

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва-2022

Работа выполнена в лаборатории методов прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель: **Капустян Наталия Константиновна**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории методов прогноза землетрясений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН;

Официальные оппоненты: **Владов Михаил Львович** доктор физико-математических наук, профессор кафедры сейсмологии и геоакустики геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова;

Ашпиз Евгений Самуилович доктор технических наук, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта»;

Ведущая организация: **Геофизический институт** - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (ГФИ ВНЦ РАН), г. Владикавказ.

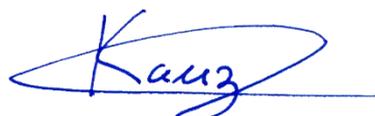
Защита диссертации состоится **12 мая 2022 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Камзолкину Владимиру Анатольевичу.

Автореферат разослан «_____» марта 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Протяженность железных дорог России - 85,5 тыс. км, они расположены в регионах, различающихся по климату и геологическому строению. Техногенные нагрузки и климатические изменения влияют на состояние земляного полотна, что требует обследования для обеспечения безопасности. Наибольшие проблемы возникают в районах распространения карста, вечной мерзлоты, в местах, подверженных оползням, селям и пр. Сейчас растут объемы грузопотоков и скорости поездов, т. е. увеличиваются статические и динамические нагрузки на путь, что грозит безопасности насыпей на слабых основаниях.

Степень разработанности темы исследования. Современные методы диагностики земляного полотна основаны на совокупности геодезических и геофизических методик, численного моделирования, а также на использовании специально разработанных передвижных диагностических комплексов. Учитывая важность проблемы для России, значительный вклад в разработку методов диагностики внесли отечественные исследователи и их школы (Е.С. Ашпиз, Г.Г. Коншин, Е.А. Вознесенский, В.А. Явна, и др.), что отражено в нормативах (СНиП 2.02.04-88, СП 261.1325800.2016 и др.). Тем не менее, пока малоизученным является обнаружение на ранней стадии опасных процессов в грунтах оснований ж/д полотна. Моделирование дает прогноз устойчивости насыпи, но диагностики его состояния в натуральных условиях не разработано из-за недостаточной разрешающей способности методик. Также общей особенностью существующих методов является то, что обследования проводятся эпизодически. Непрерывного слежения за изменениями состояния грунтов (мониторинг) не проводится, в первую очередь, из-за отсутствия соответствующей технологии.

Как известно, сейсмические наблюдения являются наиболее информативными среди геофизических методов (Ризниченко, 1969). В частности, сейсморазведка дает детальные скоростные разрезы оснований ж/д пути но, в основном, опирается на интерпретацию кинематики волнового поля. Динамику волн, а именно их амплитуды и спектры, используют крайне редко, хотя именно эти параметры наиболее чувствительны к изменениям деформационных свойств среды (Николаев, 1981, Гамбурцев, 1992, Капустян, Юдахин, 2007 и др.). Поэтому, использование динамики волновых полей при просвечивании насыпи составляет основу увеличения разрешающей способности методов выявления процессов на ранней стадии.

Резерв увеличения чувствительности технологии мониторинга можно искать в каждой из ее составных частей: в подборе зондирующего среду источника, аппаратуры и схемы наблюдений, в обработке данных. Для мониторинга важно обеспечить постоянные наблюдения, для них можно использовать проходящие поезда (десятки в день). Движущийся транспорт оказывает на грунт комплексную нагрузку – вибрационную, которая может быть сигналом, просвечивающим грунт, и деформирующую, аналогичную штампам при полевых испытаниях грунтов (пенетрация, динамическое зондирование и пр.). Но, чтобы зафиксировать отклик среды на это комплексное воздействие, необходима специальная аппаратура, например, широкополосный трехкомпонентный сейсмометр для регистрации колебаний с периодами до 100с. Такие приборы на транспорте ранее не применялись. Новый

экспериментальный подход требует понимания, какие особенности изменения состояния грунтов отражаются на сейсмических записях поезда, какие параметры записи информативны и как наиболее эффективно обрабатывать сейсмограммы для возможности автоматизации процесса мониторинга.

Таким образом, для увеличения безопасности на участках пути с 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 станет дополнением к существующим методам.

Целью диссертационной работы является разработка технологии сейсмического мониторинга состояния земляного полотна ж/д путей на основе анализа сейсмических волновых полей, регистрируемых при прохождении поезда, рассмотрение возможности 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 изменений в земляном полотне 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.

Анализ известных методов исследования земляного полотна, показал: диагностика на транспорте нацелена в первую очередь на выявления деформаций, вызывающих полные отказы земляного полотна, а «слабые» вариации практически не исследуются; при проведении обследований основное внимание приковано к верхней части разреза до 5 м; свойства грунтов изучалось преимущественно при высокочастотных вибромеханических воздействиях, данные о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках отсутствуют. В ходе диссертации были рассмотрены эти нерешенные проблемы.

Научная новизна:

1. Впервые исследовано поведение грунтов основания насыпей при низкочастотных нагрузках (ниже 0,5 Гц), создаваемых подвижным составом, в трех взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном и горизонтальных).
2. Экспериментально показана и подтверждена моделированием возможность проведения сейсмического мониторинга состояния грунтов с выявлением изменений, свойственных ранней стадии опасных процессов.

3. Получены согласующиеся с экспериментом аналитические решения задачи деформирования насыпи, включающие параметры среды, в том числе вязкость грунтов основания. Модели позволяют объяснить процессы 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*).

4. Выявлены параметры сейсмической записи, которые характеризуют состояние этажей разреза до 10 м и позволяют наблюдать изменения в грунтах из-за сезонных вариаций.

Практическая значимость

1. Технология позволяет вести мониторинг без нарушения расписания движения, что снижает расходы по сравнению с существующими методами диагностики.
2. Выявлены информативные параметры сейсмограмм, отражающие разные виды нагрузок на грунт, по которым можно судить об изменениях на ранней стадии несущей способности насыпи и грунтового основания. Это позволит своевременно произвести необходимые работы по укреплению земляного полотна до развития опасных процессов.
3. Предложены алгоритмы для автоматизированной обработки сейсмограмм, которые основаны на статистических оценках массивов записей, что существенно снижает зависимость результата мониторинга от параметров поезда.

Разрабатываемая технология применима для широкого набора типов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты.

Методология и методы исследования. Обследования грунтов оснований железнодорожной насыпи относятся к пассивным сейсмическим методам. Используются современные трехкомпонентные широкополосные сейсмические датчики (ТС-120s, Nanometrics). Работа построена на экспериментальных наблюдениях двух типов: одновременно на тестируемом и опорном участках, и длительной регистрации (более 50 дней) с записью 1590 поездов. Выявление зависимости параметров записей от свойств грунтов выполнялось путем подбора упругих моделей и анализа аналитических решений задачи воздействия на среду движущегося поезда. При обработке данных использовался статистический анализ параметров для получения надежных оценок. Для выявления изменений в грунтах применялись две методики: 1) сопоставление параметров записей, полученных одновременно на тестовом и ослабленном участках, 2) при мониторинге анализировались кривые временного хода информативных параметров записи. Для оценки чувствительности технологии к изменениям состояния земляного полотна применялось построение численных моделей взаимодействия подвижного состава и грунтов основания пути.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Аналитические модели деформирования земляного полотна при воздействии на него движущегося 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 автоматизированного 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.

Личный вклад. Автором выполнены: обзоры опасных процессов в грунтах, методов их наблюдения, моделей деформирования при взаимодействии подвижного состава и основания пути; предложены оригинальные способы обработки и анализа данных: с фильтрацией в трех частотных диапазонах, статистический анализ для автоматизации обработки записей и выделения информативных параметров; выполнена постановка задачи и анализ результатов численного и аналитического моделирования, расчеты с использованием аналитических моделей, результаты сопоставлены с экспериментальными данными

Апробация работы. Результаты работы представлены на: 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» Москва, 18-19 декабря 2019, 7-й Международном научно-практическом симпозиуме «Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси», Сергиев Посад, 14-16 ноября 2018 г., Научной конференции молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва 28-29 октября 2020 г., «Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020». Москва, 19-22 октября 2020 г. XVII Международной научно-технической конференции «Чтения, посвященные памяти Г.М. Шахунянца», 19 ноября 2020 Москва, РУТ (МИИТ), 17-й Научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2021» 26-30 апреля 2021 г. Геленджик.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация включает 124 страницы текста, 42 рисунка, 10 таблиц, список литературы насчитывает 112 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Капустян Наталии Константиновне за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор благодарен сотрудникам лаборатории сейсмологии ФИЦКИА УрО РАН, и в первую очередь ее руководителю д.т.н. 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» (научный руководитель Н.К. Капустян).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи работы, её научная новизна, отражена практическая значимость результатов работы.

Глава 1. Опасные геологические процессы и методы обследования грунтов оснований железнодорожных путей. Представлены обзоры опасных процессов в грунтах транспортных сооружений и основных методов их инструментального обследования. Рассматриваются существующие способы диагностики земляного полотна и выделяются нерешенные ранее проблемы. На основе проведенного анализа формулируются задачи для создания технологии сейсмического мониторинга грунтов основания ж/д путей.

В разделах 1.1 и 1.2. описывается строение земляного полотна ж/д пути, приводятся основные характеристики подвижного состава. Кратко рассматривается многофакторное динамическое воздействие подвижного состава на грунты основания и показано, что именно состояние земляного полотна является основным фактором, определяющим работоспособность пути. Представлен обзор основных видов остаточных деформаций земляного полотна. Обсуждается зависимость деформаций от инженерно-геологических и климатических условий мест расположения линий железных дорог, в том числе в районах многолетнемерзлых грунтов (около 5 тыс. км). Суммарное протяжение криогенных деформаций составляет 1758 км или 34,3 % от общесетевого. Приведен обзор представлений о процессах, приводящих к появлению деформаций криогенной природы (Н.А. Цытович, Е.С. Ашпиз, П.И. Дыдышко и др.).

В разделе 1.3. рассматриваются существующие основные методы инструментального обследования состояния пути. Диагностика направлена на определение фактического состояния земляного полотна, качественную и количественную оценку происходящих в земляном полотне изменений под влиянием поездной нагрузки и климатических факторов, а также на прогнозирование состояния земляного полотна в процессе его эксплуатации. Несмотря на разнообразие методов диагностики, комплексного подхода к обследованию железнодорожного пути до сих пор не разработано.

В разделе 1.4 обсуждаются нерешенные проблемы обследования ж/д пути и задачи исследования. 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, превышающие допустимый уровень деформативности. «Слабые» вариации деформационных параметров среды практически не исследуются;

- при изысканиях на основе сейсмических методов анализируются, как правило, кинематические характеристики записей (времена вступлений, т.е. скорости распространения), динамические характеристики подключаются в основном при анализе затухания волн. Опыт сейсмологического мониторинга (А.В. Николаев, А.Г. Гамбурцев, Н.К. Капустян и др.) показывает существенно большую тензочувствительность динамических характеристик (амплитуды, частотного состава). 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». Это связано с тем, что детальные изыскания проводились мессдозами (тензодатчиками, традиционно применяемых на транспорте), не позволяющими увидеть эти взаимодействия. Современное сейсмологическое оборудование дает такую возможность;

- исследование деформирования полотна при движении поезда ведется в основном по вертикали. Тем не менее, деформации пути по горизонтали могут превосходить вертикальные;

- свойства грунтов ж/д полотна в волновом поле изучались преимущественно при высокочастотных вибромеханических воздействиях от транспорта, но пока недостаточно данных о поведении грунтов при низкочастотных (ниже 0,5 Гц) нагрузках.

Задача исследования состоит в расширении сведений о поведении земляного полотна и подстилающих грунтов при высокочастотном и низкочастотном воздействиях движущегося поезда с использованием современного сейсмологического оборудования и анализа сейсмических волновых полей разной природы, и в разработке технологии сейсмического мониторинга состояния земляного полотна железнодорожных путей. Для этого необходимо провести натурные наблюдения вибрационных воздействий поездов широкополосной сейсмической аппаратурой. Выполнение численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) насыпи при малых изменениях свойств и различного состояния грунтов позволяет обосновать чувствительность наблюдений к изменениям в среде.

Выводы по главе 1. Проблема деградации земляного полотна является причиной частичного и полного отказа работы ж/д пути. Наиболее масштабными являются деформации, имеющие криогенную природу. 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.

Глава 2. Основные представления о взаимодействии подвижного состава и грунтов основания пути. Рассматриваются известные модели деформирования при основных представлениях о взаимодействии подвижного состава и основания пути. Обсуждаются возможности конечноэлементных моделей на примере района исследования. Предложены аналитические модели взаимодействия подвижного состава и грунтов основания, ранее не применявшиеся для ж/д пути.

В разделе 2.1 представлены известные модели деформационного поведения грунтов и применяемые методы для расчета деформаций грунтов насыпей и их оснований. Обсуждаются существующие принципы математического моделирования и аналитических представлений процессов, описывающих изменения свойств грунтов при вибрационном воздействии, а также модели, описывающие взаимодействие системы «рельс-колесо». Исследованию 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.

Однако, остаются нерешенными такие принципиальные вопросы, как реакция земляного полотна на низкочастотные деформирующие воздействия.

В разделе 2.2 рассматриваются результаты численного моделирования методом конечных элементов НДС земляного полотна в районе исследования. Расчеты проводились в осесимметричной форме в статической постановке, что качественно соответствует длиннопериодным колебаниям. Численное моделирование выполнено в программе Plaxis 2D, предназначенной расчетов НДС и смещений, использована модель Кулона-Мора.

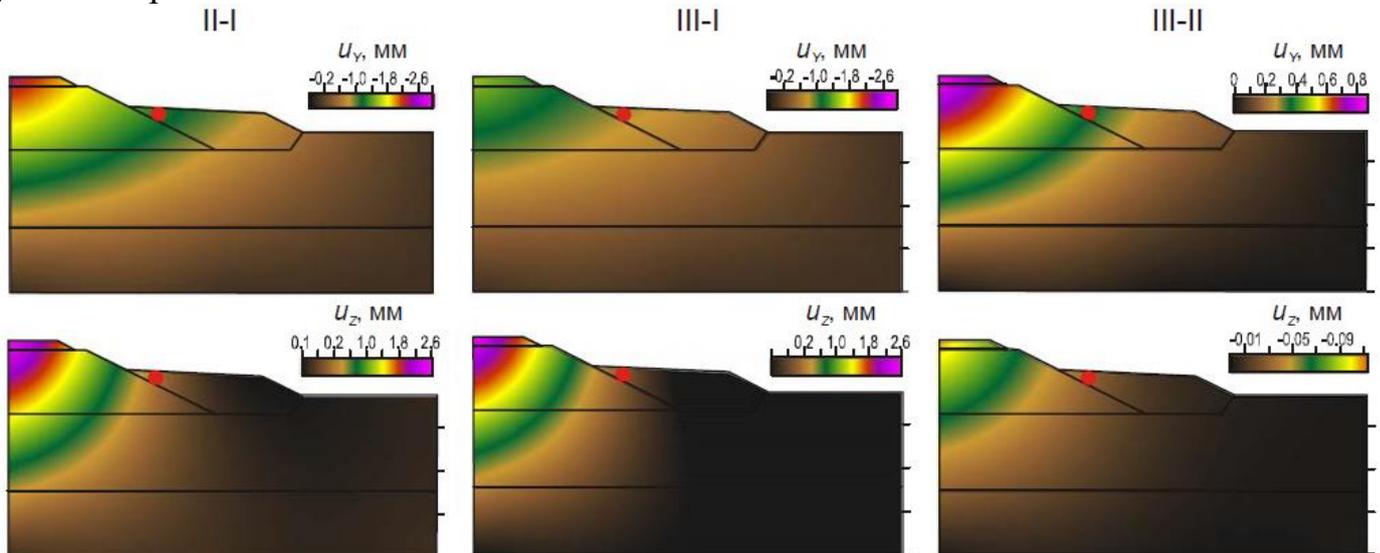


Рисунок 1 – Модели приращения изополей вертикальных и горизонтальных (Y) смещений, цифрами показано между какими моделями находилось приращение, ● кружок – место размещения датчика

Для построения моделей использовался разрез, полученный при выполнении малоглубинной сейсморазведки для обследуемых участков с некоторым упрощением рельефа границ и генерализацией скоростной колонки. Были выбраны три модели: I - исходная для мониторинга; II – вариант сезонных изменений при зимнем промерзании, III – появление обводнения или возможность деградации мерзлых грунтов. Изополя разности смещений для пар моделей (II–III, I–III, I–II) дают оценку возможности регистрации изменений свойств состояния земляного полотна при переходе к мерзлому состоянию или к влагонасыщенному (рисунок 1). Максимальные изменения происходят непосредственно в подрельсовой области насыпи – 1–3 мм, что и следовало ожидать. В месте установки датчика приращение смещений - менее 1 мм. Учитывая, что ведется регистрация не виброперемещений, а виброскоростей на периодах около 100 с, значения будут порядка 0.05 мм/с. Это соответствует техническим возможностям выбранной нами аппаратуры для наблюдения процессов деформирования грунтов и определяет требования к аппаратуре. Таким образом, моделирование подтверждает возможность мониторинга состояния грунтов основания железнодорожного полотна с использованием точечных сейсмометрических наблюдений.

В разделе 2.3 получены аналитические решения задачи деформирования насыпи для однородного полупространства с поездом в виде движущейся силы, создающей смещения в заданной точке грунта. Исходя из характерных размеров, скорости нарастания нагрузки и скорости распространения упругих волн, хорошим приближением будет процесс, проходящий через множество равновесных состояний.

Данный подход для деформирования грунтов движущимся поездом был предложен д.ф.-м.н. И.П. Добровольским.

Принимая во внимание приближения, при которых полупространство принято линейно-упругим, изотропным и однородным, а нагрузки – вертикальными, для рассматриваемой проблемы исходной становится задача Буссинеска. Задача рассматривается в декартовой системе координат (x, y, z) для полупространства $z \geq 0$. Вектор перемещения u имеет компоненты (u, v, w) вдоль осей (x, y, z) соответственно.

Решение задачи Буссинеска для перемещений имеет вид:

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

P – вертикальная сила, μ – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, (x, y, z) – координаты точки датчика, (X, Y) – точка приложения силы, $R = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2}$. Показано, что при движении поезда весом P со скоростью V действие нагрузки на площадку $S = L \times 2b$ можно свести к зависимости скорости колебаний для компоненты Z :

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

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

Аналогично получаем: виброскорость по X (3) и по Y (4):

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

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

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными приведено в Главе 4. В разделе 2.4 рассматривается задача Эльзассера, в результате получены аналитические решения задачи деформирования насыпи для упругого слоя на вязком полупространстве, описывающие распределение напряжения в среде, включающей насыпь и подстилающий грунт, в зависимости от расстояния от полотна и времени после воздействия нагрузки, т.е. 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 (Elsasser, 1971), схема - на рисунке 2.

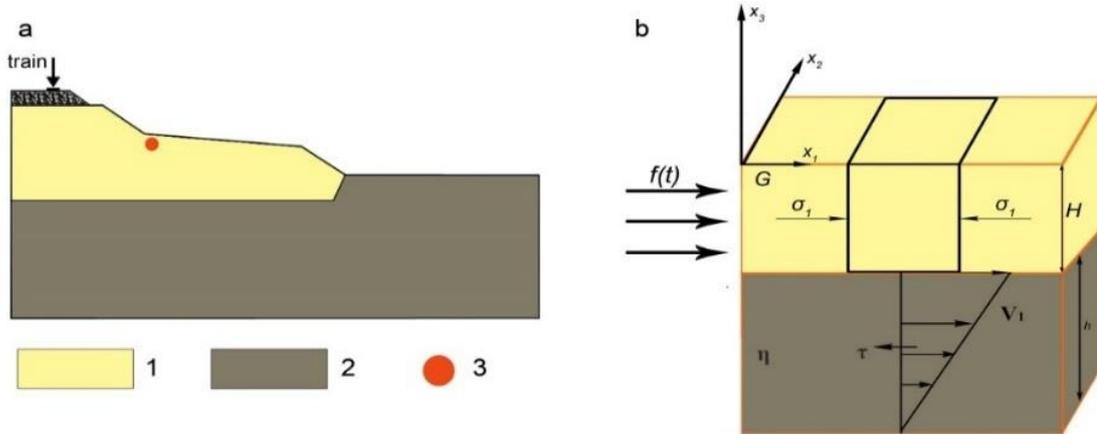


Рисунок 2 - Модель передачи возмущений, создаваемых поездом в земляном полотне в горизонтальном направлении: а - схематический разрез, б - геометрия системы земляное полотно и возмущение НДС,
1 - земляное полотно, 2 - грунт (валунный суглинок), 3 - сейсмический датчик

Принимаем давление поезда $p_r = const$, оно служит источником воздействий на насыпь. 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:

$$\frac{\partial f(x_1, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 f(x_1, t)}{\partial x_1^2}, \quad \text{начальному условию: } f(x_1, 0) = 0 \text{ при } 0 < x_1 < \infty, \text{ и}$$

$$\text{граничному условию: } f(0, t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t < T \\ 0, & \text{при } T < t < \infty \end{cases} \quad (5)$$

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 (6) имеет аналитическое решение (Мухамедиев, Грачев, Юнга, 2008) в виде:

$$f(x_1, t) = \begin{cases} \Phi^*\left(\frac{x_1}{2\sqrt{at}}\right), & \text{при } 0 < t < T \\ \Phi^*\left(\frac{x_1}{2\sqrt{at}}\right) - \Phi^*\left(\frac{x_1}{2\sqrt{a(t-T)}}\right), & \text{при } T < t < \infty \end{cases} \quad (6)$$

где $\Phi^*(\xi) = 1 - \Phi(\xi)$, $\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-\xi^2} d\xi$ – интеграл ошибок. Решение задачи (6) зависит от параметра a и промежутка времени T действия возмущения. Расчеты представлены в Главе 4.

Выводы по главе 2. Материал данной главы относится к обоснованию защищаемого положения 1. Рассмотрены известные представления о взаимодействии поезда с земляным полотном и модели деформирования грунтов. Для высокочастотной нагрузки применяются модели системы «колесо-рельс», для низкочастотной – движущийся ж/д

состав - грунт. Численное моделирование НДС грунтов при статической нагрузке (PLAXIS 2D) дало пространственную картину НДС среды, а также при переборе моделей и нагрузок - зоны изменения состояния грунта. Но именно описание изменения 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. Предложены две модели: 1) однородное деформируемое полупространство с поездом в виде движущейся силы, создающей смещения в заданной точке грунта – задача Буссинеска, 2) 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.

Описывается комплекс наблюдений на Северной железной дороге (СЖД) в Архангельской обл., выполненных ФИЦКИА УрО РАН. Обсуждаются возможности современной сейсмической аппаратуры разного типа. Рассматриваются способы предобработки и анализа записей.

В разделе 3.1 представлено описание инженерно-геологических и климатических особенностей исследуемого участка и комплекса экспериментальных исследований. Натурные наблюдения проводились на СЖД в Онежском р-не Архангельской обл. в течение двух полевых сезонов 2017 и 2019 гг. Объект исследований - земляное полотно с участками заторфованных 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.

В 2017 г. измерения велись на двух участках пути: неблагоприятном (А) и благоприятном (В). Неблагоприятный также характеризуется разным состоянием грунтов (АI - ослабленное, АII – укрепленное ослабленное). Одновременно ФИЦКИА УрО РАН выполнены структурные исследования методом малоглубинной сейсморазведки на преломленных (МПВ) и отраженных волнах (ОГТ), 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. В 2019 г. были проведены длительные непрерывные наблюдения на участке АI. Был смонтирован автономный пункт наблюдений с записью данных на флеш-носитель в регистраторе.

Для измерения вибрации от подвижного состава использовалось широкополосное 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 безопасности, 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.

В разделе 3.2 приводится сравнение технических характеристик сейсмической аппаратуры разного типа. Для проведения эксперимента принципиальным было измерение низкочастотных колебаний в полосе 0.01–0.1Гц. Для этих частот в соответствии с АЧХ велосиметры имеют преимущества перед акселерометрами. Помимо регистрации низкочастотных сигналов, существенна также запись более

высоких частот, до примерно 20 Гц, т. е. датчики должны быть широкополосными. Анализировались экспериментальные данные, полученные велосиметрами двух типов – Trillium Compact 120 s с регистратором Centaur (Nanometrics) (ТС-120s) и CMG-6TD (Güralp Systems Limited), и короткопериодный датчик CMG-40T (Güralp Systems Limited,) с регистратором GSR-24 (GeoSig). Для мониторинга важна хорошая повторяемость записей и, соответственно, значений амплитуд A , т.к. именно на мониторинге амплитуд разных частотных составляющих строится разрабатываемая технология. Существенным являются два фактора: повторяемость АЧХ для разных экземпляров датчиков и влияние условий установки при замене датчика. Для волновых форм после фильтрации 0.01–0.1 Гц определялась величина A и строились диаграммы разброса амплитуд, измеренных попарно для стоящих рядом датчиков разных типов. Анализ экспериментальных данных показал, что датчики ТС-120s мало чувствителен к условиям установки, стандартное отклонение измеряемой величины A для двух разных датчиков составляет 0,09 мкм/с, т. е. примерно 1%. Для датчиков CMG-6TD разброс измеряемой амплитуды большой, 0,4 мкм/с, т. е. примерно 5% от A , что может осложнять их использование для мониторинга. В результате датчик ТС-120s был принят как основной для проведения сейсмического мониторинга.

В настоящее время рассматривается возможность использования отечественных датчиков фирмы «Р-Сенсорс», которые подобны по параметрам, но существенно более дешевые.

В разделе 3.3 представлена характеристика полученного экспериментального материала и обсуждаются задачи, основные: 1) определение чувствительности сейсмической аппаратуры к малым изменениям среды, в нашем случае - связанных с климатическими факторами. Это гарантирует успех мониторинга, т.к. очевидно, что параметры опасных процессов превосходят сезонные изменения, последние могут рассматриваться как шум или погрешность оценки; 2) выявление признаков перехода грунтов в другое, возможно, неблагоприятное состояние; 3) определение информативных параметров мониторинга, по которым можно судить о начале процесса изменений; 4) автоматизация определения параметров для возможности мониторинга из удаленной точки; 5) получение статистически значимых оценок параметров мониторинга и не критичных к типу поезда и его скорости.

Работа строилась на экспериментальных наблюдениях двух типов: 1) одновременно на тестируемом и опорном участках; 2) при длительной регистрации (более 50 дней) с записью сигнала от 1590 поездов. Первый цикл наблюдений 2017 г. – оценка возможностей технологии путем сравнения записей на неблагоприятном и благоприятном участках пути, работы при сухой погоде («сухой» период). Второй цикл в 2019 г. – регистрация сезонных изменений на неблагоприятном участке в период сезонного оттаивания с дождями («мокрый» период).

Выявление зависимости параметров записей колебаний от свойств грунтов выполнялось путем подбора упругих параметров среды в аналитических решениях задач воздействия на среду движущегося поезда (см. главу 2).

Учитывая, что поезда разные, т.е. повторяемость тестирующего среду сигнала плохая, но поездов много, проводилась статистическая обработка параметров записей – строились гистограммы, отбраковывались значения вне полосы стандартных отклонений от медианы. Неравномерность данных по времени устранялась путем

расчета среднесуточного значения, а при мониторинге проводилось сглаживание временного хода параметров скользящим средним по 7 точкам (недельный ход).

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.

В разделе 3.4 Рассмотрена процедура анализа волновых форм и описан алгоритм предобработки сейсмических записей движения поездов. 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. Начальный этап - отсеивание помех и выделение собственно записей поездов. Для этого применялся алгоритм STA/LTA для автоматического выделения событий (Allen, 1978). Затем проводилась фильтрация для исходной записи (рисунок 3а) в трех частотных диапазонах: среднечастотная (СЧ) 0.1-2 Гц; низкочастотная (НЧ) ниже 0.1 Гц; высокочастотная (ВЧ) 2-8 Гц. Каждый из частотных диапазонов характеризует процессы деформирования разных частей земляного полотна: СЧ – верхняя часть земляного полотна (насыпь), НЧ – более глубокий слой с возможной повышенной вязкостью (грунты основания), ВЧ – самая верхняя часть земляного полотна, взаимодействующая непосредственно с рельсами. Перед нами стояли две задачи - выявить изменения в грунтах - уже произошедшие и сезонные вариации. Исследования показали, что для первой задачи информативным является анализ ВЧ и НЧ, для меньших изменений состояния грунта из-за сезонных и климатических вариаций необходимо анализировать СЧ и НЧ.

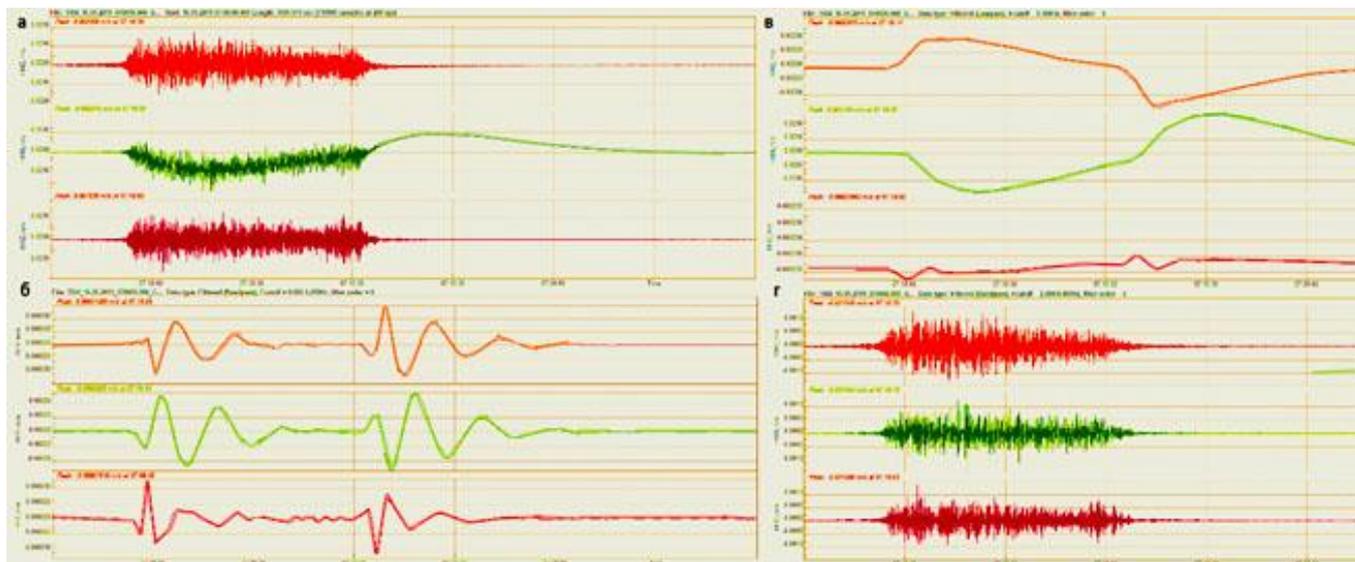


Рисунок 3 – Характерный вид волновых форм, зарегистрированных широкополосным сейсмометром TC-120s при движении поезда мимо датчика: а) – запись поезда в широкой полосе; б) – СЧ фильтр 0.1–2 Гц; в) – НЧ фильтр ниже 0.1 Гц; г) – ВЧ фильтр 2–8 Гц; каналы выровнены по амплитуде

При обработке волновых форм после фильтрации записей выполнялось определение набора параметров, характеризующих колебание и пригодных для автоматизированной

обработки (амплитуды фаз, мощность, временные задержки и пр.). При тотальной обработке создавались алгоритмы с выполнением автоматизированной обработки для выбранных параметров; проведение статистического анализа параметров для получения информативных оценок состояния грунтов; построение в зависимости от времени вариаций параметров, выявление изменений во времени; сравнение полученных изменений с экзогенными факторами (температура, осадки и пр.) для оценки чувствительности параметров для мониторинга.

Просмотр массива записей поездов показал следующее:

- ВЧ вибрации при прохождении грузового состава на компонентах Z и X по амплитуде превосходят низкочастотные больше, чем на два порядка, для Y – сопоставимы по амплитуде;

- СЧ колебания Z-компоненты характеризуются своеобразной волновой формой с двумя интенсивными всплесками в виде периода синусоиды в начале и в конце записи, причем эти синусоиды в противофазе; первая по времени синусоида практически совпадает с началом колебаний на ВЧ записи, а хвостовая вступает позже спада высокочастотных колебаний, т.е. эти колебания происходят после прохода состава мимо датчика;

- длительность НЧ колебаний существенно больше, чем ВЧ, т. е. это колебания уже после прохождения поезда (хвост записи). Волновые формы НЧ колебаний во время прохождения поезда характеризуются разнообразием, связанным с особенностями движения (торможением, скоростью и пр.), формы хвостов – достаточно подобны;

- для всех типов поездов после их прохождения на НЧ-волновых формах всегда наблюдался максимум амплитуд колебаний на компоненте Y (A_Y) и минимум на X (A_X).

Выводы по главе 3. Материал данной главы относится к обоснованию защищаемого положения 3. Для аппаратного оснащения технологии обоснован выбор в качестве датчика широкополосного сейсмометра Trillium Compact 120s как наиболее стабильного и чувствительного к малым изменениям в среде. Анализ записей позволил выявить полосы частот и устойчивые волновые формы как основу технологии, приведены алгоритмы автоматизированной обработки данных.

Глава 4. Основы технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов. Представлены основные блоки технологии, основанной на анализе вертикальных и горизонтальных компонент ВЧ, СЧ и НЧ составляющих сейсмических записей поездов и обсуждается возможность комплексирования технологии с другими методами обследования.

В разделе 4.1 рассматривается ВЧ составляющая колебаний от движущихся поездов, определяются параметры состояния грунтов. Анализ спектров записей разных поездов выявил значения пиковых частот: 1.5–2.5 Гц, наиболее ярко выраженных для горизонтальной составляющей поперек пути (Y), пик 4–5 Гц - для Z составляющей, X – 8 Гц. Таким образом, полосу частот 2–8 Гц можно рассматривать как характерную для сигналов движущихся поездов, что согласуется с предыдущими исследованиями (Коншин, 2004).

На ВЧ записи прохождения поезда характерных волновых форм не выделяется, сигнал шумоподобный, поэтому далее рассматривалась интегральная характеристика сигнала – его мощность, для автоматизации проводился статистический анализ значений A^2 , (A - амплитуда скорости смещений) в полосе 2–8 Гц для компонент X, Y, Z.

Учитывая, что мощность колебаний зависит от параметров поезда, мы искали типовые значения параметра. Для единичного стандартного грузового поезда были рассчитаны квадраты амплитуд записей после полосовой фильтрации 2–8 Гц и построены гистограммы (рисунок 4а). Для каждой из трех компонент было рассчитано медианное значение полученного массива квадратов амплитуд, соответствующее отмеченным максимумам. Эта величина удобна также для автоматизированной обработки и далее будет использоваться для характеристики мощности высокочастотной составляющей колебаний от поезда, регистрируемой на грунте.

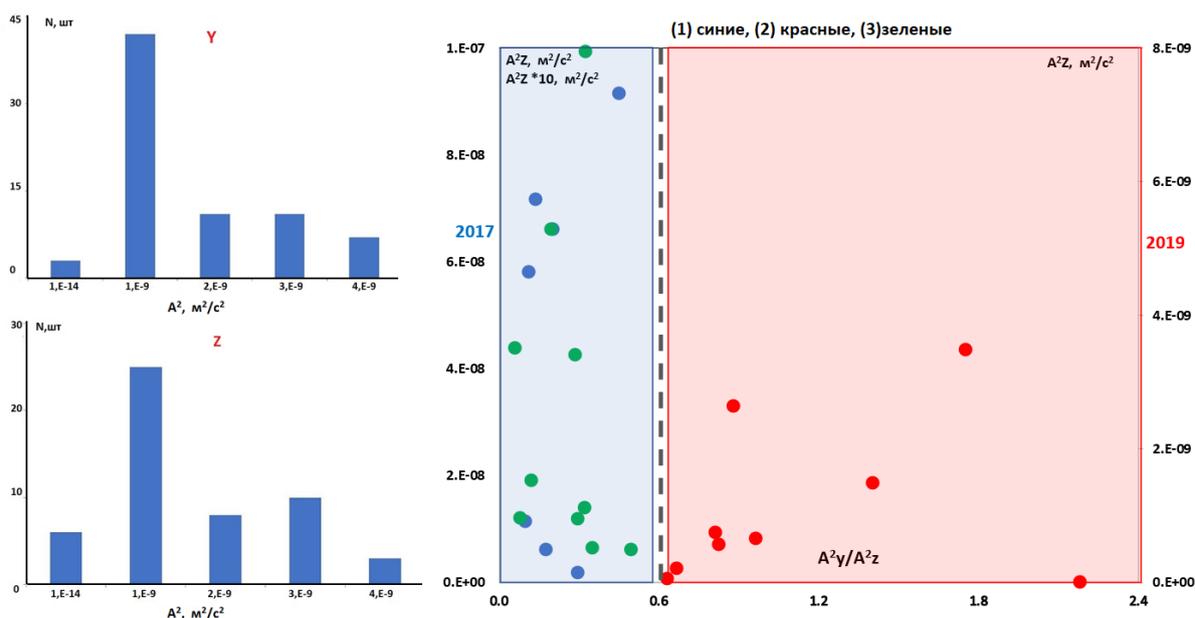


Рисунок 4 - Параметры волновых форм диапазона 2–8 Гц: а) типичные гистограммы значений амплитуд по осям Y, Z для 2019 г. б) диаграмма разброса значений относительных мощностей колебаний от поездов за 2017 г. (1) и 2019 г. (2), удары сейсмозазведки в 2017 г. (3)

Для исключения влияния параметров поезда были выполнены своеобразные «нормировки» полученных значений, учитывающие как вес поезда, так его длину и скорость, т. е. длительность записи. Для этого были рассчитаны отношения квадратов амплитуд во взаимно перпендикулярных направлениях A^2_X/A^2_Z (N_x), A^2_Y/A^2_Z (N_y). Статистический анализ выполнялся не только для записей поездов за 2017 г. и 2019 г., но и для ударов кувалды при проводившейся одновременно малоглубинной сейсмозазведке, для них рассчитывалась общая мощность серии ударов. Разное количество ударов в серии и удаленность ударов от точки наблюдения учитывались также путем построения отношений оценок на разных компонентах.

Период наблюдений 2017 г. был «сухой», а 2019 г. - «мокрый», что получить характерные медианы значений мощностей скоростей смещения в «мокрый» и «сухой» периоды для поездов и ударов в «сухой» период. Диаграмма разброса значений мощностей (рисунок 4б): относительных (A^2_Y/A^2_Z) и для оси Z (A^2_Z) за 2017 и 2019 гг. показывает, что для сухого периода N_y не превышает значений 0,6, а для мокрого, это отношение всегда больше 0,6.

Существенно, что два независимых вида записей: от поезда и от ударов, дали сходный результат. В «мокрый» период (аналог деградации вечномерзлых грунтов)

колебания по оси Y интенсивнее, чем в сухой, что соответствует большей деформируемости грунта, в основном насыпи поперек пути. Также можно заключить, что в «сухой» период основная энергия колебаний, вызванных движением поезда, сосредоточена в вертикальной плоскости.

В разделе 4.2 рассматривается отклик среды на более низкочастотные воздействия от поезда, определяемый 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). Анализ записей показал, что отклик среды (грунта земляного полотна) присутствует и наблюдаются не только по вертикали, но и в поперечном и продольном направлениях относительно насыпи. Из-за того, что амплитуда скоростей смещений при колебаниях пропорциональна добавочной деформации в среде (Shalev et al, 2016), такие низкочастотные нагрузки могут превышать деформации при высокочастотных колебаниях.

В разделе 4.2.1 обсуждается возможность использования волновой формы Z -компоненты в начале записи для определения параметров деформирования грунтов. Сравнение повторяемости волновых форм для набора записей прохождения грузовых составов (рисунок 5а). показывает их подобие, т.е. наличие интенсивных экстремумов в начале и в конце записи. Наилучшая повторяемость присуща первому максимуму, его амплитуда A_z была принята для дальнейшего анализа. Достаточно длительная регистрация в 2019 г. позволила выполнить описательную статистику и построить гистограмму значений амплитуд A_z первого максимума на компоненте Z (рисунок 5б). 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 . Таким образом, по экспериментальным данным величина A_z мало зависит от таких параметров, как тип вагонов и длина поезда. Скорость поезда регламентируется нормами (~ 70 км/час) и, по-видимому, ее вариации невелики для груженных составов. Повторяемость волновой формы и A_z , показывает, что этот параметр может быть использован для мониторинга состояния грунтов *in situ*, т. е. для наблюдений при стационарной установке датчика в выбранной точке.

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 (Ашпиз, 2013): $P = 25$ тонн силы на тележку или отдельную ось, $V = 20$ м/с (72 км/час). Для расчётов мы пользуемся формулами для одной сосредоточенной силы, т.к. вычисления реакции от разных видов распределений по площади, но таких же по величине, дали результаты с разницей не более 3%, что меньше неопределённости других параметров задачи.

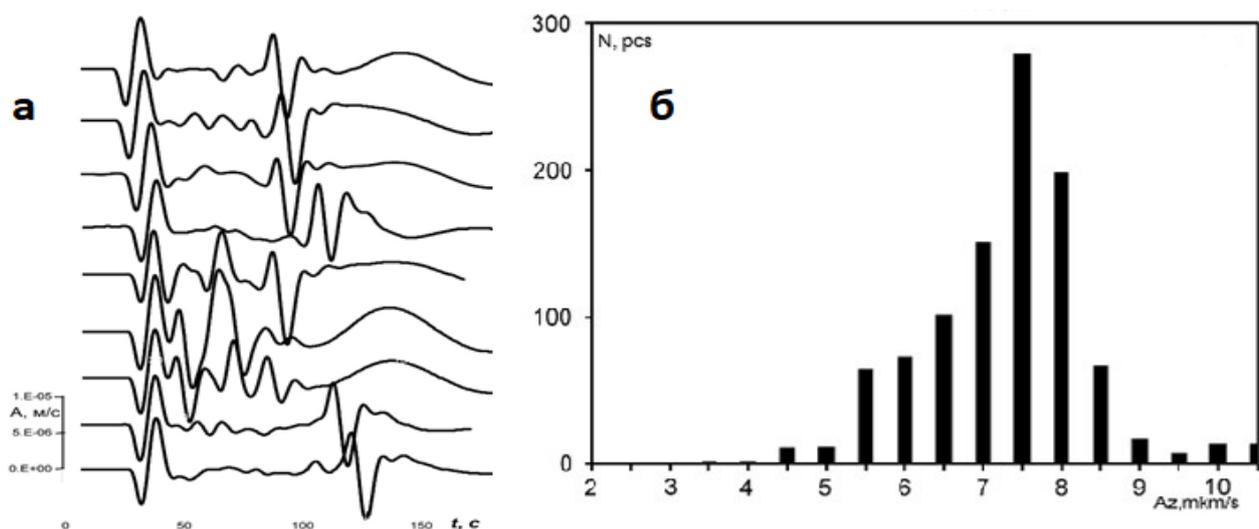


Рисунок 5 – Параметры Z-компоненты записи велосиметра прохождения грузовых составов в полосе 0,05–0,5 Гц, 2019 г.: а) - волновые формы, записи совмещены по первым вступлениям; б) - распределение амплитуд первого максимума

На рисунке 6 приведены волновые формы скорости смещения, полученные в результате расчетов для единичной колесной пары и грузового поезда, состоящего из локомотива и 20 одинаковых вагонов. Интерференция колебаний от вагонов не учитывалась, что объясняет наличие «пилы» в средней части записи. Расчётные величины амплитуд A_z хорошо согласуются с экспериментальными значениями, что, совместно со схожим видом волновых форм (рисунки 5а и б), показывает правильность выбранного теоретического подхода для данной полосы частот при рассмотрении Z-компоненты.

Из соотношения (2) 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 ТС-120s, т.е. для выявления «тонких» эффектов надо либо учитывать скорость поезда, либо работать со статистическими оценками параметра по ансамблю поездов. В расчетах значение μ определялось из условия согласия экспериментальных и теоретических значений, было получено $\mu = 10^9$ Па. При оттаивании мерзлых грунтов от -10°C до -1°C величина μ уменьшается на порядок (Цытович, 1973), т.е. в соответствии с полученными расчетами амплитуда колебаний увеличится на порядок. Исходя из оценки погрешности при измерении амплитуды в 1% для «хорошего» датчика можно будет выявить изменения несущей способности вечномёрзлого грунта при его оттаивании на 1°C , что превосходит чувствительность известных нам способов внелабораторным измерений, т.е. *in situ*. Для вертикальной компоненты экспериментальные и расчетные волновые формы подобны, а значения амплитуд соответствуют наблюдениям в «сухом» 2017 г. $A_z \sim 10\text{--}70$ $\mu\text{m/s}$. В «мокром» 2019 г. $\langle A_z \rangle = 7.5$ $\mu\text{m/s}$, что согласно (2) указывает на большее значение μ . Это реально, учитывая разницу прогретого и замерзшего грунта.

Расчеты для горизонтальных компонент дают частоту колебаний для Y (1 Гц) и для X (~ 2 Гц), т.е. выше, чем для Z (0,25 Гц), что не соответствует эксперименту. Таким образом модель Буссинеска хорошо описывает наблюдаемые экспериментальные особенности волновых форм Z-компонент для СЧ диапазона, но мало пригодна для горизонтальных компонент.

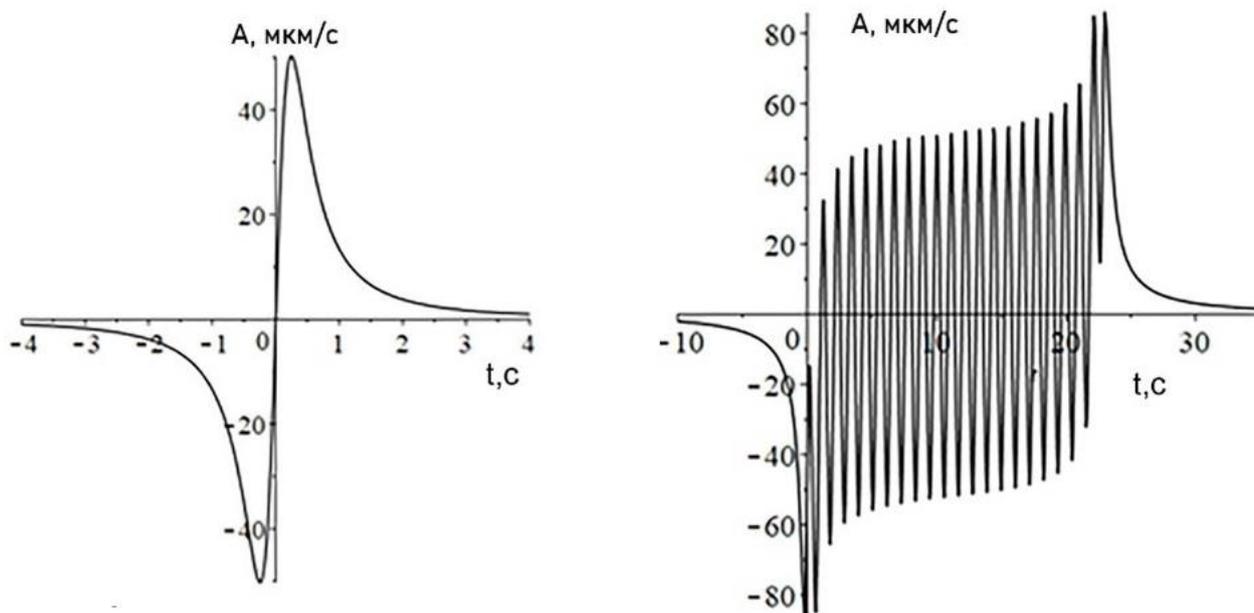


Рисунок 6 – Расчетные кривые изменения во времени скоростей смещения при движении: слева – для единичной колесной пары, справа – поезда с локомотивом

В разделе 4.2.2 рассматриваются горизонтальные компоненты записей в НЧ диапазоне. 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) (рисунки 3в и 7). При этом A_Y на один-два порядка больше, чем A_X .

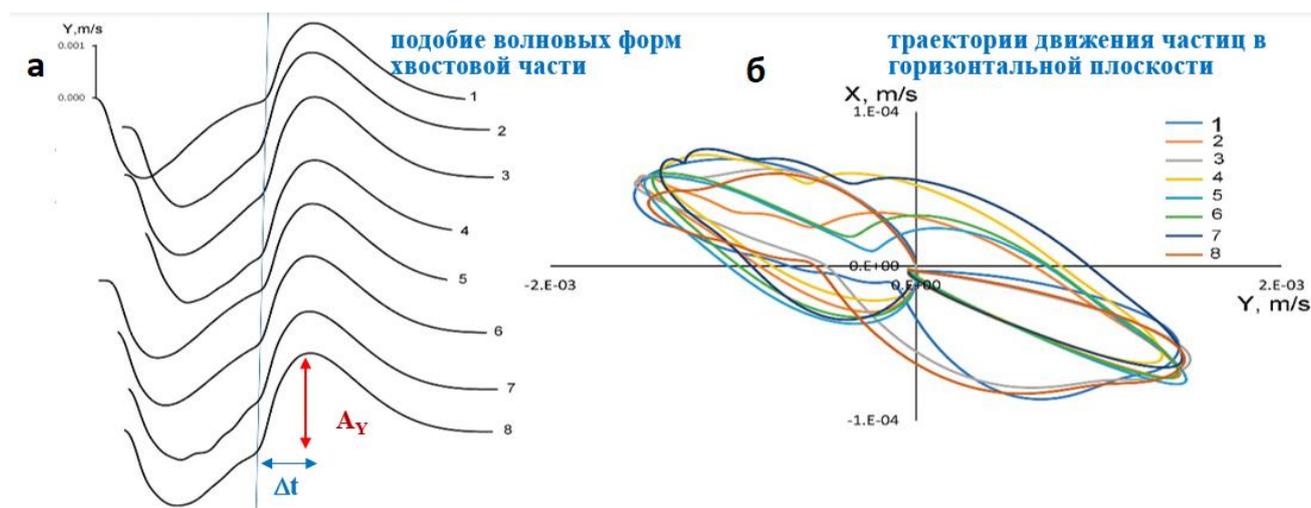


Рисунок 7 – Параметры НЧ колебаний при прохождении поезда: а – волновые формы хвостовой части совмещенные по концу прохождения, Y -компонента, б - траектории движения в горизонтальной плоскости

Часть записи после прохождения поезда («хвост») достаточно проста по форме и подобна для разных ж/д составов (рисунок 7). По существу, это есть процесс возвращения среды в исходное состояние после снятия воздействия. Для анализа были

приняты следующие параметры, описывающие хвостовую часть: максимальная (A_Y) и минимальная (A_X) амплитуды после прохождения поезда, Δt – время от пересечения нулевой линии до максимума A_Y . Просмотр волновых форм показал, что параметр A_Y , по-видимому, связан с характеристиками состава (длиной, нагрузкой на ось). Гистограммы значений амплитуд A_Y , демонстрирует три максимума: 0.00005, 0.0004 и 0.0014 м/с, последний – наиболее интенсивный, для параметра Δt основная часть данных лежит в интервале 20–27 с (рисунок 8).

Зависимость амплитуд от веса поезда выявляет диаграмма разброса значений A_Y и A_X для всего набора данных и для трех подборок, включающих значения для максимумов и точек в пределах стандартных отклонений (рисунок 8). Соотношения амплитуд для точек первого (легкие поезда) и третьего (тяжелые поезда) максимума подобны, т.е. вес поезда, как и ожидалось, определяет амплитуду колебаний. Для исключения влияния веса поезда была выполнена своеобразная «нормировка» полученных значений.

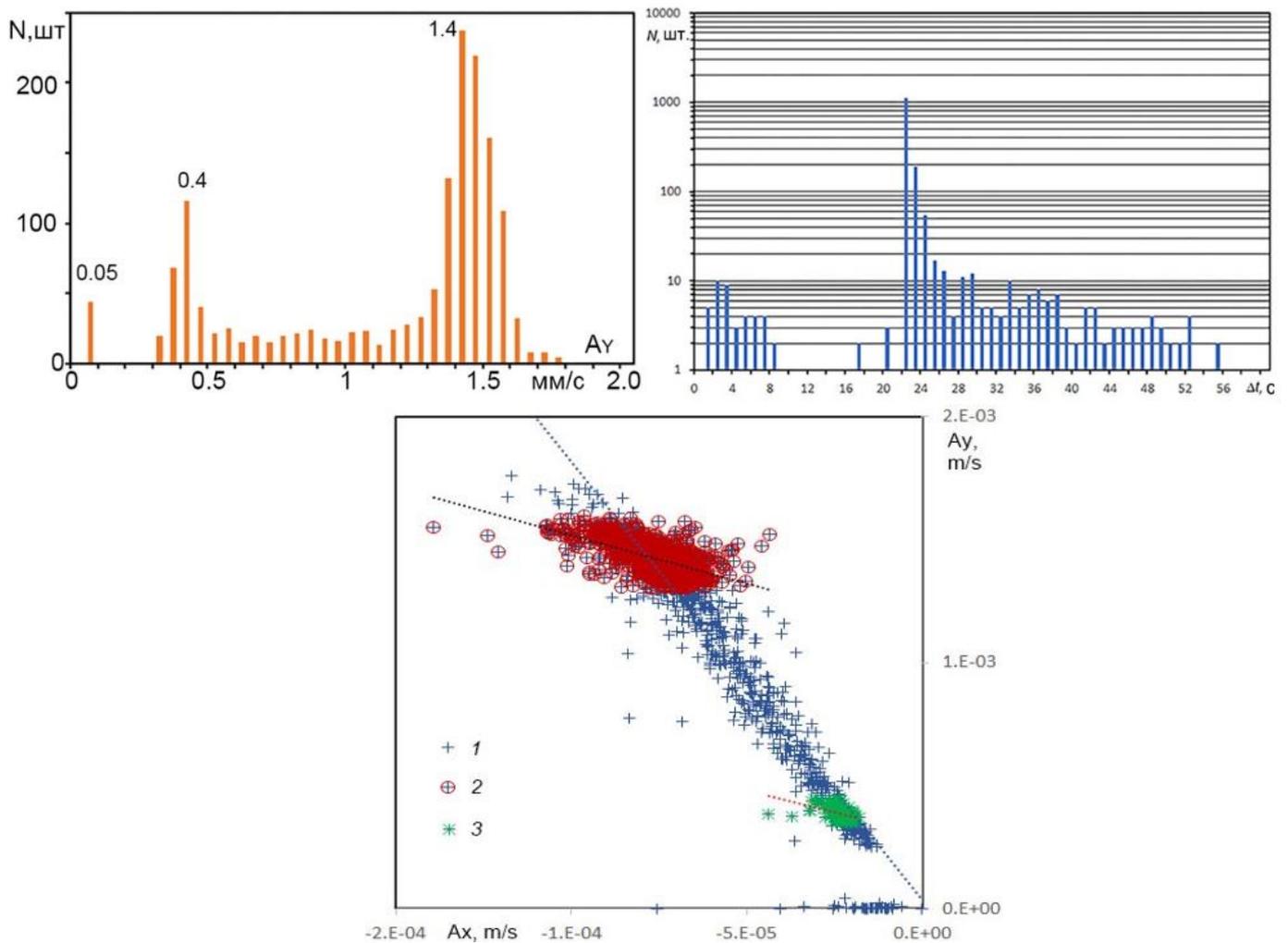


Рисунок 8 – Гистограммы значений амплитуд поперечной компоненты A_Y (а), параметра Δt (б);

в -диаграмма разброса амплитуд горизонтальных компонент с линией тренда для каждого набора данных: 1 – весь набор данных; для максимумов: 2 - $A_Y=0.4 \cdot 10^{-3}$ м/с, 3 - $A_Y=1.4 \cdot 10^{-3}$ м/с

Была принята оценка R , исходя из отношений амплитуд на горизонтальных компонентах: $R = |A_Y/A_X|$. Решение задачи Эльзассера для такого случая зависит от параметра a и промежутка времени T , в течение которого прикладывается возмущение, формула (6). При задании величины a были использованы значения: $H=2.5$ м, $h=4.5$ м в соответствии со схемой наблюдения и результатами малоуглубинной сейсморазведки.

Модуль сдвига связан со скоростью поперечных волн соотношением: $\mu = V_s^2 \cdot \rho$, $\mu=44.8$ МПа. Для расчета коэффициента Пуассона воспользовались известной формулой: $V_P = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}$, из которой получили $\nu=0.4$. Длительность воздействий от поезда в среднем $T=80$ с. Результаты расчетов относительных амплитуд возмущений показывают набор профилей амплитуд, регистрируемых на разных расстояниях от пути в зависимости от времени после прохождения поезда, т.е. после 80с (рисунок 9а). Видно, как максимум воздействия проявляется чем дальше от пути, тем позже, при этом амплитуды возмущений уменьшаются. На расстоянии 5 м в нашем эксперименте практически попадаем на максимум воздействия при $\Delta t \sim 20$ с. Зависимость значений амплитуд и положение максимума кривых от модуля сдвига верхнего слоя и вязкости нижнего (рисунок 9б), показывает, что 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.

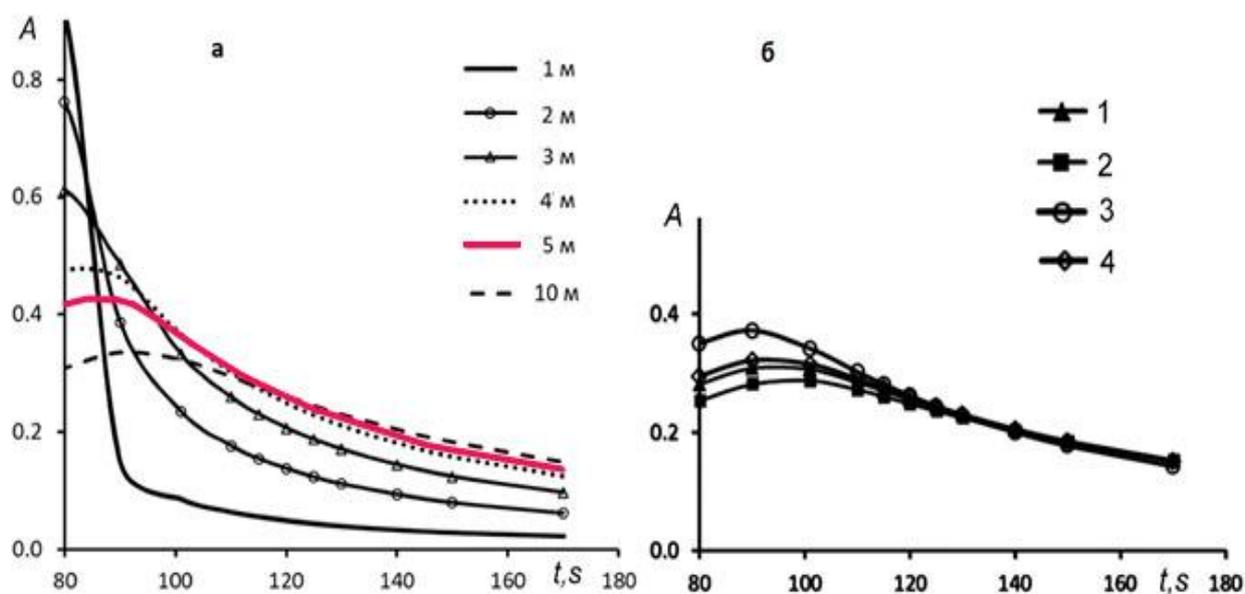


Рисунок 9 – Набор профилей амплитуд в зависимости от времени после прохождения поезда (после 80 с), регистрируемых: а) - на разных расстояниях от пути; б) – в зависимости от упруго-вязких параметров: 1- $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ Па*с, 2 - $\mu = 1.8 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ Па*с, 3 - $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 1.5 \cdot 10^9$ Па*с, 4 - $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 1.8 \cdot 10^9$ Па*с

В разделе 4.3 представлено тестирование технологии на сезонных изменениях. Для выявления уже произошедших изменений проводились наблюдения на неблагоприятном (АI), укрепленном (АII) и устойчивом участках (В). Траекториям движения точки насыпи при прохождении поездов в полосе частот ниже 0,5 Гц в горизонтальной плоскости (рисунок 10) позволяют выявить признак проблемного состояния грунта, а именно двуполярная траектория, наличие положительных и отрицательных фаз колебаний в направлении вдоль и поперек пути. При укреплении грунта нет подвижек вдоль пути после прохождения поезда. Для устойчивых грунтов регистрируется практически однополярный сигнал, т.е. нет перемещений после поезда.

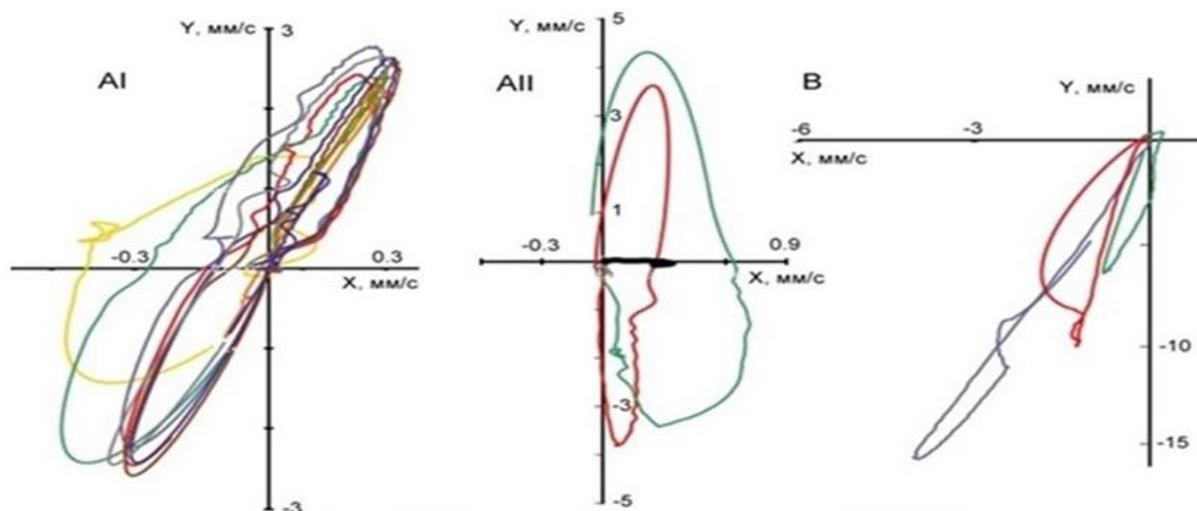


Рисунок 10 – Кривые траекторий движения точки насыпи в горизонтальной плоскости при прохождении поездов (линии разного цвета), частоты ниже 0.5 Гц, грунты разных типов: неблагоприятный (АI), укрепленный (АII) и устойчивый (В).

Возможность технологии для выявления сезонных изменений записей при длительной регистрации в одной точке. По результатам автоматизированной обработки записей с определением параметров R , Δt (интервал $20 \text{ с} < \Delta t < 27 \text{ с}$), N_Y и A_z , т.е. всех 4-х параметров, для трех фильтраций (НЧ, ВЧ, СЧ) был построен временной ход оценок в сравнении с кривой среднесуточной температуры с апреля по июнь 2019 г. с ежедневным осреднением и недельным сглаживанием (рисунок 11). Видно, что все найденные нами параметры чувствительны к изменениям температуры. Однако, т.к. оттаивание и прогревания слоев происходят в земляном полотне неодновременно по глубине и, согласно моделям, каждый параметр записи характеризует поведение разных частей разреза, интерпретировать временной ход всего набора данных пока затруднительно.

Начнем с более простых зависимостей для верха разреза. Сравним временной ход температуры воздуха (зеленая кривая) и флуктуаций от начального значения (в %) значений параметра $\delta A_z/A_z$ (фиолетовая линия). Сопоставление кривых 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.

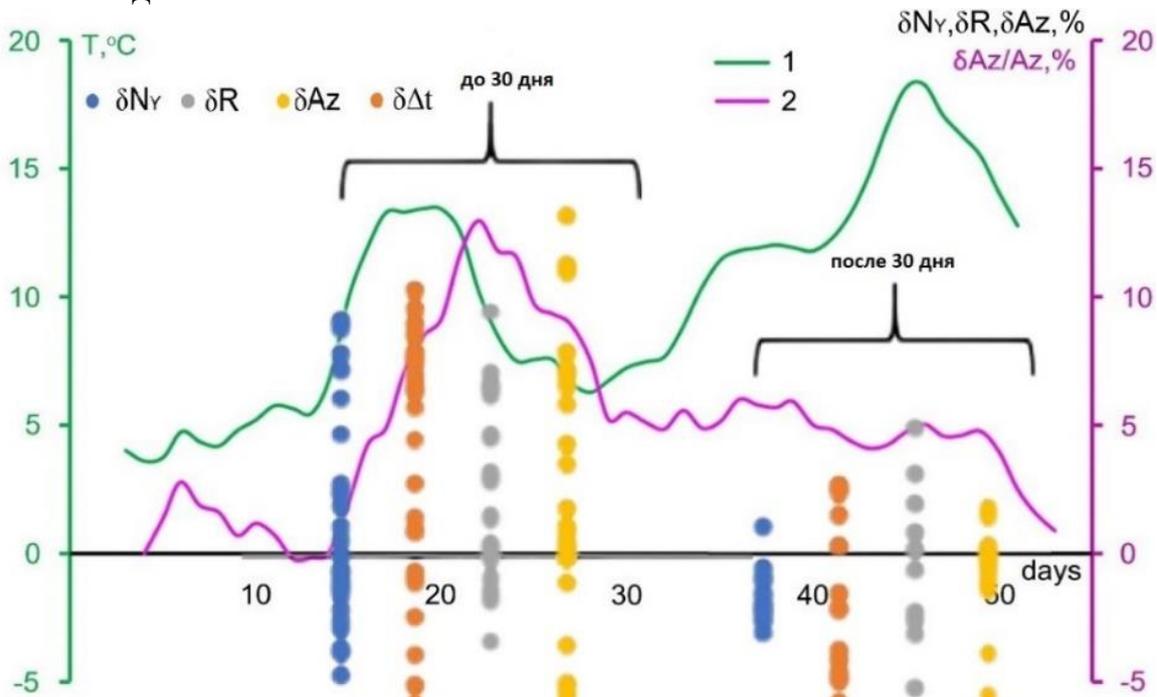


Рисунок 11 - Изменение во времени температуры воздуха (1) и флуктуаций параметров записи:

$\delta A_z/A_z$ (2), точки – суммарные вариации δA_z , δR , $\delta \Delta t$, δN_y (в % от среднего значения) за интервалы до и после 30 дней

В соответствии с ходом температуры и кривой $\delta A_z/A_z$ будем считать, что после 30-го дня наблюдений оттаивание верха разреза закончилось. Параметры R и Δt зависят не только от модуля сдвига, но и от вязкости в подстилающей среде и меняются разнонаправленно при оттаивании. Поэтому массив параметров всех флуктуаций от среднего значения (в %) δN_y , δR , δA_z , $\delta \Delta t$ был разделен на два интервала до и после 30-го дня (рисунок 11). Сравнение этих групп показывает, что разброс во время активного оттаивания и влагонасыщения значительно больше, чем после. Таким образом, все эти параметры пригодны для мониторинга состояния грунта.

В соответствии с моделью Эльзассера, рассмотренной выше, анализ параметров R и Δt вследствие сезонных явлений позволяет выявить примерно 10% вариации 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.

Таким образом, полученные нами оценки чувствительности методики являются основой возможности определения начала опасных процессов на ранней стадии.

В разделе 4.4 представлен алгоритм автоматизации определения параметров. На основании аналитических моделей среды и сопоставления с экспериментальными

данными информативными были признаны следующие параметры записи при СЧ и НЧ-фильтрации:

- 1) амплитуда первого максимума синусоидальной волновой формы вертикальной компоненты,
- 2) отношение амплитуд первых экстремумов в хвостовой части (после прохождения поезда) горизонтальных компонент (R),
- 3) время достижения экстремума на Y компоненте (Δt).
- 4) отношения медианных значений мощностей колебаний на горизонтальных компонентах (X либо Y) к таковой на вертикальной (Z) N_X либо N_Y , ВЧ-фильтрация 2–8 Гц.

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 3. Обработка данных включает два этапа: предварительная обработка и, собственно, мониторинг.

В разделе 4.5 рассматривается блок-схема технологии непрерывного сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов. Вдоль полотна устанавливаются пункты сейсмических наблюдений, оснащенные системами электропитания, локального сбора, хранения и передачи данных. Шаг расстановки зависит от сложности инженерно-геологических условий района, предполагается сгущение пунктов в более сложных районах (карст, заболоченность, тектонический разлом и пр.), вплоть до установки сейсмических мини групп. Использование аналоговых датчиков при расположенном рядом с блоком цифровой регистрации и передачи данных позволяет при необходимости достаточно просто заменять датчик при его поломке или усложнении решаемой задачи. Эта часть схемы опробована. Предполагается, что при прохождении состава, оснащенного системой мобильного сбора данных, происходит опрос локальных пунктов во всех точках с использованием, например радиоканала. Далее, при вхождении в зону сотовой связи, данные передаются на сервер в центр сбора данных, где происходит их архивация и автоматическая обработка с целью выявления развития опасных процессов, определение уровня опасности участка. Кроме того, существует возможность в блоке регистрации заложить алгоритм выделения сигналов, характеризующих опасные процессы с соответствующим реагированием.

Использование датчиков сейсмологического типа позволяет выявлять не только изменение свойств грунтов, но и изменение параметров эндогенного излучения среды с большей глубины (микротресков, слабой сейсмичности и пр.), вплоть до далеких землетрясений. Как показывают исследования (Вознесенский, 1998) 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. В работе приведен пример записи одновременно поезда и далекого землетрясения.

В разделе 4.6 рассматривается вопрос комплексирования разрабатываемой технологии с другими методами обследования. Аппаратурно-методическая разработка для непрерывного сейсмического мониторинга может быть частью комплексных

геофизических исследований и дополнять любой из существующих методов диагностики, описанных в разделе 1.3.

Земляное полотно относится к нижнему строению железнодорожного пути, к которому также отнесены некоторые искусственные сооружения: путепроводы, трубопроводы, мосты, тоннели, эстакады, виадуки, подпорные стены для поддержания крутых откосов земляного полотна. Их устойчивость снижается под действием динамической нагрузки и в связи с изменяющимся климатическими и грунтовыми условиями.

На основании разработанной в ИФЗ РАН под руководством проф. Е. И. Попова технологии изготовления малогабаритных кварцевых наклономеров автором работы с коллегами Осика В.И., Кочетков Б.М., Павлов Е.И был создан 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. За разработку данного устройства автором в составе научного коллектива был получен патент на полезную модель.

Выводы по главе 4. Материал изложенный в данной главе подтверждает 2 и 3 защищаемые положения. Рассмотрена возможность и основные элементы технологии 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы, полученные в работе, 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 их 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 N_X , N_Y , (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.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **И.П. Орлова**, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина 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
2. Г.Н. Антоновская, И.П. Добровольский, Н.К. Капустян, **И.П. Орлова** 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
3. В.И. Осика, Б.М. Кочетков, Е.И. Павлов, **И.П. Качан (Орлова)** Мониторинг деформационного состояния ответственных и технически сложных объектов. // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 46–52. DOI: 10.18358/np-27-1-i4652

Публикации, не входящие в список ВАК:

4. N. K. Kapustian, G. N. Antonovskaya, **I.P. Orlova** Soil State Testing Using. Heavy Vehicle Vibrations // Energies 2022, 15(3), 830; <https://doi.org/10.3390/en15030830>
5. В.И. Осика, Б.М. Кочетков, Е.И. Павлов, **И.П. Качан (Орлова)**, В.А. Пчелинцев 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

Публикации в сборниках и материалах конференций:

6. **I.P. Orlova**, N.K. Kapustian and G.N. Antonovskaya Prospects for Passive Seismic Methods for Monitoring the Railway Base in Areas with Difficult Soil Conditions. // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p.1 – 8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152071>
7. **И.П. Орлова**, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина И.М. Возможности мониторинга основания железнодорожного пути пассивными сейсмическими методами. // В книге: Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020 сборник тезисов научно-практической конференции. Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН. Москва, 2020. С. 157–161.
8. **И.П. Орлова**, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская 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.
9. **И.П. Орлова**, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина Опыт сейсмического исследования гетерогенной среды земляного полотна железнодорожного пути. В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. // Сборник трудов 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. 2019. С. 329–335.

Подписано в печать _10. 03. 2022 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ №__
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88