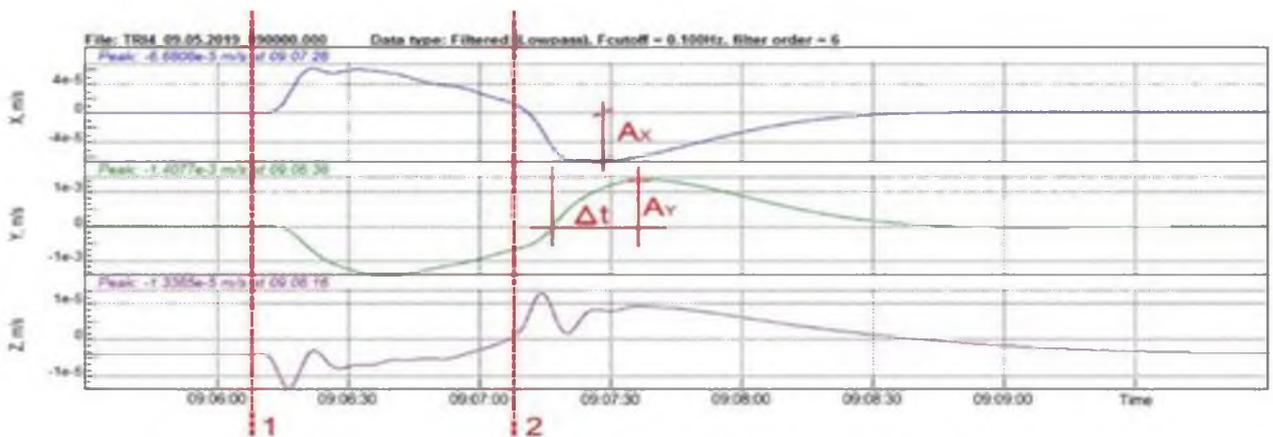


Рисунок 3.4.2 – Характерный вид волновых форм записей, создаваемых подвижным составом после НЧ-фильтрации (ниже 0.1 Гц), 1 – голова поезда, 2 – хвост поезда, Δt – временной промежуток релаксации земляного полотна в поперечном направлении после прохождения поезда, измеряемый до максимальной амплитуды виброскорости

Выводы по главе 3

Материал, изложенный в данной главе, относится к обоснованию защищаемого положения 1. В главе рассматриваются основы предлагаемой технологии, включающей типы регистрирующей аппаратуры, схемы наблюдений,

способы первичной обработки данных. Обосновывается выбор в качестве измерительного оборудования широкополосного сейсмометра Trillium Compact 120s, как наиболее чувствительного к малым изменениям в среде.

Объектом исследования данной работы был выбран участок Северной железной дороги в Онежском районе Архангельской области, где земляное полотно представляет собой сложную многофазовую среду, деформационные свойства которой изменчивы и зависят от погодных и сезонных условий. В качестве зондирующего грунта основания сигнала использовались колебания от движущегося поезда.

Приведенное феноменологическое описание позволило нацелиться на набор параметров записи, который рассмотрен ниже.

Глава 4 Основы технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов

Как было сказано выше, для создания технологии мониторинга состояния грунта основания пути с использованием движущихся поездов были проведены две серии экспериментальных наблюдений: 1) одновременно на тестируемом и опорном участках для выявления уже произошедших изменений, 2) длительная регистрация (более 50 дней) для выявления сезонных изменений.

Рассмотрим результаты анализа записей для трех частотных диапазонов и определим основные информативные параметры, по которым можно судить об изменениях, происходящих в земляном полотне.

4.1 Анализ высокочастотной составляющей записи колебаний и основные параметры, характеризующие состояние грунтов

В течение первого полевого сезона (август 2017 г.) измерения проводились пятью датчиками двух типов – велосиметрами и акселерометрами, расположенных вблизи насыпи (на берме). Измерения выполнялись на тестируемом и опорном участках для определения чувствительности аппаратуры к уже произошедшим изменениям.

Первая схема наблюдений: велосиметры TRI-120 установлены с одной стороны железнодорожного пути на расстоянии 30 метров друг от друга, акселерометры CMG-6TD - с другой стороны пути на расстоянии 15 м друг от друга; вторая схема наблюдений все приборы располагаются с одной стороны: датчики TRI - в крайних точках на расстоянии 60 метров друг от друга, а между ними с шагом 15 метров устанавливались датчики CMG-6TD.

На рисунке 4.1.1 представлены записи с использованием высокочастотного фильтра (0.5–100 Гц) для одного и того же поезда, зарегистрированные двумя широкополосными датчиками TRI-120 и CMG-6TD (PSS). Мы наблюдаем, что в высокочастотном диапазоне оба датчика – акселерометр и велосиметр - дают

запись, пригодную для обработки и могут служить инструментами для проведения натурных измерений высокочастотного динамического воздействия поездов на грунты основания. Разница в волновых формах определяется тем, что регистрируются разные величины (скорости и ускорения), а также разными АЧХ датчиков.

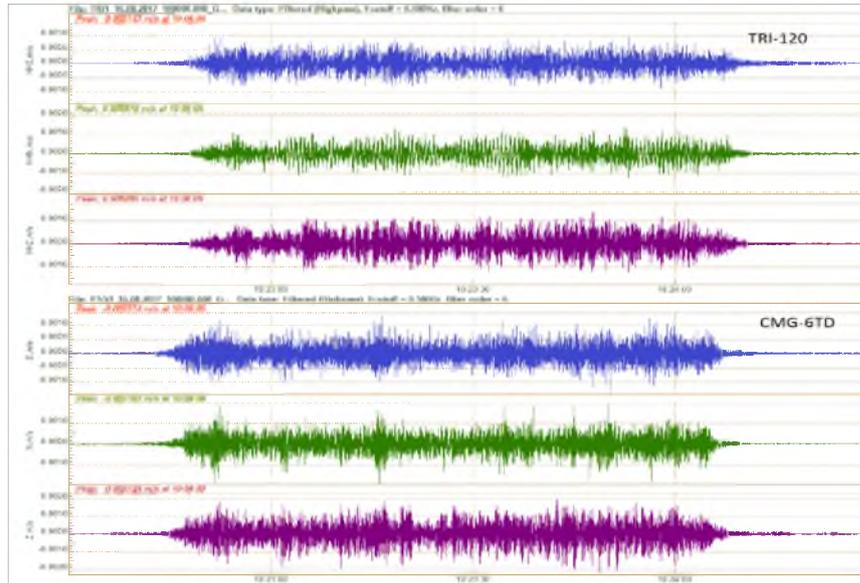


Рисунок – 4.1.1 Характерный вид записей прохождения поезда с применением высокочастотного фильтра выше 0.5 Гц, датчики TRI-120 и CMG-6TD

Рассмотрим результаты спектрального анализа колебаний в высокочастотной области. На рисунке 4.1.2 представлены характерные спектры мощности записей движения поездов на неблагоприятном участке, присутствуют два устойчивых пика: около 2 Гц и 5 Гц, которые могут быть использованы для анализа колебательного процесса системы «поезд-насыпь-грунты основания». Статистический анализ спектров мощности записей разных поездов выявил значения пиковых частот: 1.5–2.5 Гц, наиболее ярко выраженных для горизонтальной составляющей поперек пути (Y) и пик 4-5 Гц, характерный для вертикальной составляющей колебаний (Z), на компоненте X – 8 Гц.

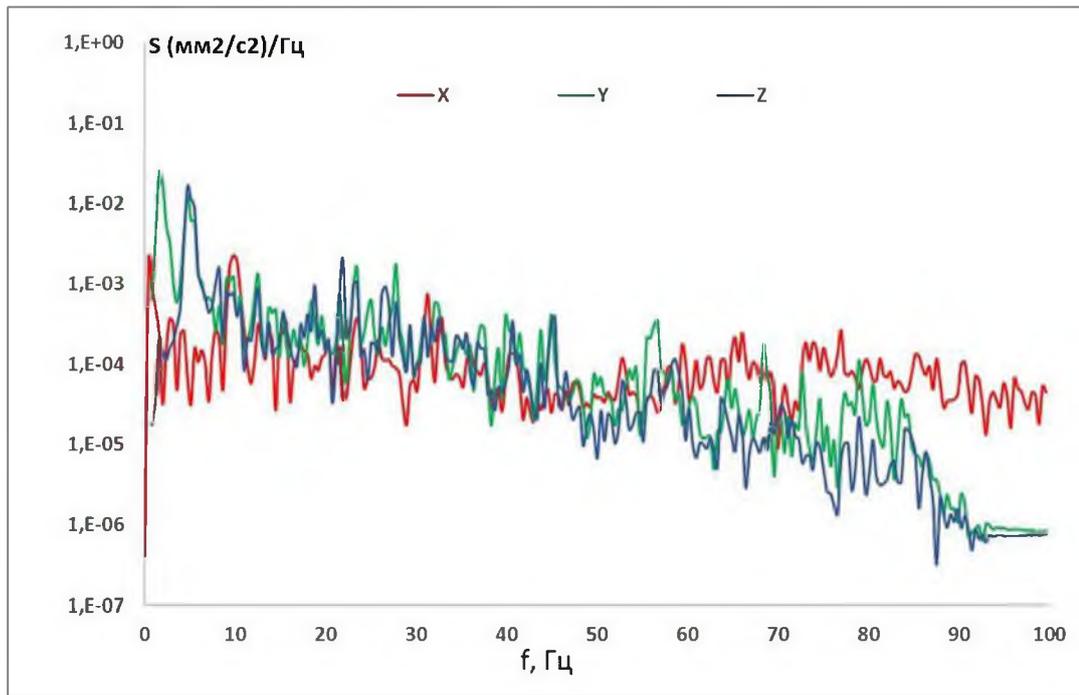


Рисунок 4.1.2 – Характерные спектры мощности записей движения поездов на неблагоприятном участке

Проводимые ранее испытания [106] показывают, что интенсивные колебания в горизонтальной плоскости поперек пути с частотой 2 Гц свидетельствуют о характере движения тележки, так называемый эффект «шальной» тележки. Из-за этого устанавливается неустойчивое движение вагона в целом, что, в свою очередь, приводит к возрастанию рамных сил и поперечных ускорений кузова, превышающих нормированные значения. Анализ спектров мощности показывает, что полосу частот 2–8 Гц можно рассматривать как характерную для сигналов проходящих поездов. Это согласуется с расчетами, приведенными в [54], при установке датчиков у основания насыпи и с учетом того, что большинство сигналов регистрировалось от товарных поездов со скоростями 40–70 км/ч при прохождении участков наблюдения. Характерный пик 4-5 Гц соответствует частоте циклов «нагрузка-разгрузка» и связан с суммарным расстоянием между осями жесткой базы тележки и между внутренними осями двух смежных тележек [10].

Данные о характерной полосе частот, создаваемой колесными парами, подтверждает и спектрально-временной анализ (СВАН) записей - пример на рисунке 4.1.3, где ярко выражены всплески мощности в диапазоне частот 2–8 Гц.

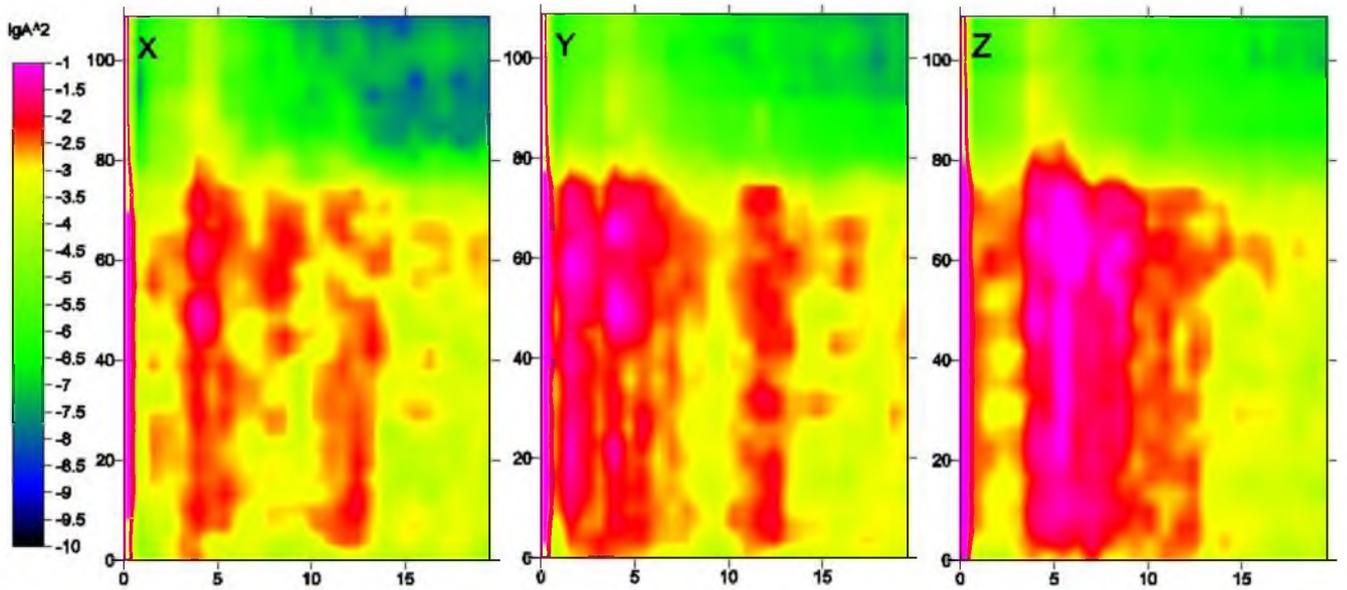


Рисунок 4.1.3 – СВАН-диаграммы колебаний, вызванных движением поезда, после ВЧ-фильтрации

Так как на записи прохождения поезда характерных волновых форм, которые могут составить основу обработки, не выделяется, сигнал шумоподобный, то далее рассматривалась интегральная характеристика сигнала – его мощность и вариации в зависимости от расположения датчика на грунтах.

В дальнейшем для автоматизации проводился статистический анализ значений квадратов амплитуд скоростей смещений (мощности виброскорости) в полосе характерных частот 2-8 Гц для компонент колебаний X, Y, Z для выявления параметров, по которым можно судить о состоянии грунтов основания. Для это для единичного типового грузового поезда были рассчитаны квадраты амплитуд записей после полосовой фильтрации 2–8 Гц и построены гистограммы (рисунок 4.1.4), где видны отчетливые максимумы. Исходя из этого, в качестве анализируемого параметра для каждой из трех компонент было рассчитано медианное значение полученного массива квадратов амплитуд, что соответствует отмеченным максимумам. Эта величина удобна также для автоматизированной обработки и далее будет использоваться для характеристики мощности высокочастотной составляющей колебаний от поезда. При изменении свойств грунта будут меняться его деформационные параметры и поглощение, что

отразится на мощности регистрируемых колебаний, т.е. на выбранной нами характеристике.

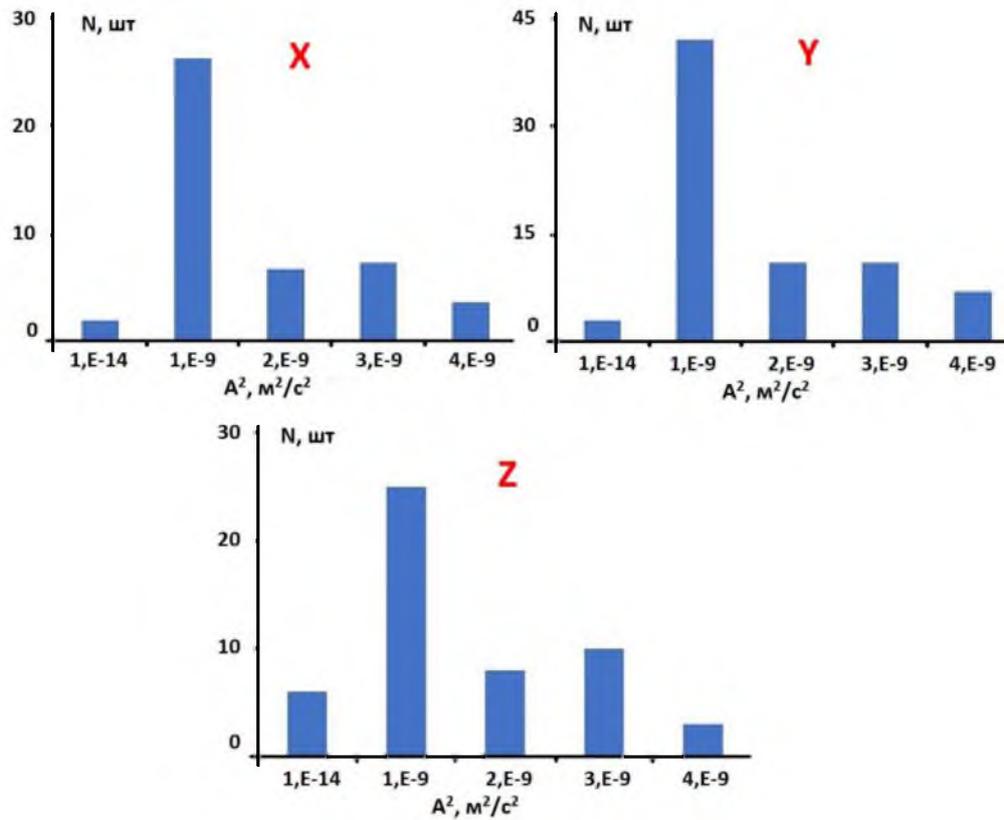


Рисунок 4.1.4 –Типичные гистограммы значений амплитуд волновых форм из диапазона 2–8 Гц по трем осям для записи одного поезда

Для исключения влияния веса поезда были выполнены своеобразные «нормировки» полученных значений, учитывающие длину и вес поезда, его скорость, т.е. длительность записи. Для этого были рассчитаны отношения квадратов амплитуд в направлениях регистрации X/Z (N_x), Y/Z (N_y).

В 2017 г. параллельно со стационарными сейсмическими наблюдениями поездов проводилась структурные исследования методом малоглубинной сейсморазведки с кувалдой, профили проходили с обеих сторон вдоль насыпи. Подробная информация о схемах проведения работ и результатах представлена в [17]. Характерная запись ударных колебаний, зарегистрированных сейсмометром TRI-120, представлена на рисунке 4.1.5.

Записи ударов кувалдой, как дополнительного независимого источника просвечивания, использовались для сравнения с результатами по поездам.

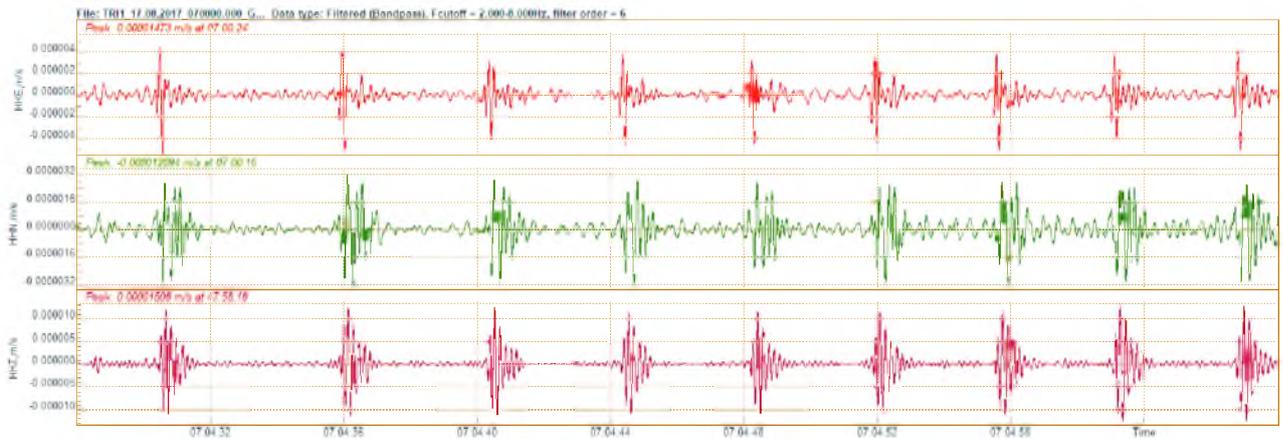


Рисунок 4.1.5 – Характерная запись ударных колебаний, зарегистрированных сейсмометром TRI-120

Статистический анализ проводился для записей поездов за август 2017 и апрель 2019 гг. и ударов кувалды в 2017 г. В августе 2017 г. была сухая погода, апрель 2019 г был дождливым, кроме того, именно в апреле в регионе начинается активное таяние снежных покровов и оттаивания грунтов, поэтому периоды были названы соответственно «сухой» и «мокрый». Таким образом, были получены характерные медианы значений квадратов амплитуд (мощностей) скоростей смещения в «мокрый» и «сухой» периоды для поездов и мощностей колебаний от ударных источников малоглубинной сейсморазведки в «сухой» период.

Записи колебаний от ударных источников по осям X, Y, Z, зарегистрированные двумя типами датчиков TRI-120 и PSS, были обработаны несколько иным способом для получения оценок мощности колебаний. Принимая во внимание «простую» форму единичного сигнала удара, нет необходимости построения распределения и выявления типичного колебания. Поэтому рассчитывалась общая мощность серии ударов. Учет разного количества ударов в серии и удаленность ударов от точки наблюдения проводился также за счет

построения отношений оценок на разных компонентах. В таблице 9 представлены типичные результаты обработки записей для «мокрого» и «сухого» периодов.

Анализ таблицы 9 показывает, что в «мокрый» период наблюдается значительное увеличение относительной амплитуды поперек пути по сравнению с сухим периодом, что говорит об усилении колебаний в горизонтальной плоскости в обводненных грунтах.

Таблица 9 Типичные значения медиан квадратов амплитуд скоростей смещения и оценок N_y , N_x для разных записей

Запись	A^2_x E-09	A^2_y E-09	A^2_z E-09	A^2_x / A^2_y	N_y	N_x
Август 2017 поезд 1	7.7	10	72	0.76	0.14	0.11
Август 2017 поезд 2	14	13	66	1.02	0.20	0.21
Август 2017 поезд 3	7.7	6.6	58	1.17	0.11	0.13
Август 2017 серия ударов 1	9.6	32	99	0.30	0.33	0.10
Август 2017 серия ударов 2	1.1	1.2	4.3	0.89	0.28	0.25
Август 2017 серия ударов 3	0.18	0.23	0.64	0.79	0.35	0.28
Апрель 2019 поезд 1	0.59	0.64	0.66	0.93	0.96	0.89
Апрель 2019 поезд 2	0.33	0.14	0.21	2.31	0.66	1.54
Апрель 2019 поезд 3	0.86	0.61	0.75	1.42	0.81	1.15

На рисунке 4.1.6 представлена диаграмма разброса значений относительных квадратов амплитуд, полученных по результатам анализа записей поездов за 2017 и 2019 гг., по горизонтальной оси отложено значение относительной мощности (отношение A^2_y / A^2_z), по вертикальной оси отложены квадраты амплитуд по оси Z (приняты разные масштабы). Отношение квадратов амплитуд поперечной составляющей к вертикальной для сухого периода не превышает значений 0,6, а для мокрого этого отношения всегда больше 0,6. Существенно, что два независимых вида записей: от поезда и от ударов дали сходный результат. В мокрый период колебания по оси Y интенсивнее, чем в сухой, что соответствует большей деформируемости грунта, в основном, по-видимому, насыпи поперек

пути. Несомненно, в дальнейшем требуются серии подобных экспериментов на разных типах грунтов.

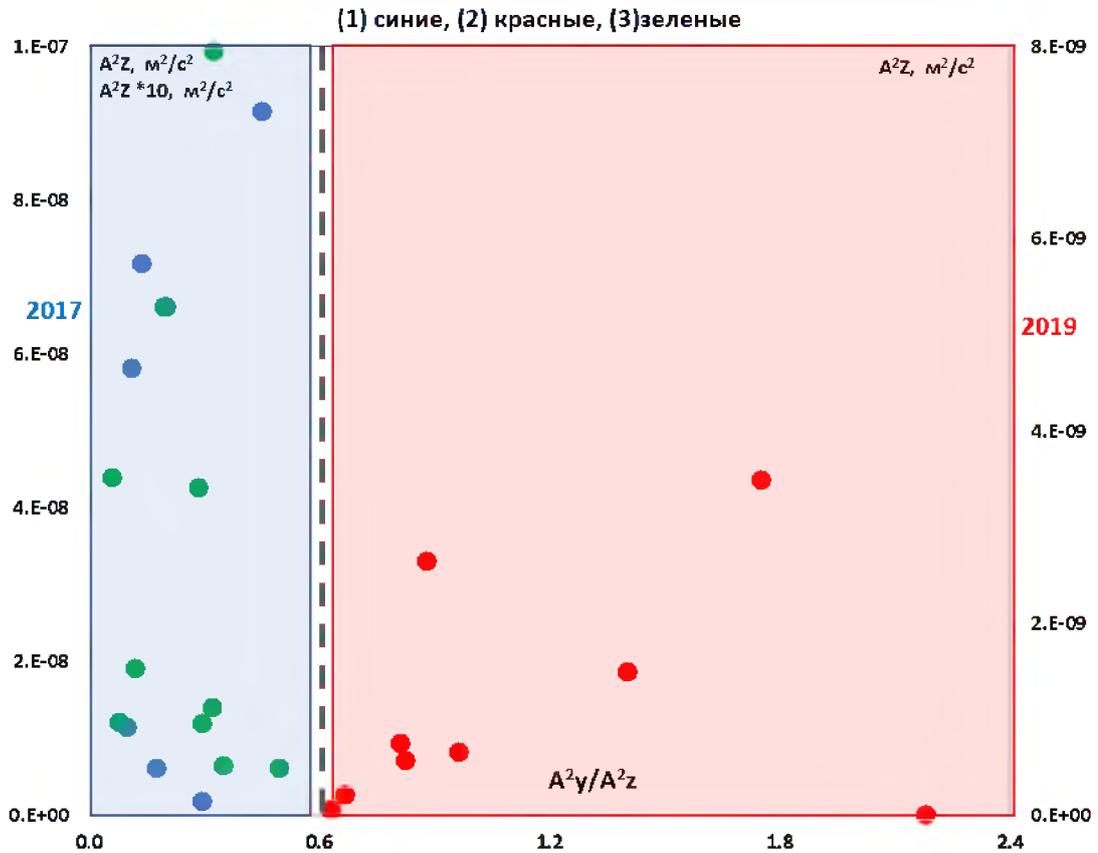


Рисунок 4.1.6 – Диаграмма разброса значений относительных мощностей колебаний от поездов за август 2017 г. (1) и апрель 2019 г. (2) и ударов сейсморазведки 2017 г. (3).

Таким образом, статистическая обработка в высокочастотной части спектра дает следующий результат: в мокрый период на неблагоприятном участке колебания по оси Y интенсивнее, чем в сухой, что соответствует большей деформируемости грунта поперек пути при прохождении поезда. При деградации вечномёрзлых грунтов или в сезон оттаивания, характеризующегося обильным обводнением, энергия колебаний в горизонтальной плоскости (поперек пути) значительно возрастает по сравнению с летним периодом. Также можно говорить о том, что в летний «сухой» период основная энергий колебаний, вызванных движением поезда, сосредоточена преимущественно в вертикальной плоскости.

4.2 Анализ среднечастотной и низкочастотной составляющих записи колебаний и основные параметры, характеризующие состояние грунтов

Отклик среды на низкочастотные воздействия от поезда определяется упругими свойствами основания пути. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры дало возможность наблюдать, как динамические нагрузки от подвижных составов влияют на земляное полотно в полосе частот от 0.1 до 2 Гц (СЧ) и на сверхнизких частотах, ниже 0.1 Гц (НЧ). Характерным для полученных записей поездов является наличие существенного отклика среды, т.е. земляного полотна и подстилающих грунтов, не только в вертикальном, но и горизонтальных направлениях вдоль и поперек пути. Известно, что при колебаниях амплитуды скоростей смещений пропорциональны добавочной деформации в среде [107], эти низкочастотные воздействия могут превосходить деформации при высокочастотных нагрузках.

4.2.1 Вертикальная компонента

Рассмотрим вертикальную компоненту записи и сравним с горизонтальными компонентами в полосе частот 0.05–2 Гц.

На рисунке 4.2.1.1 приведен пример записей вертикальной компоненты скоростей смещения (Z) при проходе грузового состава, регистрация в широкой полосе частот и при полосовой фильтрации 0,05–0,5 Гц.

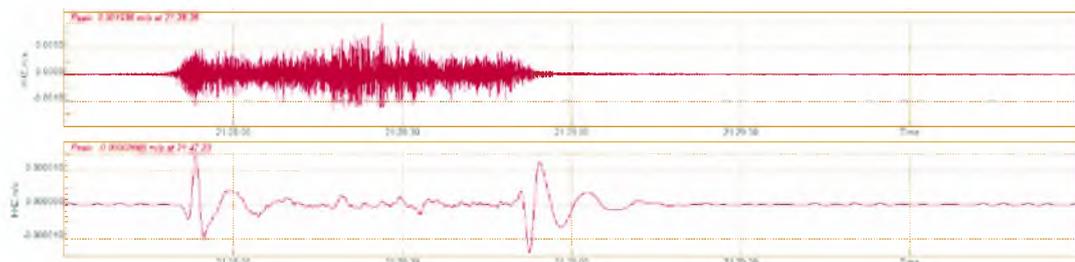


Рисунок 4.2.1.1 – Пример вертикальной (Z) компоненты сейсмической записи прохождения грузового состава: сверху – в широкой полосе частот, внизу – фильтрация 0,05–0,5 Гц.

Полученная волновая форма скоростей смещений, подобная периоду синусоиды, соответствует наблюдавшимся ранее записям в подрельсовом сечении, создаваемым колесной парой движущегося экипажа на рисунке 4.2.1.2 [20, 21].

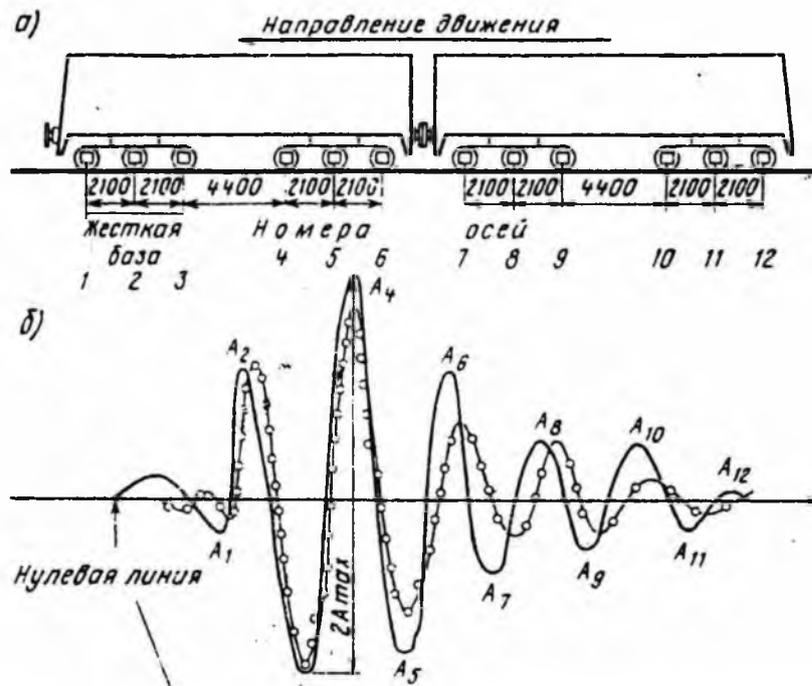


Рисунок 4.2.1.2 – Запись волновых процессов, возникающих в откосе насыпи под воздействием поездной нагрузки: а - схема расположения осей тепловоза ТЭ-3; б - запись при воздействии поездной нагрузки (против стыка рельсов) [20, 21]

Рассмотрим возможность использования вертикальной компоненты волновой формы в СЧ-диапазоне, прежде всего волновой формы в начале записи, для определения параметров деформирования грунтов. Для этого исследуем устойчивость волновой формы Z-компоненты для набора записей прохождения грузовых составов (рисунок 4.2.1.3а). Видно, что сохраняется тип волновой формы, описанный выше, т.е. наличие интенсивных экстремумов в начале и в конце записи. Между ними могут быть как небольшие по амплитуде колебания, так и встречаться заметные всплески. Длительность волновой формы также различна, причем более короткой соответствуют более интенсивные всплески в интервале между основными фазами (начальной и конечной). Так как наилучшая повторяемость

присуща первому минимуму, его амплитуда (отсчитываемая от нулевой линии) была принята для дальнейшего анализа.

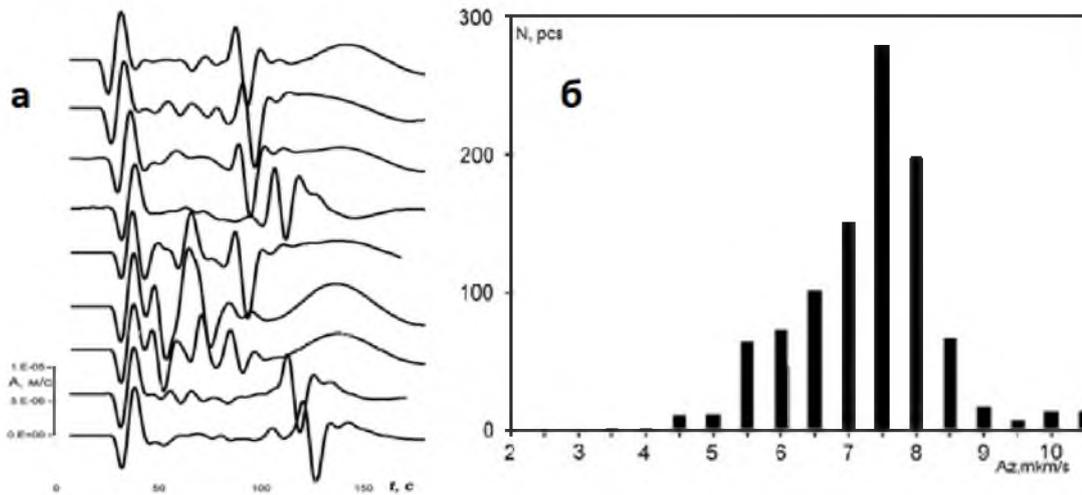


Рисунок 4.2.1.3 – а) - Волновые формы Z-компоненты записи велосиметра в полосе 0,05–0,5 Гц при прохождении грузовых составов, записи совмещены по первым вступлениям; б) - Распределение амплитуд первого минимума волновых форм в полосе 0,05–0,5 Гц при прохождении поездов, п. Онега, 2019 г.

Достаточно длительная регистрация в 2019 г. позволила выполнить описательную статистику и построить гистограмму значений амплитуд A_z первого максимума на компоненте Z (рис. 4.2.1.3б). Оценка медианы дает значения 7,5 мкм/с. Для уменьшения влияния характеристик поезда мы провели отсев данных вне односигмового коридора (± 1.3 мкм/с) относительно медианного значения для A_z . Отметим, что расчет описательной статистики является стадией настройки обработки, выполняется в начале наблюдений и не входит в алгоритм автоматизации. Таким образом, по экспериментальным данным принятая оценка амплитуды Z -компоненты (A_z) мало зависит от таких параметров состава, как тип вагонов и длина поезда, величина скорости поезда регламентируется нормами и расписанием, составляя около 70 км/час, и, по-видимому, ее вариации невелики для грузенных составов. Повторяемость волновой формы и значений A_z , показывает, что этот параметр может быть использован для мониторинга состояния грунтов *in situ*, т.е. при стационарной установке датчика в точке. Более подробно это вопрос обсуждается в нашей работе [86] при выборе точки установки датчика.

Теперь сопоставим расчеты с использованием модели Буссинеска (Глава 2) с полученными экспериментальными данными. Были заданы следующие упругие параметры: $\mu = 10^9$ Па, $\nu = 0,2$. Для путевых экипажей [21]: $P = 25$ тонн силы на тележку или отдельную ось, $V = 20$ м/с (72 км/час). Для расчётов мы пользуемся формулами для одной сосредоточенной силы, так как проведенные вычисления реакции от разных видов, но таких же по величине, распределений по площади дал сопоставимые результаты с разницей не более 3%, что меньше неопределённости других параметров задачи.

На рисунке 4.2.1.4 приведены волновые формы скорости смещения, полученные в результате расчетов, для единичной колесной пары и грузового поезда, состоящего из локомотива и 20 одинаковых вагонов.

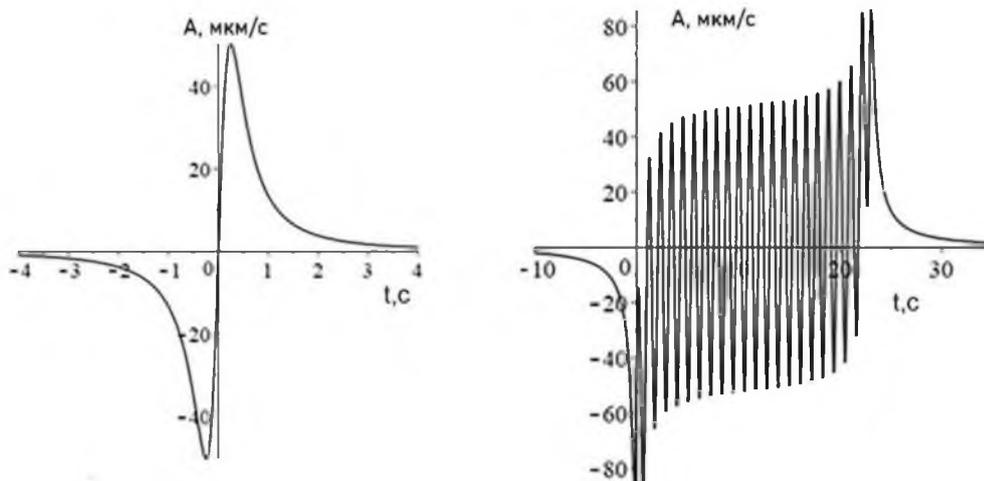


Рисунок 4.2.1.4.– Расчетные кривые изменения во времени скоростей смещения, регистрируемых велосиметром, при движении: слева – для единичной колесной пары, справа – поезда с локомотивом

Из соотношения для скорости смещения компоненты Z :

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{PV^2t}{4\pi\mu} \left(\frac{3z^2}{R^5} + \frac{2(1-\nu)}{R^3} \right), \quad (4.1)$$

следует, что при вариации скорости на трассе 10% (7 км/час при скорости 70 км/час), получаем вариацию амплитуды также 10%, что, существенно больше ошибки измерения датчиком TRI-120. Полученный результат свидетельствует о

чувствительности выбранного параметра. Параметр можно использовать также, например, для независимого контроля скорости. Но, так как скорость и вес поезда фиксируется путевыми документами, то при мониторинге остаются вариации за счет свойств грунтов.

Сопоставление с экспериментальными данными, например, по рисунку 4.2.1.2а показывает хорошее согласие с теоретическим расчетом в следующем:

- начало и конец записи прохождения поезда датчиком вне насыпи (на удалении 5-7 м и на глубине 0.8-1 м) характеризуется интенсивными волновыми формами в виде периода синусоиды,

- волновая форма в начале записи определяется воздействием на среду первой колесной пары (или тележки при близком расположении колес), хвостовая волновая форма – последнего колеса (или тележки),

- воздействие вагонов внутри состава проявляется в виде набора колебаний, причем при одинаковых вагонах это может быть достаточно регулярная волновая форма, а при разных – характер колебаний зависит от интерференции колебаний.

Для вертикальной компоненты экспериментальные и расчетные волновые формы подобны, а значения амплитуд соответствуют наблюдениям 2017 г. в сухом августе $A_z \sim 10-70$ мкм/с. В 2019 г. $\langle A_z \rangle = 7.5$ мкм/с, что согласно (4.1) указывает на большее значение μ , что реально, учитывая разницу прогретого и замерзшего грунта [40].

В расчетах значение μ определялось из сопоставления экспериментальных и теоретических данных, было получено $\mu = 10^9$ Па. Такие значения в соответствии с [110] характерны для осадочных сцементированных грунтов (кавернозных или глинистых известняков, мергелей) или мерзлых песков и пылеватых грунтов с мерзлыми прослойками [40]. При оттаивании мерзлых грунтов от -10°C до -1°C величина μ уменьшается на порядок [40], т.е. в соответствии с полученными расчетами амплитуда колебаний увеличится на порядок. Исходя из приведенной выше оценки погрешности при измерении амплитуды в 1% для «хорошего» датчика и согласно [40], можно будет выявить параметры несущей способности

вечномерзлого грунта при его оттаивании на 1°C , что превосходит чувствительность известных нам способов, соответствующих внелабораторным измерениям, т.е. *in situ*.

Таким образом, полученные величины амплитуд хорошо согласуются с экспериментальными значениями, что, совместно с видом волновых форм, показывает правильность выбранного теоретического подхода для данной области частот при рассмотрении Z-компоненты.

Теперь сопоставим экспериментальные данные с расчетами для горизонтальных компонент с использованием модели Буссинеска. На рисунке 4.2.1.4 приведен пример горизонтальных компонент X и Y сейсмической записи прохождения грузового состава: сверху – в широкой полосе частот, внизу – фильтрация 0,1–2 Гц.

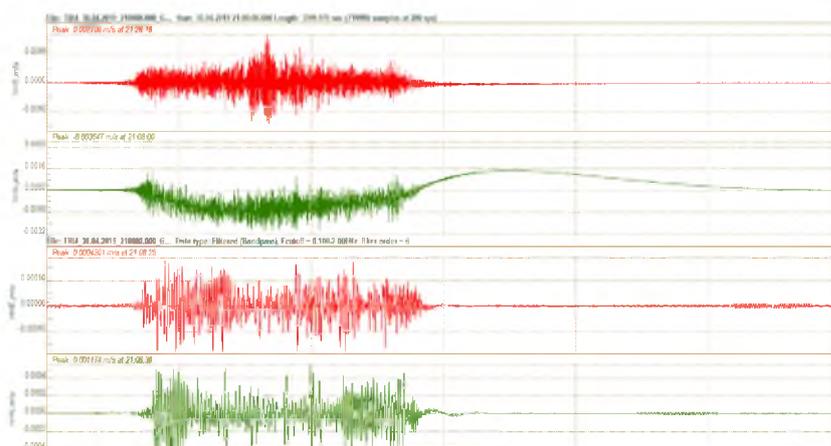


Рисунок 4.2.1.4 – Пример горизонтальных компонент X и Y сейсмической записи прохождения грузового состава: сверху – в широкой полосе частот, внизу – фильтрация 0,1–2 Гц.

На рисунке 4.2.1.5 приведены волновые формы скорости смещения для горизонтальных компоненты, полученные в результате расчетов, для единичной колесной пары с упругими параметрами: для компоненты X - $\mu = 10^9$ Па $\nu = 0,2$ и для Y - $\mu = 10^8$ Па, $\nu = 0,2$. Разница в величинах μ принята для возможности сопоставления расчетных и экспериментальных величин хотя бы по порядку величин и отражает различие в деформационных свойствах вдоль и поперек

полотна. Для расчетов использовались те же формулы (2.3.12) и (2.3.13) и те же параметры поездов (вес, скорость).

Расчеты по модели Буссинеска для горизонтальных компонент дают следующие результаты: более высокочастотная волновая форма по сравнению с Z (0,25Гц) для Y (1 Гц) и наиболее высокочастотная по сравнению с компонентами Y, Z для X (около 2 Гц). Такое соотношение частот соответствует эксперименту, но вид волновых форм (особенно для Y) и полученные значения амплитуд различаются

Таким образом, модель Буссинеска описывает особенности волновых форм Z -компонент для СЧ диапазона, но мало пригодна для НЧ диапазона ниже 0.1 Гц.

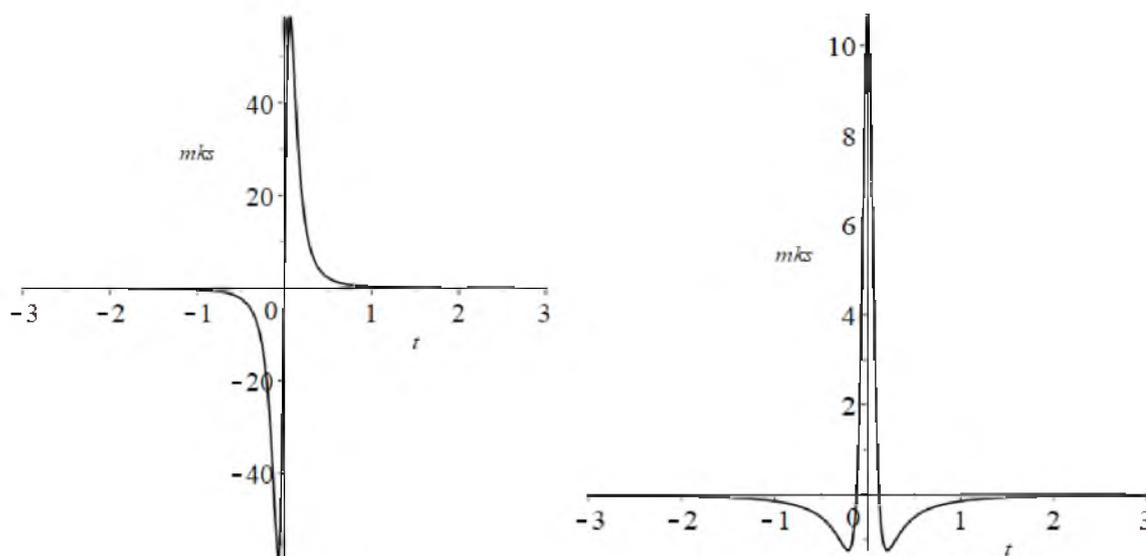


Рисунок 4.2.1.5 – Расчетные кривые изменения во времени скоростей смещения для компоненты X (слева) и Y (справа), регистрируемых датчиком, при движении: для единичной колесной пары

4.2.2 Горизонтальные компоненты

Обратимся к рисунку 3.4.2, на котором приведен пример записей скоростей смещения при проходе грузового состава с полосовой фильтрации 0,01–0,1 Гц, где горизонтальные компоненты имеют характерную волновую форму.

И как отмечалось в 3.4.1 для всех типов поездов после их прохождения на НЧ-волновых формах всегда наблюдаются максимум амплитуд колебаний на компоненте Y (A_Y) и минимум на компоненте X (A_X). При этом A_Y на один-два порядка больше, чем A_X .

Сравнение волновых форм для подборки записей после прохождения поезда («хвостов») (рисунок 4.2.2.1 а) показывает, что эта часть записи достаточно проста по форме и подобна для разных ж/д составов.

По существу, это есть процесс возвращения среды в исходное состояние после снятия воздействия. Сравнение траекторий движений частиц в горизонтальной плоскости (рисунок 4.2.2.1 б) для этих же записей также показывает более простую форму кривых после прохождения поезда (в правой полуплоскости) по сравнению с таковыми во время движения (левая полуплоскость).

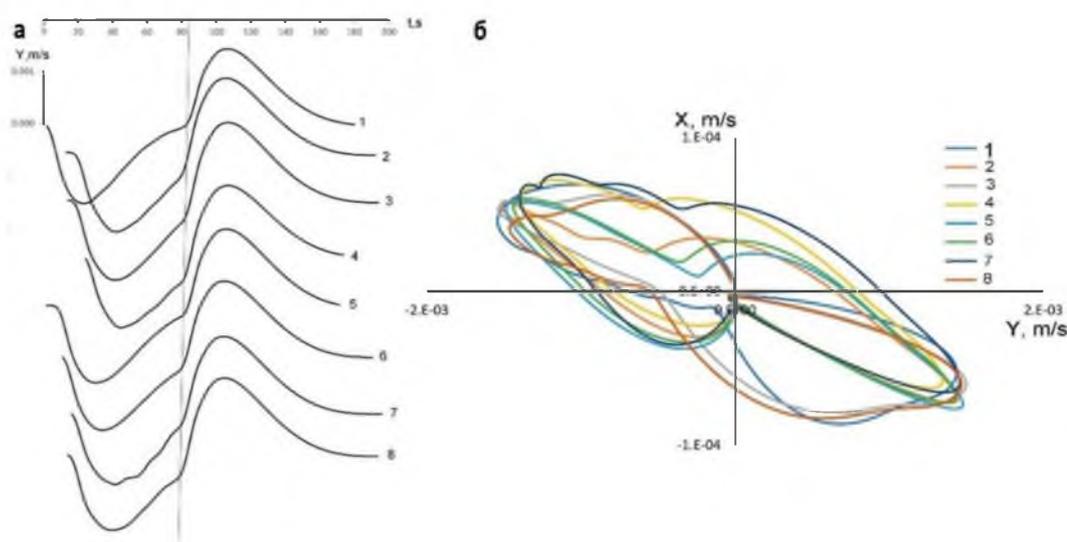


Рисунок 4.2.2.1 – Для 8 различных поездов показаны: а) - волновые формы Y -компоненты при прохождении грузовых составов после НЧ-фильтрации, записи совмещены по времени момента после прохождения поезда; б) – траектории движения частиц в горизонтальной плоскости

Таким образом, целесообразно для анализа использовать параметры, описывающие хвостовую часть. Приняты следующие: Δt – время от пересечения

нулевой линии до максимума A_Y , максимальная и минимальная амплитуды насыпи после прохождения поезда (A_Y – максимум, A_X – минимум).

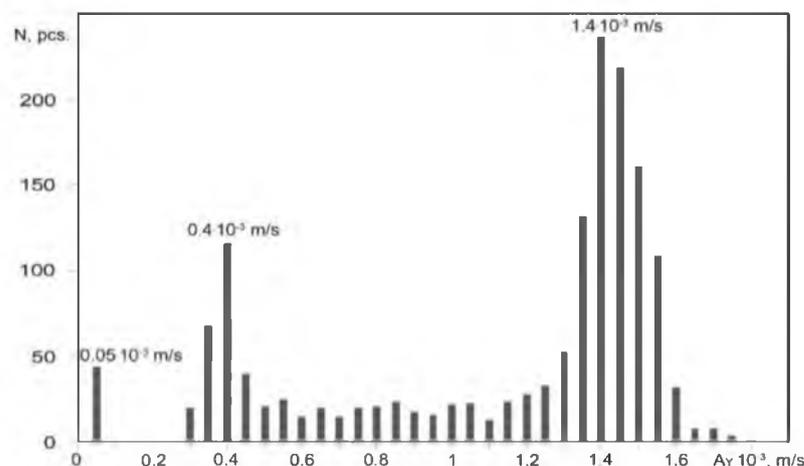


Рисунок 4.2.2.2 – Гистограмма значений амплитуд поперечной компоненты A_Y

Просмотр волновых форм показал, что значение амплитуды A_Y меняется, и, по-видимому, связано с характеристиками состава (длиной, нагрузкой на ось). На рисунке 4.2.2.2 приведена гистограмма значений амплитуд A_Y , на которой выделяются три максимума: 0.00005, 0.0004 и 0.0014 м/с, последний – наиболее интенсивный.

Рассмотрим природу разброса значений A_Y . Первое предположение - зависимость от веса состава. Если это так, то должна существовать пропорциональность амплитуд на X и Y компонентах. На рисунке 4.2.2.3 приведена диаграмма разброса значений амплитуд горизонтальных компонент для всего набора данных и для трех подборок, включающих значения для максимумов и точек в пределах стандартных отклонений. Из рисунке 4.2.2.3 видно, что зависимость существует, и соотношения для точек первого (поезда с малым весом) и третьего (тяжелые поезда) максимума подобны, т.е. вес поезда, как и ожидалось, определяет амплитуду колебаний. Для исключения влияния веса поезда были выполнены своеобразные «нормировки» полученных значений. Мы приняли оценку R , исходя из отношений амплитуд на горизонтальных компонентах:

$$R = | A_Y / A_X |.$$

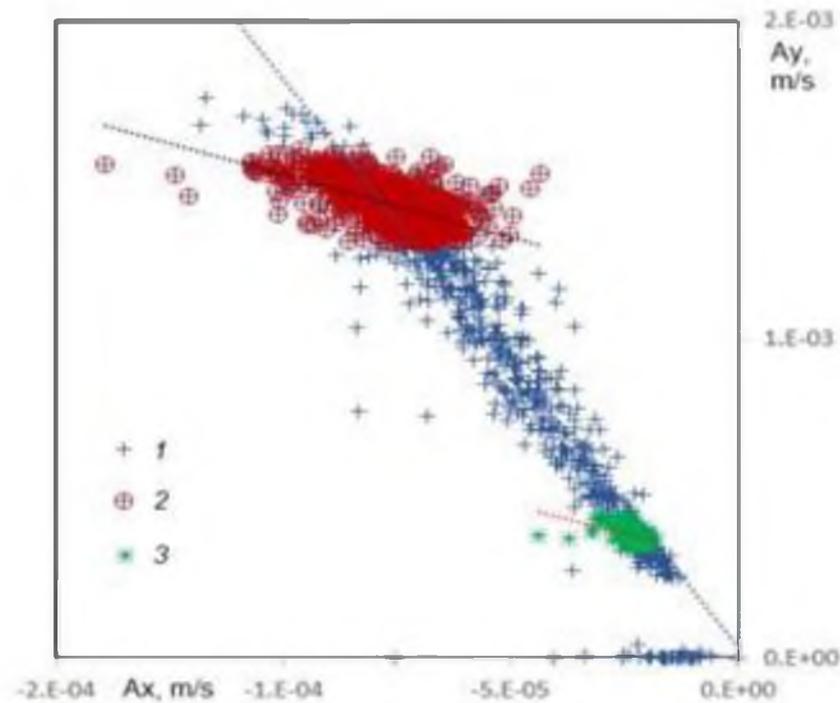


Рисунок 4.2.2.3 – Диаграмма разброса амплитуд горизонтальных компонент с указанием уравнения прямой линии тренда для каждого набора данных: 1 – весь набор данных, для максимумов: 2 – $A_Y=0.4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, 3 – $A_Y=1.4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$

Рассмотрим статистику параметра Δt , определенного с помощью автоматизированной обработки. На рисунке 4.2.2.4 приведена гистограмма, из которой видно, что основная часть данных лежит в интервале 20–27 с.

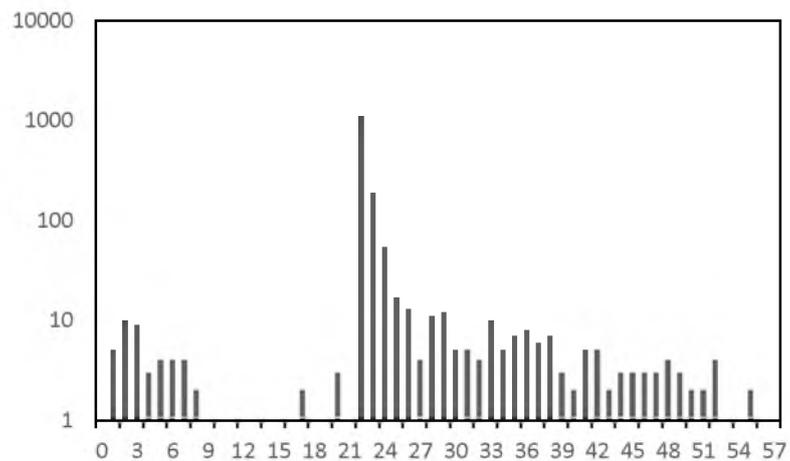


Рис. 4.2.2.4 Гистограмма значений Δt

Теперь рассмотрим решение задачи Эльзассера для нашего случая, оно зависит от параметра a и промежутка времени T , в течение которого прикладывается возмущение, формула (2.3.15) в разделе 2.4. При задании величины a мы использовали следующие фиксированные значения параметров: $H=2.5$ м, $h=4.5$ м в соответствии со схемой земляного полотна и полученными результатами использования малоглубинной сейсморазведки [17]. Модуль сдвига связан со скоростью поперечных волн следующим соотношением: $\mu = V_s^2 \cdot \rho$.

Если плотность щебеночно-песчаной насыпи 1.99 г/см³, $V_s = 150$ $\frac{м}{с}$, тогда $\mu = 44.8$ МПа. Для расчета коэффициента Пуассона воспользовались известной формулой $V_p = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}$, по которой коэффициент Пуассона: $\nu = \frac{V_p^2 \rho - 2\mu}{2(V_p^2 \rho - \mu)}$.

Согласно результатам применения малоглубинной сейсморазведки [17] средние скорости продольных волн для щебеночно-песчаной насыпи варьируются $V_p = 330 - 440$ $\frac{м}{с}$, тогда $\nu=0.4$. Длительность воздействий поезда в среднем $T=80$ с.

На рисунке 4.2.2.5а приведены результаты расчетов относительных амплитуд возмущений, кривые показывают набор профилей амплитуд, регистрируемых на разных расстояниях от пути в зависимости от времени после прохождения поезда (после 80 с) Видно, как максимум воздействия проявляется чем дальше от пути, тем позже, при этом амплитуды уменьшаются. На расстоянии 5 м в нашем эксперименте мы практически попадаем на максимум воздействия при $\Delta t \sim 20$ с.

Значение амплитуд и положение максимума кривых зависят от модуля сдвига верхнего слоя и вязкости нижнего (рис. 4.2.2.5, б). Рассмотрим значение параметров для моделей в таблице 10.

Таблица 10 Параметры упруго-вязких моделей основания пути

Вариант модели, №	μ , 10^7 Па	η , 10^9 Па*с
1	2	2
2	1.8	2
3	2	1.5
4	2	1.8

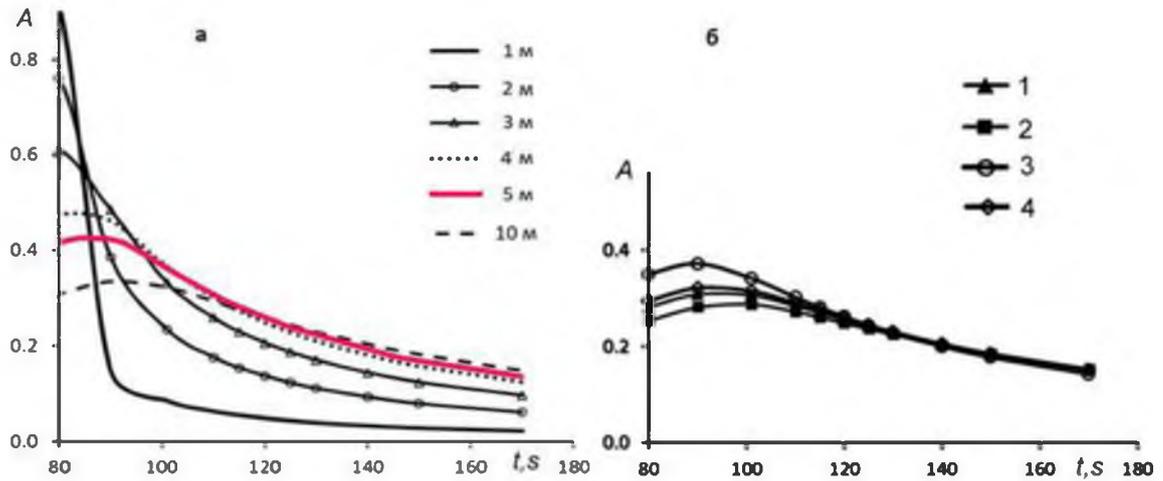


Рисунок 4.2.2.5 – Набор профилей амплитуд а) - регистрируемых на разных расстояниях от пути в зависимости от времени после прохождения поезда (после 80 с); б) – в зависимости от упруго-вязких параметров в таблицы 10

Как следует из рисунка 4.2.2.5 уменьшение μ на 10% приводит к увеличению Δt на 5 с при незначительном снижении амплитуд. Уменьшение вязкости на 10% приводит к уменьшению Δt на 1 с при практически постоянной амплитуде, большее уменьшение η снижает Δt и увеличивает амплитуды. В натуральных условиях, например, обводнение приводят к увеличению μ и уменьшению η , т.е. в эксперименте будет наблюдаться уменьшение Δt при увеличении амплитуды.

4.3 Совокупность информативных параметров сейсмической записи и тестирование на мониторинге сезонных изменениях

Рассмотрим, результаты анализа экспериментальных наблюдений на неблагоприятных (АI, АII) и благоприятном (В) участках для выявления уже произошедших изменений. Анализировались низкочастотные составляющие сигналов, ниже 0,5 Гц, строились диаграммы движения частиц (рисунок 4.3.1). Для компоненты Y на АI, АII наблюдается сдвиг и возвращение точек в исходное положение, это вызвано движением поезда. На АI аналогично фиксировалось наличие отрицательных амплитуд скоростей смещений в направлении вдоль пути X , т.е. точки насыпи движутся как вперед под действием движущегося поезда, так и в обратном направлении после его прохождения. Для других типов грунтов для

компоненты X (вдоль пути) такого эффекта не наблюдается, для благоприятных грунтов (B) нет и «возвратного» (после прохождения начального положения) движения поперек полотна. После снятия нагрузки через определенное время точка возвращается в исходное положение. Так же наблюдается отпор грунта по вертикали, характерный для всех типов грунтов.

Можно сделать вывод для сигналов ниже 0,5 Гц, что наличие положительных и отрицательных фаз колебаний в направлении вдоль и поперек пути является признаком неблагоприятного состояния грунта. Двухполярная форма сигналов для проблемных участков фиксировалась в 2017 г и в дальнейшем данный результат был подтвержден при длительных наблюдениях в 2019 г.

После мероприятий по укреплению неблагоприятных грунтов вдоль пути наблюдается однополярная низкочастотная волновая форма, однако поперек пути по-прежнему отмечается двухполярное колебание. Для благоприятных участков с устойчивыми грунтами в горизонтальной плоскости регистрируется практически однополярный сигнал.

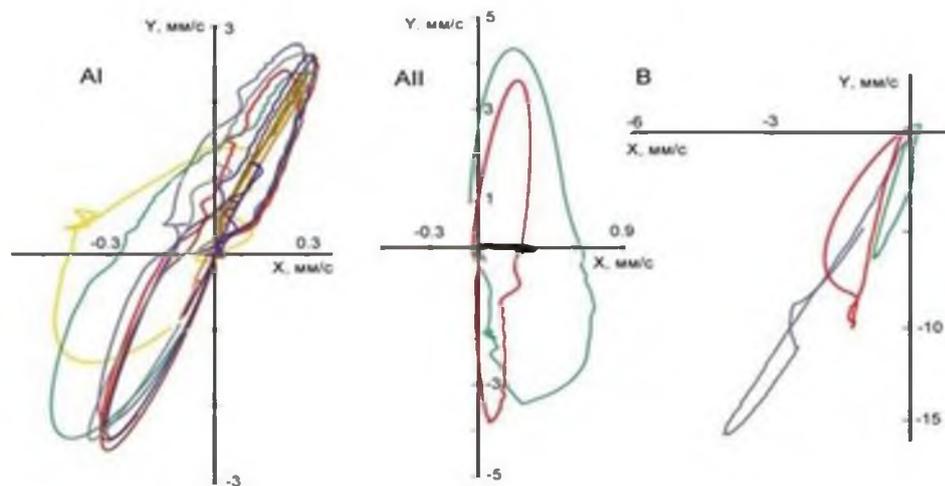


Рисунок 4.3.1 – Кривые траекторий движения точки насыпи при прохождении подвижных составов в полосе частот 120 с – 0.5 Гц в горизонтальной плоскости, датчики установлены в грунтах разных типов: неблагоприятные (A I, A II) и устойчивые (B). Цветные линии – разные поезда

Теперь рассмотрим возможности методики для выявления сезонных изменений записей при длительной регистрации.

По результатам автоматизированной обработки записей с определением отношения амплитуд горизонтальных компонент R и времени Δt с последующей коррекцией массива данных ($20 \text{ с} < \Delta t < 27 \text{ с}$) был получен временной ход оценок (рисунок 4.3.2) в интервале времени с апреля по июнь 2019 г.

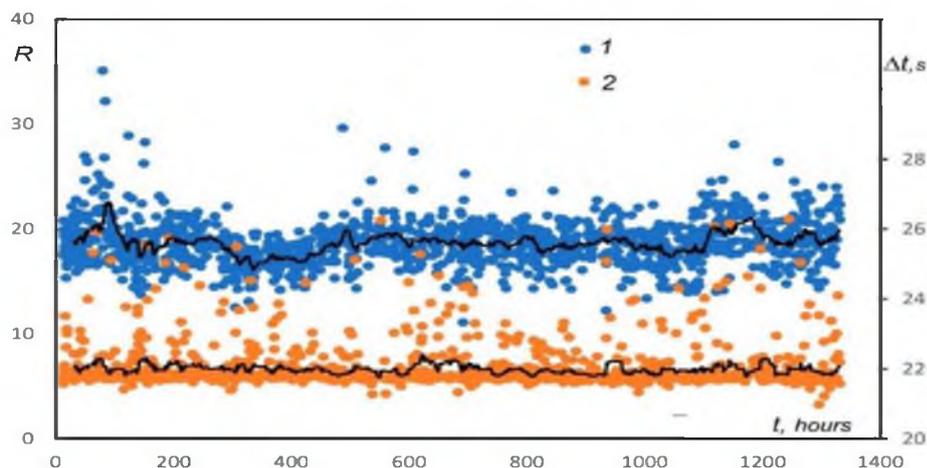


Рисунок 4.3.2 – Временной ход оценок параметров R и Δt в интервале времени с апреля по июнь 2019 г.

Вид кривых, а также полученные распределения (рисунки 4.2.2.1 и 4.2.2.3) характерны для случайных процессов, поэтому для автоматизированной обработки рассмотрим возможности получения статистически значимых параметров, позволяющие выявить изменения во времени. Учитывая, что за сутки проходит 30–40 поездов, уместно рассчитать среднесуточное значение параметров (рисунок 4.3.2). Принимая во внимание то, что изменения в грунтах на ранней стадии развития негативных процессов могут быть не очень быстрыми (несколько дней), а также то, что график грузоперевозок ориентирован на недельные циклы, было проведено сглаживание кривых скользящим средним по 7 точкам (недельный временной ход, рисунок 4.3.2).

При анализе кривых следует учитывать меньшую достоверность оценок на краях кривых в первую и последнюю неделю наблюдений. Для выяснения устойчивости оценки на исходные данные рисунок 4.3.2 был наложен случайный шум с дисперсией, равной дисперсии экспериментальных данных. Была проделана

та же процедура (осреднение, сглаживание), в результате чего получены оценки, подобные первоначальным, но с большей дисперсией в 1.5 раза.

Перейдем к выявлению изменений во временном ходе параметров A_z , N_y , R , Δt за счет изменений в грунте (рисунок 4.3.3). Так как мы ожидаем, что основу вариаций параметров составляют погодные условия, в частности процесс оттаивания грунта, то для сравнения приводится кривая среднесуточной температуры с недельным сглаживанием. Для удобства сравнения все кривые параметров приведены в виде флуктуаций от среднего значения (в %) за весь период наблюдений, превышение относительно среднего соответствует положительным значениям флуктуаций, а уменьшение – отрицательным.

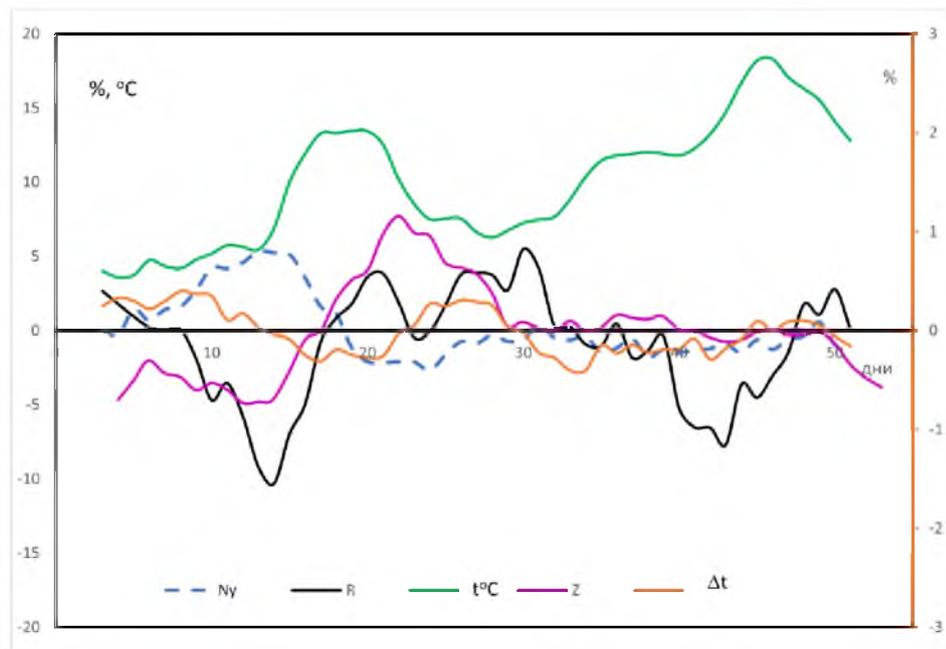
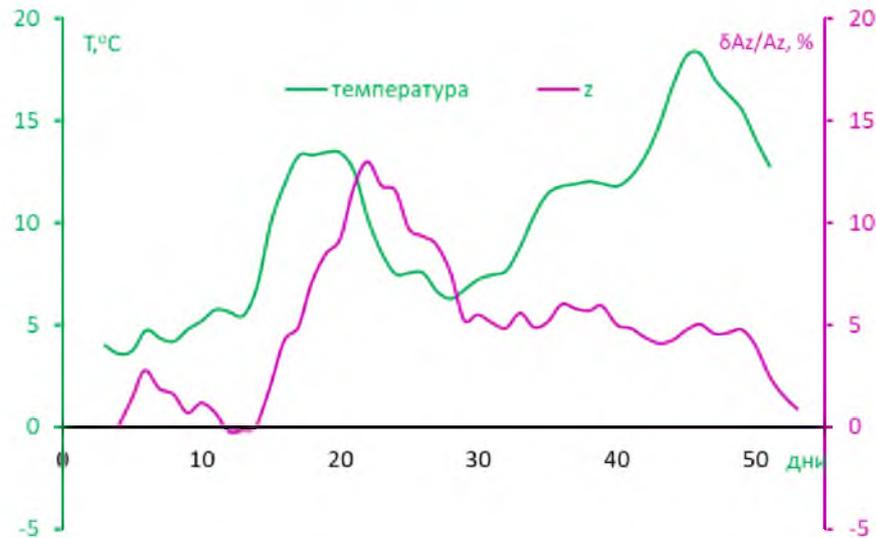


Рис. 4.3.3 Временной ход параметров N_y , R , Δt , компонента Z , температуры $t^{\circ}C$

Мы видим, что все найденные нами параметры R , Δt , N_y , A_z чувствительные к изменениям температуры. Однако, так как оттаивание и прогревания слоев происходит неравномерно по глубине в грунтах земляного полотна и, согласно моделям, каждый параметр сейсмической записи характеризует поведение разных частей разреза, интерпретировать временной ход всего набора данных

одновременно пока оказывается затруднительно. Рассмотрим сначала поведение параметра A_z .

На рисунке 4.3.4 приведено сопоставление временной хода для двух величин: температуры воздуха и флуктуаций от начального значения (в %) амплитуды виброскорости на Z-компоненте.



4.3.4 - Изменение во времени температуры воздуха и флуктуаций амплитуды виброскорости на вертикальной компоненте ($\delta A_z/A_z$) при длительных наблюдениях

Здесь также приводятся осредненные за сутки значения параметра A_z с недельным сглаживанием. Этим мы снизили дисперсию оценки A_z (относительно полученной при статистической обработке массива данных) не менее, чем в 10 раз, т.е. точность определения этого параметра стала, исходя из таблицы 9 и рисунка 4.2.2.5 б, менее 2%. Отметим, что такая точность достигнута из-за осреднения параметров для большого количества поездов, что указывает на возможность замены при мониторинге сигнала с хорошей повторяемостью на статистическую обработку большого массива данных по сигналам с худшей повторяемостью.

Сопоставление кривых рисунка 4.3.4 показывает, что при низких температурах воздуха в начале наблюдений (при еще замерзшем грунте) флуктуации $\delta A_z/A_z$ мало меняются, т. е. грунт еще жесткий по сравнению с последующими днями. При резком подъеме температуры видим также подъем

$\delta A_z/A_z$ до максимума за весь период мониторинга – начинается оттаивание и влагонасыщение, что уменьшает модуль сдвига, видим характерное запаздывание процесса в среднем на 4 дня относительно хода температуры. Затем процесс в этом слое грунта заканчивается даже при росте температуры и далее, вероятно, наступает оттаивание более низких слоев разреза земляного полотна. Согласно модели, мы получаем вариации свойств в верхнем слое грунта основания до глубин порядка 1 м, определяемой заданным расположением датчика.

Наибольшие изменения амплитуды $\delta A_z/A_z$ в 2019 г. составляют около 15%, что, согласно зависимости (2.3.3), происходит при изменении модуля сдвига около 15% или скорости поперечных волн согласно $\mu = V_s^2 \cdot \rho$ примерно 7 %, что достаточно трудно выявить при малоуглубинной сейсморазведке.

Таким образом, путем теоретических расчетов и натурных наблюдений получено доказательство эффективности использования амплитуды первых вступлений на записи виброскорости Z-компоненты для мониторинга состояния грунтов земляного полотна ж/д пути в процессе эксплуатации. Выбранный параметр A_z достаточно просто определяется при автоматизированной обработке записи и является одним из набора параметров для мониторинга состояния грунтового массива из удаленной точки.

Перейдем к другим параметрам: R и Δt . Они зависят не только от модуля сдвига, но и от вязкости в подстилающей среде. Эти параметры меняются разнонаправленно при оттаивании [40], поэтому трудно провести непосредственное сопоставление их временного хода и температуры. В соответствии с ходом температуры и кривой $\delta A_z/A_z$ на рисунке 4.3.4 будем считать, что после 30 дня наблюдений оттаивание закончилось.

Для экспериментально полученных массивов R , Δt , N_y , A_z были рассчитаны флуктуации от среднего значения для всего интервала мониторинга с применением суточного осреднения и недельного сглаживания: δN_y , δR , δA_z , $\delta \Delta t$ в % (в данном случае от среднего значения). Полученные массивы были разделены на две группы до и после 30 дней (рис. 4.3.5). Сравнение разброса флуктуаций параметров для

этих групп показывает, что для оценок δN_Y , δA_z , $\delta \Delta t$ разброс после оттаивания значительно меньше, чем до него, т.е. когда в среде происходили активные изменения (размерзание, обводнение и пр.). Таким образом, эти параметры пригодны для мониторинга состояния грунта. Флуктуации параметра δR для двух групп сопоставимы, т.е. для понимания его чувствительности и пригодности для автоматизированного мониторинга требуются более длительные наблюдения с подключением иных, чем оттаивание, типов изменений в среде.

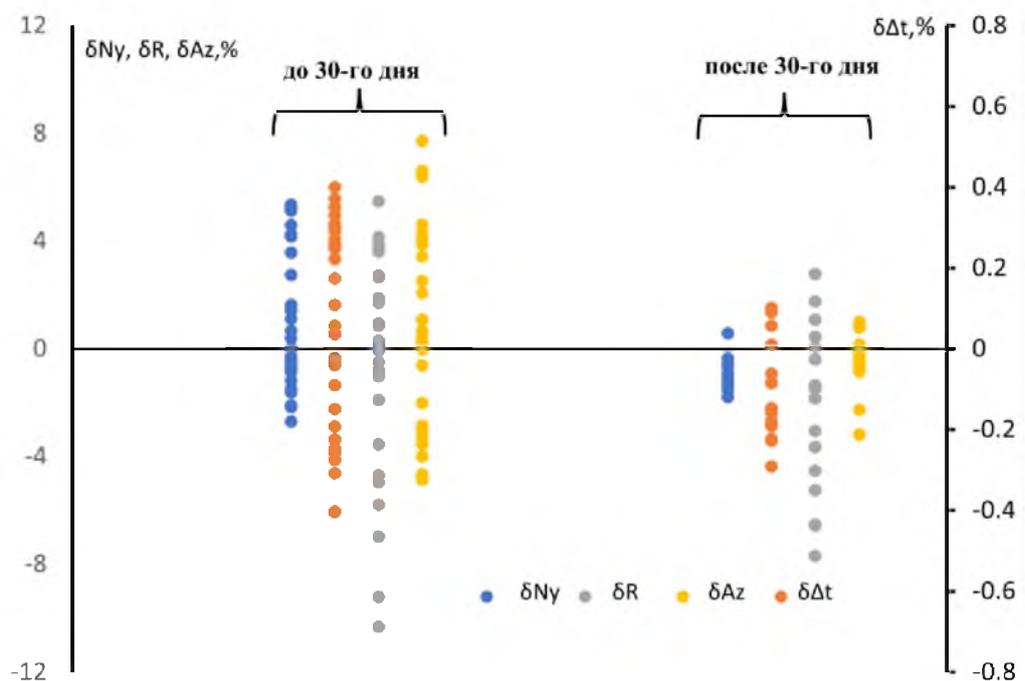


Рисунок 4.3.5 – Колебания значений δA_z , δR , $\delta \Delta t$, δN_Y (в % от среднего значения) в течение 50 дней 2019 г.

В соответствии с моделью, рассмотренной выше, анализируя изменения во времени параметров R и Δt вследствие сезонных явлений позволяет выявить примерно 10% изменения в величинах модуля сдвига и вязкости. Такие изменения деформационных параметров соответствуют вариациям скоростей упругих волн 5%.

Это существенно меньше, чем величины, характеризующие возможность начала опасных процессов, среди которых деградация мерзлых грунтов -

первостепенная. Так, например, в фундаментальном исследовании по мерзлым грунтам [40] показано, что для образцов мерзлых глин изменение их температуры на 1°C приводит к изменению модуля упругости на примерно 25%, для мерзлых песков – до 50%. Таким образом, полученные нами оценки чувствительности методики являются основой возможности определения начала опасных процессов на ранней стадии.

В обсуждении результатов важны следующие моменты:

- рассматривается очень «тонкий» эффект изменения состояния грунта – сезонное оттаивание, причем, судя по кривой температуры – неравномерное во времени. По существу, это предел чувствительности методики мониторинга изменений в грунтах на ранней стадии развития опасных процессов. Получены непротиворечащие результаты не по одному, а по четырем независимым параметрам, составляющим основу мониторинга, что повышает надежность мониторинга

- получены сведения об изменениях важных характеристик грунтов: модуле сдвига в верхней части основания и коэффициенте вязкости в подстилающем слое, предположительно в так называемой зоне пониженных скоростей. Важно, что, во-первых, это одни из наиболее сложно определяемых характеристик грунта и, во-вторых, данные получены без отбора образцов в условиях естественного залегания (*in situ*).

Несомненно, высказанные предположения о временном ходе кривых требуют специальных исследований, но в настоящее время нет фактов, им противоречащих.

4.4 Автоматизация определения информативных параметров

На основании аналитических моделей среды и сопоставления с экспериментальными данными информативными были признаны следующие параметры записи при СЧ и НЧ-фильтрации:

- амплитуда первого максимума синусоидальной волновой формы вертикальной компоненты,
- отношение амплитуд первых экстремумов в хвостовой части (после прохождения поезда) горизонтальных компонент (R),
- времена достижения экстремума (Δt).

При ВЧ-фильтрации 2–8 Гц:

- отношения мощностей колебаний на горизонтальных компонентах (X , Y) к таковой на вертикальной (Z) при прохождении поезда N_X , N_Y .

Автоматизация расчетов проводилась при помощи интерпретируемого языка программирования Python 3 (<https://www.python.org/>), использовались Python библиотека для обработки сейсмических данных ObsPy (<https://docs.obspy.org/>) и некоторые стандартные библиотеки Python. Обработка данных включает два этапа: предварительная обработка и, собственно, мониторинг.

На первом этапе производится (рисунок 4.4.1):

- загрузка данных из файлов;
- подбор параметров для триггера STA/LTA, выделение событий и расчет их длительности при помощи функции `recursive_sta_lta` модуля `trigger` библиотеки ObsPy;
- очистка списка событий от событий с ложными срабатываниями и поездов, состоящих из нескольких вагонов (короткая запись события). В итоговый список были включены события длительностью более 60 с и при условии, что между событиями (между поездами) должно быть больше 5 мин.;
- фильтрация с использованием функции `filter` модуля `stream` библиотеки ObsPy;
- для каждого события проводился расчет параметра;
- запись в текстовый файл рассчитанных параметров для каждого события.



Рисунок 4.4.1 – Схема предварительной обработки

4.5 Блок-схема технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов

Основы технологии сейсмического мониторинга включает следующие основные блоки: аппаратура наблюдения и сбора данных, система (схема) наблюдений, обработка данных, интерпретация результатов. В предыдущих разделах с разной детальностью рассматривался каждый из этих блоков. Остановимся на важных, но неосвещенных вопросах.

Оборудование пункта наблюдений. Для организации непрерывного мониторинга необходимо обеспечить участок наблюдения следующей аппаратурой:

1. Сейсмический пункт, включающего широкополосный датчик, цифровой регистратор (может быть встроенным в датчик), GPS антенну или приемник, комплект соединительных кабелей. Важны: возможность резервного копирования данных на внутренний носитель информации регистратора;

малое энергопотребление, возможность удаленного управления аппаратурой (настройка, перезагрузка и пр.).

2. Электропитание (может быть автономным).
3. Системы передачи данных: сотовый модем/роутер и антенна или централизованное.

Организация работ по мониторингу. На рисунке 4.5.1 представлен вариант организации сейсмического мониторинга с использованием современных технологий, обсуждавшийся в [53].

Пункты сейсмических наблюдений (1) или сейсмические мини-группы, обеспеченные электропитанием и оснащенные точками локального сбора, хранения и передачи данных (2), располагаются вдоль ж/д пути. В случае выхода из строя аналогового датчика его легко заменить и подключить к расположенному рядом блоку цифровой регистрации и передачи данных, без изменений общей схемы мониторинга. При прохождении поезда, оснащенного системой мобильного сбора сейсмических данных (3), происходит последовательный опрос локальных пунктов сбора. Далее данные передаются на сервер в центр данных РЖД (5), где происходит их автоматическая обработка для оценки степени развития негативных процессов и уровня опасности участка (6). Рассматривается возможность использовать алгоритм выделения параметров, характеризующих начало опасных процессов, описанные в 4.4, непосредственно в блоке регистрации.



1 – сейсмический датчик; 2 – система электропитания, локального сбора, передачи и хранения сейсмических данных; 3 – система мобильного сбора сейсмических данных (приема-передачи и хранения), установленная внутри поезда; 4 – мачта сотовой связи; 5 – Центр данных РЖД (РЖД ЦД); 6 – автоматическая обработка данных; 7 – Сейсмологический центр данных (СЦД); 8 – региональная сейсмическая сеть, действующая в регионе

Рисунок 4.5.1 – Схема системы сейсмического мониторинга железнодорожного земляного полотна [53]

На рисунке 4.5.2 показан пример записей поезда и далекого землетрясения (Папуа-Новая Гвинея, 06.05.2019, $t_0=21:19:35$, $m_b=6.9$), который демонстрирует возможность дополнения сейсмологических сетей (8) данными от сети мониторинга пути при условии использования соответствующих датчиков. Как показывают исследования [109] вследствие землетрясений могут возникать разжижение, течение, проседание грунта. Учитывая, что железные дороги проложены и в сейсмоактивных зонах, получение системой мониторинга пути «собственной» записи события важно для оценки устойчивости земляного полотна.

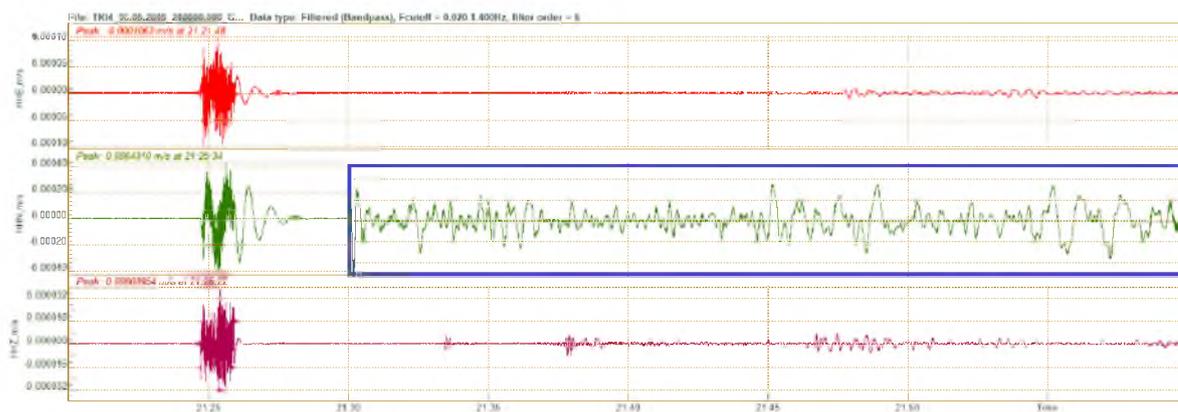


Рисунок 4.5.2 – Волновые формы поезда и телесеismicкого землетрясения Папуа-Новая Гвинея, 06.05.2019, $t_0=21:19:35$, $m_b=6.9$, фильтр 0,02–1,4 Гц, записи выровнены по амплитуде, поэтому на компоненте Y землетрясение - на врезке

4.6 Комплексирование технологии с другими методами обследования

Представлена аппаратурно-методическая разработка для непрерывного геофизического мониторинга основания железнодорожного полотна, использующая сейсмометрические наблюдения вибраций, создающихся проходящими поездами. Данная разработка применима для любых видов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты.

При выявлении развития неблагоприятной ситуации или для контроля сложных инженерно-геологических условий, при необходимости на участке устанавливается локальная система мониторинга, нацеленная на получение дополнительной информации о состоянии природно-техногенной системы, или проводятся комплексные геофизические исследования. Например, можно дополнительно использовать радиоволновой метод, позволяющий следить за изменением размеров и положением неоднородности.

Земляное полотно относится к нижнему строению железнодорожного пути, к которому также относятся некоторые искусственные сооружения: путепроводы, трубопроводы, мосты, тоннели, эстакады, виадуки, подпорные стены для поддержания крутых откосов земляного полотна [110]. Их несущая способность снижается под действием динамической нагрузки и в связи с изменяющимся

климатическими и грунтовыми условиями. В этой ситуации тоже возникает необходимость проведения длительного мониторинга на этих участках с целью выявления на ранней стадии негативных изменений для несущих конструкций, если периодические диагностические проверки не обеспечивают достоверного прогноза надежности конструкций в междиagnostический период.

Для статического контроля угловых отклонений малоподвижных объектов успешно применяются инклинометры с кварцевыми чувствительными элементами [111]. На основании разработанной в ИФЗ РАН под руководством проф. Е.И. Попова технологии изготовления малогабаритных кварцевых наклономеров автором работы с коллегами-учеными В.И. Осика, Б.М. Кочетков, Е.И Павлов был разработан цифровой двухосевой инклинометр. Применяемая технология обеспечивает при относительной простоте исполнения долговременную стабильность основных параметров первичных датчиков, что является главной целью при разработке аппаратуры для долговременных наблюдений.

Новый инклинометр предназначен для измерений малых углов наклона и наклонных перемещений объекта по двум координатам.

Кварцевые инклинометры планируется применять: для мониторинга малых изменений НДС конструкций искусственных сооружений нижнего строения железнодорожного пути, в машиностроении, для мониторинга природных объектов, горных выработок, шахт, в вулканологии.

Для всего спектра возможного применения устройств данного типа в зависимости от решаемой задачи необходим разный рабочий диапазон. Цифровой двухосевой инклинометр имеет динамический рабочий диапазон в пределах от -3 до $+3$ град., что позволяет решать следующие задачи для обозначенных выше объектов:

- для мониторинга малых изменений НДС несущих конструкций искусственных сооружений нижнего строения железнодорожного пути, а также для регистрации подготовки горных ударов и применения в вулканологии — 300 угловых секунд, с разрешающей способностью не хуже 0.01 угловой секунды,

- для стандартного мониторинга плотин и массивных оснований строительных сооружений — 720 угловых секунд, с разрешающей способностью не хуже 0.1 угловой секунды.

- для мониторинга всего парка строительных конструкций — 10800 угловых секунд (3 градуса), с разрешающей способностью не хуже 0.1 угловой секунды.

Температурная стабильность - не хуже 0.5 угловых секунд на градус по Цельсию.

Инклинометры с чувствительным элементом из кварцевого стекла обладает высокой демпфирующей способностью, что является обязательным условием при проведении измерений на конструкциях, подверженных повышенным вибрационным нагрузкам.

За разработку данного устройства автором в составе научного коллектива был получен патент на полезную модель [112].

Выводы по главе 4

Материал изложенный в данной главе подтверждает 2 и 3 защищаемые положения.

Рассмотрена возможность и основные элементы методики сейсмического мониторинга состояния грунтов основания железнодорожного пути с использованием вибраций от движущихся поездов. Выявлены основные параметры сейсмической записи движения поезда, пригодные для автоматизированного определения, свидетельствующие об изменениях в грунтах основания. Все предложенные параметры не критичны к весу и скорости подвижного состава.

Показано, что предлагаемая методика чувствительна не только к уже произошедшим изменениям в земляном полотне, но и позволяет выявлять изменения в грунтах, связанных с сезонным оттаиванием, которые существенно меньше, чем ожидаемые величины, характеризующие начало опасных процессов в грунтах. Последнее может рассматриваться как оценка чувствительности методики к изменениям в грунтах.

Предложенные в Главе 2 аналитические модели взаимодействия движущего состава и грунтов основания пути дают хорошее согласие с экспериментальными данными.

На основании полученных данных считаем целесообразным применять разработанную методику с другими способами обследования ж/д пути и включить в комплекс диагностических средств, применяемых для контроля состояния объектов ж/д инфраструктуры.

Заключение

Основные выводы, полученные из работы, состоят в следующем:

1. Новая аппаратурно-методическая разработка – технология непрерывного сейсмического мониторинга грунтов основания железнодорожного полотна базируется на сейсмометрических наблюдениях вибраций от проходящих поездов. Данная разработка применима для разных видов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты в условиях Крайнего Севера и Сибири.

2. Пределом чувствительности технологии мониторинга изменений в грунтах на ранней стадии развития опасных процессов является наблюдение сезонных вариаций, затрагивающих разные этажи разреза: от насыпи до глубин примерно 10 м.

3. Применение технологии дает сведения об изменениях важных характеристик грунтов: модуле сдвига в верхней части основания и коэффициенте вязкости в подстилающем слое. Существенно, что, во-первых, это одни из наиболее сложно определяемых характеристик грунта и, во-вторых, данные получены без отбора образцов в условиях естественного залегания (*in situ*).

4. Взаимодействие поезда с земляным полотном происходит в трех частотных диапазонах: ВЧ, СЧ и НЧ. Каждому их видов воздействия соответствует своя модель, соответственно: колесо-рельс, упругое деформирование (задача Буссинеска) и упруго-вязкий деформационный процесс (задача Эльзассера).

5. На основании аналитических моделей среды и сопоставления с экспериментальными данными, информативными для проведения сейсмического мониторинга земляного полотна железнодорожного пути, были признаны следующие параметры записи:

- амплитуда первого максимума - синусоидальная волновая форма (СВФ) вертикальной компоненты (СЧ-фильтр),

- отношение амплитуд первых экстремумов в хвостовой части (после прохождения поезда) горизонтальных компонент (R), (НЧ-фильтр),
- времена достижения экстремума компоненты поперек пути (Δt), (НЧ-фильтр)
- отношения медианных значений мощностей колебаний на горизонтальных компонентах (X , Y) к таковой на вертикальной (Z) при прохождении поезда NX , NY , (ВЧ-фильтр)

6. Изменения в среде при мониторинге отслеживаются по четырем независимым параметрам, составляющим основу технологии, что повышает ее надежность.

Для мониторинга состояния грунтов основания ж/д полотна, как основного ж/д сооружения, проработаны все звенья новой технологии (аппаратура, схема наблюдений, обработка данных, интерпретация информативных параметров, возможность комплексирования с существующими методами) определена чувствительность технологии. Следующий шаг – апробация сейсмометрической технологии мониторинга в разнообразных грунтовых и климатических условиях и в дальнейшем распространить на сходные транспортные сооружения и их основания. Перспективным является включение технологии в комплекс мер по обеспечению безопасности на транспорте.

Наиболее важным для практического применения объект исследования - изменения, происходящие в земляном полотне железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера, где разрушение и деградация вечномерзлых грунтов земляного полотна наиболее распространены. Однако, причиной развития деформаций в естественных и антропогенных основаниях объектов транспортной инфраструктуры является не только деградация вечномерзлых грунтов. Там, где вечной мерзлоты нет, распространены так называемые «слабые грунты» на обводненных и заболоченных территориях. Например, вытаявания ледяных линз в многолетнемерзлых грунтах и провалы на заболоченных грунтах в разжиженном состоянии ведут к развитию деформаций, нарушающим целостность основания земляного полотна. В таких ситуациях деформации в большинстве случаев

развиваются стремительно и приводят к полным отказам. Однако, таким разрушениям предшествуют длительное развитие негативных процессов в нижних слоях земляного полотна, при этом сохраняя стабильное положение верхнего строения пути. Что говорит о том, что традиционные методы диагностики в данном случае не могут выявить начальные изменения в грунтовой среде, которые впоследствии приведут к значительным разрушениям.

«Слабые грунты» распространены не только на Крайнем Севере, но и во всей северной части европейской России и других регионах.

Таким образом, в продолжении данного исследования предстоит опробовать сейсмометрическую технологию мониторинга в разнообразных грунтовых и климатических условиях и в дальнейшем распространить на сходные транспортные сооружения и их основания. Перспективным является включение технологии в комплекс мер по обеспечению безопасности на транспорте.

Список Литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 17.06.2008 Т-877-р
2. Ашпиз, Е.С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна. Теоретические основы и практические решения: диссертация на соискание ученой степени доктора наук / Ашпиз Евгений Самуилович. – М, 2002, МГУПС – 396 с.
3. Коншин, Г.Г. Динамические напряжения в земляном полотне от воздействия подвижного состава: учебное пособие / Г.Г. Коншин. – М.: МИИТ, 2004. – 155 с.
4. Явна, В.А. Этапы проектирования интеллектуальной системы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // В.А. Явна, А.С. Каспржицкий, А.А. Кругликов, Г.И. Лазоренко и др. - Управление большими системами: сборник трудов. - Ростовский государственный университет путей сообщения – 2012. – № 38. – С. 105–120
5. Ашпиз, Е.С. Проектирование земляного полотна железных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов / Е.С. Ашпиз // Наука и транспорт. Транспортное строительство. - 2012. - № 4. - С.18–21
6. Ризниченко, Ю.В. Проблемы сейсмологии / Ю.В. Ризниченко. - Избранные труды. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
7. Капустян, Н.К. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий / Н.К. Капустян, Ф.Н. Юдахин - Екатеринбург: УрО РАН, 2007. - 416 с.
8. Вознесенский, Е.А. Динамические испытания грунтов. Состояние вопроса и стандартизация / Е.А. Вознесенский // Инженерные изыскания. – 2013. - №5. – С. 20-26
9. Коваленко, В.Г. Подходы к управлению динамической устойчивостью массивов дисперсных грунтов на территории нефтегазовых месторождений Среднего Приобья / В.Г. Коваленко, Е.А. Вознесенский // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. - 2007. - № 3. - С. 82-85.
10. Коншин Г.Г. Упругие деформации и вибрации земляного полотна: учеб. пособие / Г.Г. Коншин – М.: МИИТ, 2010. – 180 с.
11. Zhang, Z., Dhanasekar M. Dynamics of railway wagons subjected to braking torques on defective tracks // Vehicle system dynamics. 2012. Vol. 50(1). P. 109–131
12. Picoux, B., D. Le Houedec Diagnosis and prediction of vibration from railway trains // Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2005. Vol. 25. P. 905–921. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2005.07.002> Ссылка активна на 14.08.2021
13. Burdzik, R., Nowak B. Identification of the Vibration Environment of Railway Infrastructure // Procedia Engineering 187, 556–561. 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.414

14. Kouroussis, G., Alexandrou G., Connolly D.P., Vogiatzis K., Verlinden O. Railway-induced ground vibrations in the presence of local track irregularities and wheel flats // Proc. of the 5th Internat. Conf. on Comput. Meth. In Structural Dynamics and Earthquake Engng. National Technical University of Athens. 2015. P. 26–37
15. Structural Dynamics and Earthquake Engng. National Technical University of Athens. 2015. P. 26–37
16. Капустян, Н. К. Опыт использования сейсмической регистрации вибраций от поездов для оценки состояния конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс] / Н. К. Капустян, Г. Н. Антоновская, И. М. Басакина // Вестник ВНИИЖТ. – 2017 - Том 76, № 5. Режим доступа: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-281-287> Ссылка активна на 14.08.2021
17. Антоновская, Г.Н. Возможности сейсмических методов для оценки состояния земляного полотна железнодорожных путей в условиях Крайнего Севера / Г.Н. Антоновская, Н.Ю. Афонин, И.М. Басакина, Н.К. Капустян и др. - Транспортные системы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С.133–161 doi: 10.17816/transsyst201733133-161
18. Николаев, А.В. Проблемы нелинейной сейсмики / А.В. Николаев // Сборник статей. – М.: Наука. - 1987. – С. 288.
19. Гамбурцев, Г.А. Сейсмический мониторинг литосферы / А. Г. Гамбурцев. - М.: ИФЗ РАН, Наука, - 1992. - 200 с.
20. Коншин, Г.Г. Методы и средства диагностики земляного полотна: учебное пособие / Г.Г. Коншин - М-во путей сообщ. Рос. Федерации, Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ), Каф. "Путь и путевое хоз-во". - Москва: МИИТ, - 2004. - 213 с.
21. Ашпиз, Е.С. Железнодорожный путь: учебник / Е.С. Ашпиз, А.И. Гасанов, Б.Э. Глюзберг - М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте ISBN 978-5-89035-689-5, - 2013. – 544с.
22. Вавринюк, Т. С. Оценка устойчивости и деформативности земляного полотна железных дорог в условиях распространения мерзлоты: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вавринюк Татьяна Сергеевна. - МГУПС (МИИТ). – 2013. – 204 с.
23. Железняк, М.Н. Произойдет ли катастрофа из-за таяния вечной мерзлоты? [Электронный ресурс] / М.Н. Железняк - директор Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН // ЧС-Инфо, интервью 02.10.2019. – Режим доступа: <https://4s-info.ru/2020/10/02/proizojdet-li-katastrofa-iz-za-tayaniya-vechnoj-merzloty/> Ссылка активна на 14.08.2021
24. Вальцева, Т. Ю. Деформируемость железнодорожных насыпей на слабых основаниях, усиленных геосинтетическими материалами в условиях Дальнего Востока: диссертация канд. тех. наук / Вальцева Татьяна Юрьевна. - Хабаровск, 2011. - 150с.

25. Дыдышко, П.И. Деформации насыпей на мари, их устранение и предупреждение / П.И. Дыдышко // Ж.-д. транспорт. Путь и путевое хозяйство, 1991. - вып. 4. - С. 17–32.
26. Дыдышко, П. И. Деформации земляного полотна железнодорожного пути и их устранение в условиях вечной мерзлоты / П.И. Дыдышко // Журнал Криосфера Земли, том XXI – 2017. - №4. - С. 43-57, УДК 625.12
27. Роман, Л. Т. Механика мерзлых грунтов на пороге XXI века / Л.Т. Роман // Журнал Криосфера Земли, том V- 2002. - № 1. - С. 3–16.
28. Пьянков, С.А. Механика грунтов: учебное пособие ульяновского государственного технического университета / С.А. Пьянков, З.К. Азизов. - Ульяновск: УлГТУ, - 2008. – 103 с.
29. Смолин, Ю.П. Динамическое воздействие поездов на земляное полотно / Ю.П. Смолин // Известия Транссиба. - 2013. - № 1(13) - С. 94–100.
30. Ашпиз, Е.С. Проблемы и пути решения устройства земляного полотна железных дорог на участках с вечномерзлыми грунтами / Е.С. Ашпиз - НПС НП «ОПЖТ». – 2018.
31. Веденисов, Б.Н. Устройство пути и способы его лечения / Б.Н. Веденисов, Н.Т. Митюшин, А.И. Стаханов, Г.М. Шахунянц, Под общей ред. проф. Б.Н. Веденисова и проф. Н.Т. Митюшина - том. 1. - М.: Трансжелдориздат, - 1937. - 320 с.
32. Шахунянц, Г.М. Земляное полотно железных дорог / Г.М. Шахунянц - М.: Трансжелдориздат, 1953. - 827 с
33. Моченов, Г.М. Дефекты, повреждения и разрушения земляного полотна железных дорог (Классификация) / Г.М. Моченов, В.П. Титов. - М.: Транспорт, 1972. - 49 с.
34. Грицык, В.И. Классификация деформаций земляного полотна / В.И. Грицык // Путь и путевое хозяйство. – 1991. - №1. - С. 31-32.
35. Яковлева, Т.Г. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, СИ. Клинов, Н.Н. Путря, М.П. Смирнов; Под ред. Т.Г. Яковлевой. - М.: Транспорт, 1999. - 405 с.
36. Аверочкина, М.В. Справочник по земляному полотну эксплуатируемых железных дорог / М.В. Аверочкина, С.С. Бабицкая, СМ. Большаков и др.; Под ред. А.Ф. Подпалого, М.А. Чернышева, В.П. Титова. - М.: Транспорт, 1978. - 766 с.
37. Машенко, А.В. Специальные методы механики грунтов и механики скальных пород: учебное пособие / А.В. Машенко, А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет – 2014. - 176 с
38. Ухов, С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебное пособие / С.Б. Ухов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1994. – 527 с.

39. Далматов, Б.И. Механика грунтов основание и фундаменты: учебник – 2-е изд. перераб. и доп. / Б.И. Далматов – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1988. – 415с.
40. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие / Н.А. Цытович - М. «Высшая школа», 1973. – 449с.
41. Дыдышко, П.И. Криогенные деформации земляного полотна и его стабилизация на основе управления тепломассопереносом : автореф. дис. док. техн. наук. / Дыдышко Петр Иванович. - М.: ВНИИЖТ, 1995. – 51с.
42. Куликов, А.И. О глобальном изменении климата и его экосистемных следствиях / А.И. Куликов, Л.Л. Убугунов, А.Ц. Мангатаев // АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ – 2014. - том 20. - № 3 (60) - С. 5-13.
43. Конищев, В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата / Конищев В.Н. // Вестник Московского Университета. Серия 5: География. – 2009. - № 4. – С. 10-20.
44. СНиП 2.02.04-88. [Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Госстрой СССР.] - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. - 56 с., 157. ВСН 61-89
45. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты [ЦНИИС Минтранс СССР.] - М.: ЦНИИС, 1990. - 208 с.
46. Лобанов, И.З. Расчет слабых и оттаивающих оснований под насыпями с учетом пластических деформаций грунтов / И.З. Лобанов – Новосибирск: Инженерно геологические условия и особенности фундаментостроения в условиях Сибири. Межвузовский сборник научных трудов (НИИЖТ), 1982. - 48-61с.
47. СП 32-104-98: [Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм.] Дата актуализации: 01.01.2021
48. Капустян, Н.К. Моделирование состояния нижнего строения железнодорожного пути с применением сейсмических методов / Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина, А.В. Данилов // Наука и технологические разработки. - 2018. - Т. 97. - № 1. - С. 35–48. [Тематический выпуск “Прецизионный геофизический мониторинг природных опасностей Часть 1. Приборы и технологии”]. DOI: 10.21455/std2018.1-4
49. Kapustian, N.K., Antonovskaya G.N., Basakina I.M., Danilov A. V. Modeling the state of a railway track foundation by seismic methods // Seismic Instruments. - 2018. Vol. 54, N 6. P. 682–690 <https://doi.org/10.3103/S074792391806004X>
50. Смолин, Ю.П. Динамическое воздействие поездов на земляное полотно / Ю.П. Смолин // Известия Транссиба. - 2013. - № 1(13). - С. 94–100.
51. Колос, А.Ф., Крюковский Д.В. Особенности колебательного процесса грунтов насыпей, опирающихся на торфяное основание, при движении поездов / А. Ф. Колос, Д. В. Крюковский // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2013. - №2 (35) – С. 120-126.
52. Орлова, И.П. Возможности сейсмического оборудования для мониторинга основания железнодорожных путей в районах со сложными грунтовыми

- условиями/И. П. Орлова, Н.К. Капустян, Г. Н. Антоновская, И.М. Басакин// Коми научный центр УрО РАН г. Сыктывкар. – 2020–№ 4(304). С. 33–39. doi: 10.19110/geov.2020.4.5
53. Антоновская, Г. Н. Использование широкополосной сейсмической аппаратуры в задачах интеллектуального мониторинга земляного полотна железнодорожного пути / Г.Н. Антоновская, Н.К. Капустян, Ю.С. Ромен, А.В. Данилов // Санкт-Петербург: Транспортные системы и технологии. – 2019 – Т. 5. – № 4. – С. 96–114. doi: 10.17816/transsyst20195496-114, 5
54. Коншин, Г.Г. Динамические напряжения в земляном полотне от воздействия подвижного состава: учебное пособие / Г.Г. Коншин. - М.: МИИТ, 2004. - 155 с.
55. Антоновская, Г.Н., Возможности сейсмической аппаратуры в задачах оценки состояния железнодорожных насыпей / Г.Н. Антоновская, Н.К. Капустян, Е.В. Федоренко // Научный журнал ИФЗ РАН. Сейсмические приборы. - 2019. - Т. 55. - № 3. - С. 61–73.
56. Фуникова, В.В. Закономерности динамической устойчивости песчаных и глинистых грунтов (монография) / В.В. Фуникова - [LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrucken, Deutschland, 2011. P. 199] Funikova VV. Regularities of dynamic stability of sandy and clay soils (monograph). LAP LAMBERT Academic Publishing Saarbrucken, Deutschland, 2011. (In Russ)
57. Chen, R. Experimental study on dynamic load magnification factor for ballastless track-subgrade of high-speed railway / R. Chen, X. Zhao, X. Bian, H. Jiang, Z. Wang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. № 5. P. 306–311.
58. Wei, W. Dynamic characteristics of railway subgrade under heavy haul train / Wei Wei, Zeng Zhi-ping, Wu Bin, Wang Wei-dong, and Yan Hai-jian // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2017. P. 209-232.
59. Вериго М.Ф., Коган А.Л. Взаимодействие пути и подвижного состава. Под ред. М.Ф. Вериго / М.Ф. Вериго, А.Л. Коган - М.: Транспорт, 1986. - 559 с.
60. Dong R.G., Sankar S., Dukkipati R. V. A finite element model of railway track and its application to the wheel flat problem. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F // J. Rail and Rapid Transit. 1994. V. 208. № 16. P. 61–72.
61. Yan W., Fischer F.D. Applicability of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems // Archive Appl. Mech. 2000. V. 70. № 4. P. 255–268.
62. Wu T.X., Thompson D.J. A hybrid model for the noise generation due to railway wheel flats // J. Sound and Vibration. 2002. V. 251. № 1. P. 115–139.
63. Кожемяченко, А.А. Граничные условия для моделирования воздействия колес на железнодорожный путь / А.А. Кожемяченко, И. Б. Петров, А. В. Фаворская, Н. И. Хохлов // М.: РАН - Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2020. - Т. 60. - № 9. - С. 1587–1603.
64. Уланов, И.С. Обоснование конструктивно-технологических решений упрочнения слабых оснований земляного полотна скоростных железнодорожных

- магистралей: диссертация на соискание ученой степени кандидата наук /Уланов Иван Сергеевич. – Москва, 2019. РУТ(МИИТ). – 246 с.
65. Терцаги, К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. - М.: Стройиздат, 1961. - 507 с.
66. Герсеванов, Н.М. Основы динамики грунтовой массы / Н.М. Герсеванов – М.: Госстройиздат, 1933. – 196 с.
67. Пузыревский, Н.П. Фильтрующие насыпи / Н.П. Пузыревский – М.: Госстройиздат, 1934. – 173 с.
68. Флорин, В. А. Основы механики грунтов / В.А. Флорин - Л.: Стройиздат, 1959. – 360с.
69. Зарецкий, Ю.К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю. К. Зарецкий, В.Н. Ломбардо - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.
70. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов: учебное пособие для строительных вузов / С.С. Вялов - М.: Высшая школа, 1978. - 447 с
71. Гольдин, А.Л. Проектирование грунтовых плотин / А. Л. Гольдин, Л.Н. Рассказов. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: АСВ, 2001. - 375 с.
72. Шашкин, А.Г. Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А.Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2011. - №2. - С. 1 - 32.
73. Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. - М.: ФГУП Информавтодор, 2004. – 252 с.
74. Уланов, И.С. Оценка деформаций недостаточно прочных оснований земляного полотна скоростных магистралей / И.С. Уланов, Д.В. Долгов, А.М. Черкасов // Материалы всероссийской межвузовской конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития отраслевой науки». – 2017. – С. 563–567.
75. Алексеев, С. И. Механика грунтов: учебное пособие для студентов ВУЗов / С. И. Алексеев. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. – 111 с.
76. Городецкий, А. С. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона / А.С. Городецкий, Л.Г. Батрак, Д.А. Городецкий, М.В. Лазнюк, С.В. Юсипенко. – Киев: ФАКТ, 2004. – 104 с.
77. Улицкий, В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин - СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. - 281 с.
78. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция. СНиП 2.02.01-83 - М: Стандартинформ, 2016. – 220 с.
79. Леонтьев, Н.Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие / Н.Е.Леонтьев. — М.: Изд-во Центра прикладных исследований при механико-математическом факультете МГУ, 2009. — 88 с.

80. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы. / Р. Галлагер — М.: Мир, 1984—428 с.
81. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг, перевод с английского О.П. Троицкого и С.В. Соловьева под ред. Ю.К. Зарецкого - М.: Недра, 1974. - 239 с.
82. Лионс, Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж.Л.Лионис, перевод с французского Л. Р. Волевича; под ред. О. А. Олейника. - М.: Мир, 1972. - 587 с.
83. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б.Фадеев. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
84. Antonovskaya, G.N., Dobrovolsky, I.P., Kapustian, N.K., Orlova, I.P. 2021. Determination of the in situ elastic proper-ties of a railway roadbed by seismic observations. *Seismic Instruments* 57(1): 1–8. DOI: 10.3103/S0747923921010023.
85. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий - Мир. 1975. - 872 с.
86. Ломакин, В. А. Теория упругости неоднородных тел / В.А. Ломакин - Изд-во МГУ. 1976. - 368 с.
87. Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. Conduction of heat in solids. Second Edition, Oxford Univ. Press, Oxford, 1959. P. 310
88. Elsasser, W.M. 1971. Two-layer model of upper-mantle circulation. *J. Geophys. Res.* 76(20): 4744-4753.
89. Мухамедиев, Ш.А. Нестационарный динамический контроль сейсмической активности платформенных областей со стороны срединно-океанических хребтов / Ш.А. Мухамедиев, А. Ф. Грачев, С. А. Юнга С. А. // *Физика Земли.* – 2008. - № 1 - С. 12–22 - УДК 550.34+551.24+539.3
90. Схема территориального планирования Онежского муниципального района [Электронный ресурс] Том 1. – Санкт-Петербург, 2014. – Режим доступа: http://www.onegaland.ru/about/gradostroitelstvo/skhema_terr_plan/
91. Зоренко Т. Н., Черемхина Г. М., Корепанов В. С., Вертунова Л. С., Левин В. И, Рыбалко А. Е. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Серия Онежская. Лист Q-37-XXXIII, XXXIV. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, 2000. – 118 с.
92. Ключева В. Н., Покровская М. В., Баранов М. И. Инженерно-геологическая съемка масштаба 1:200000. Листы: Р-37-III, IV, X, XI, XII, XVI, XVII / Производственное геологическое объединение «Гидроспецгеология», Гидрогеологическая экспедиция 29 района. Архангельский филиал ФБУ «ТФГИ по Северо-Западному федеральному округу» – 1984.
93. СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Свод правил. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200000255> Ссылка активна на 14.08.2021
94. Nanometrics. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.nanometrics.ca> Ссылка активна на 14.08.2021

95. CMG-6TD – DSYS [Электронный ресурс] Режим доступа: – <https://dsys.ru/shop/pokategorijam/seismicheskoe-oborudovanie/velosimetry/cmg6td.html> Ссылка активна на 14.08.2021
96. Guralp Systems. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.guralp.com/> Ссылка активна на 14.08.2021
97. Форс-балансный акселерометр AC-73/72/71. - [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.vulcan-inc.ru/index.php/equipment/geosig/ac-73>. Ссылка активна на 14.08.2021
98. Titan posthole accelerometer - [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.nanometrics.ca/products/accelerometers/titan-posthole-accelerometer> Ссылка активна на 14.08.2021
99. Trillium Compact [Internet]. - [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact>. Ссылка активна на 14.08.2021
100. Trillium Compact Posthole [Internet]. - [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-compact-posthole>.
101. Trillium Cascadia [Internet]. - [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.nanometrics.ca/products/seismometers/trillium-cascadia> Ссылка активна на 14.08.2021
102. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа – МОЭД-1П. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.misd.ru/cooperation/commercial/10133/> Ссылка активна на 14.08.2021 (In Russ.).
103. Kostylev D V, Bogomolov L M, Boginskaya N V // About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 324. 2019. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
104. GeoDAS - [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.geosig.com/files//GeoDAS_v2_36_Setup_en.zip. Ссылка активна на 14.08.2021
105. Allen, R.V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bulletin of the Seismological Society of America - 1978. - 68(5): 1521-1532.
106. РЖД [Электронный ресурс] Режим доступа: https://press.rzd.ru/smi/public/ru?STRUCTURE_ID=2&layer_id=5050&page5049_3049=5694&refererLayerId=5049&id=12358 . Ссылка активна на 14.08.2021
107. Shalev E. Water-level oscillations caused by volumetric and deviatoric dynamic strain/Kurzton I, Doan M-L, Lyakhovsky V // Geophysical Journal International, Vol. 204. Issue 2. February 2016. P. 841–851. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv483>
108. Трофимов, В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королёв, Е.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С. Зиангиров под. ред В.Т Трофимова. - М., Изд-во МГУ и "Наука". - 2005 1024 с.

109. Вознесенский, Е.А. Землетрясения и динамика грунтов / Е.А. Вознесенский // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 2. – С. 101–108.
110. Уздин, М.М. Железные дороги: общий курс, учеб. для вузов / М.М. Уздин, Ю.И. Ефименко, В.И. Ковалев [и др.]; под ред. М.М. Уздина. – 5-е изд. – СПб.: Информ. центр «Выбор», 2002. – 368 с.
111. Осика, В.И. Мониторинг деформационного состояния ответственных и технически сложных объектов / Осика, В. И. Кочетков Б. М., Павлов Е. И., Качан (Орлова) И.П. // Научное приборостроение. – 2017. - том 27, № - С. 46–52 DOI: 10.18358/np-27-1-i4652
112. Павлов Е.И. Патент на полезную модель № 196550 «Устройство двухкоординатное для измерения угловых перемещений» / Е.И. Павлов, Б.М. Кочетков, В.И. Осика, И.П. Орлова – 2020.