

На правах рукописи



Орлова Ирина Петровна

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
КРАЙНЕГО СЕВЕРА И СИБИРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

Москва 2021

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-математической наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Российской академии наук, главный научный
сотрудник лаборатории методов прогноза
землетрясений

**Официальные
оппоненты:**

**Ведущая
организация:**

Защита диссертации состоится **2022 г. в** 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.

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 « » 202 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

В. А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железные дороги России являются основными транспортными сооружениями, их протяженность находится на третьем месте в мире (после США и Китая, 85,5 тыс. км), они расположены в регионах, различающихся по климату и геологическому строению. Антропогенная деятельность и, прежде всего, техногенные нагрузки на железнодорожный путь, а также климатические изменения влияют на состояние земляного полотна, что требует обследования для обеспечения безопасности. Наибольшие проблемы возникают на участках земляного полотна в районах распространения карста, вечной мерзлоты, в местах, подверженных оползням, селям, сходам снежных лавин. В последние десятилетия значительно растут объемы грузопотоков и скорости поездов, т. е. увеличиваются статические и динамические нагрузки на путь, что грозит потерей несущей способности насыпи на слабых основаниях. Как следствие, повышаются затраты на текущее содержание пути.

Современные методы диагностики земляного полотна основаны на применении в 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 вопрос о выявлении опасных процессов в грунтах оснований на ранней стадии их развития. На основе моделирования дается прогноз устойчивости насыпи, но натурной диагностики не разработано, что определяется недостаточной разрешающей способностью методик. Общей особенностью методов является то, что 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.

Как известно, для исследования сейсмические наблюдения являются наиболее информативными среди геофизических методов (Ризниченко, 1969). В частности, сейморазведка позволяет получать детальные разрезы оснований ж/д пути с распределением скоростей упругих волн, что дает представление о вещественном составе и, в основном, опирается на интерпретацию кинематики волнового поля. Динамику волн, а именно амплитуды и спектры, используют крайне редко, хотя именно эти параметры волнового поля наиболее чувствительны к изменениям деформационных свойств среды (Николаев, 1981, Гамбурцев, 1992, Капустян, Юдахин, 2007 и др.). Таким образом, использование динамики волновых полей при просвечивании насыпи составляет основу увеличения разрешающей способности методов для выявления процессов на ранней стадии.

Резерв увеличения чувствительности технологии мониторинга можно искать в каждой из составных частей: в подборе зондирующего среду источника, аппаратуры и схемы наблюдений, в обработке данных. Для мониторинга важно обеспечить постоянные наблюдения, для которых 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 с возможностью регистрировать колебания до периодов 100 с. Такие приборы на транспорте ранее не применялись. Новый экспериментальный подход требует понимания, какие особенности изменения состояния грунтов отражаются на сейсмических записях от поезда, какие параметры записи информативны и как наиболее эффективно

обрабатывать сейсмограммы для возможности автоматизации процесса непрерывного мониторинга.

Таким образом, для 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 станет дополнением к существующим методам для выявления изменения, происходящим в земляном полотне и грунтах основания.

Целью диссертационной работы является разработка технологии сейсмического мониторинга состояния земляного полотна железнодорожных 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.

Научная новизна и практическая значимость. Учитывая, что применяемые сегодня геофизические методы обследования земляного полотна эффективны для верхних слоев разреза, а также, для ситуаций, когда изменения в свойствах грунтов насыпей велики и близки к аварийным, в диссертации получены следующие новые результаты и отмечена их практическая значимость.

1. Выявлены параметры, которые характеризуют состояние как верхних, так и более глубоких этажей разреза (до 10 м) и дают возможность выявить изменения состояния грунтов из-за сезонных и погодных вариаций.
2. Экспериментально показана и подтверждена моделированием возможность проведения сейсмического мониторинга состояния грунтов с выявлением изменений, свойственных ранней стадии опасных процессов.
3. Технология использует движущийся поезд в качестве источника зондирующего сигнала, т.е. работы ведутся без нарушения расписания движения транспорта, что существенно снижает расходы по сравнению с методами, требующему изменения или прекращения движения на период проведения диагностики.

4. Впервые исследовано поведение грунтов основания насыпей при низкочастотных нагрузках, создаваемых подвижным составом, в трех взаимно перпендикулярных направлениях (вертикальном и горизонтальных).
5. Выявлены информативные параметры динамических характеристик сейсмограмм (мощности, амплитуды) для трех частотных диапазонов сигнала (ВЧ 5-8 Гц, СЧ – 0.1-2 Гц, НЧ – ниже 0.1 Гц), что отражает разные виды нагрузок на грунт, по которым можно судить об изменениях на ранней стадии несущей способности верхней (насыпь) и нижней части разреза (естественное основание). Практически это позволит своевременно произвести необходимые работы по укреплению земляного полотна до развития опасных процессов.
6. Предложены алгоритмы для автоматизированной обработки сейсмограмм, которые основаны на статистических оценках массивов информативных параметров записей, что существенно снижает зависимость результата мониторинга от параметров поезда.
7. Показано, что аналитические решения задачи 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 широкого набора типов 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.

Положения, выносимые на защиту

1. Взаимодействия движущего состава и грунтов основания пути описываются двумя аналитическими моделями деформирования (M1 и M2), объясняющими процессы в верхнем строении пути (1-2 м, M1) и основании (до ~10 м, M2), и позволяющими получить количественные оценки параметров упругости и вязкости грунта в условиях естественного залегания.
2. Выявлены 4 основных параметра сейсмической записи движения поезда, свидетельствующие об изменениях в грунтах основания, не критичных к весу состава и его скорости. Для массива записей поездов это медианные значения: 1) в полосе частот 5-8 Гц – отношений мощности высокочастотных колебаний на горизонтальной компоненте поперек пути к вертикальной; 2) в полосе частот 0.1-2 Гц – амплитуды вертикальной компоненты первых вступлений колебаний от поезда; 3) для низкочастотной составляющей (периоды около 100 с) после прохождения поезда – отношения амплитуд на горизонтальных компонентах и 4) временного интервала между концом движения поезда и максимумом всплеска амплитуд на горизонтальной компоненте поперек пути. Информативную для мониторинга оценку дает среднее за неделю сглаживание массивов данных
3. Технология мониторинга земляного полотна основана на использовании регистрации движущегося поезда вблизи земляного полотна трехкомпонентными широкополосными сейсмическими датчиками (периоды не менее 100 с) и дает возможность выявлять начало развития

опасных процессов в грунтах оснований пути. Чувствительность методики определяется чувствительностью датчика (не менее 750 В с/м) и изменениями, связанными с сезонным оттаиванием, что существенно меньше величин, характеризующих переход грунтов в неблагоприятное состояние даже на ранней стадии.

Личный вклад. Составление ряда обзоров: опасных процессов, методов и аппаратуры их наблюдения. Выполнена разносторонняя обработка экспериментальных сейсмических данных, предложены оригинальные способы анализа данных. Для объяснения полученных экспериментальных результатов были привлечены конечно-элементные модели и аналитические решения при непосредственном участии автора.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: 8-й Всероссийская научная конференция с международным участием «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» Москва, 18-19 декабря 2019, 7-й Международный научно-практический симпозиум «Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси», Свято-Троицкая Сергиева Лавра, Сергиев Посад, 14-16 ноября 2018 г., Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН, Москва 28-29 октября 2020 г. Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Москва, 19-22 октября 2020 г. XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ Чтения, посвященные памяти Г.М. Шахунянца, 19 ноября 2020 Москва, РУТ (МИИТ), 17-й научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2021» 26-30 апреля 2021 г. Геленджик. Публикации: Общее количество работ 6, опубликованных по теме диссертации:

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация включает 124 страницы текста, 40 рисунков, 8 таблиц, список литературы - 110 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Капустян Наталии Константиновне за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах выполнения работы, за привлечение интереса к выбранной теме и значимые идеи. Автор благодарен сотрудникам лаборатории сейсмологии ФИЦ КИА УрО РАН, и в первую очередь руководителю д.т.н. Антоновской Галине Николаевне за важные дискуссии, советы и предоставленные материалы.

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

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 ж/д транспортных сооружений и основных методов их инструментального обследования. Рассматриваются существующие методы 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 протяжения деформированного земляного полотна. Приведен обзор представлений о процессах, приводящих к появлению деформаций криогенной природы (Цытович Н. А., Ашпиз Е. С., Дыдышко П. И. 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 в современных и перспективных условиях. Несмотря на разнообразие существующих методов диагностики, комплексного подхода к обследованию железнодорожного пути до сих пор не существует.

В разделе 1.4 обсуждаются нерешенные проблемы обследования ж/д пути и ставятся 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, включая деформации основной площадки, 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 прихода волн, т.е. скорости распространения), динамические характеристики подключаются в основном при анализе затухания волн. Опыт сейсмологического мониторинга (Николаев А.В., Гамбурцев А.Г., Капустян Н.К. 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, 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 изучалось 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 под высокочастотным и низкочастотным воздействиями движущегося поезда с использованием современного сейсмологического оборудования и на основе 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, создаваемых подвижными составами с применением широкополосной сейсмической аппаратуры, выполнение численного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) насыпи при малых изменениях свойств и различного состояния грунтов.

Выводы. 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 и осадок грунтов насыпей и их оснований. Обсуждаются существующие принципы математического моделирования и аналитических представлений процессов, описывающих изменения свойств грунтов при волновом 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 А. Я., Коншин Г.Г., Когана В.С., Лысюка В. А. Покацкого, Г. М. Шахунянца, Капустян Н. К., Антоновская Г. Н., Thompson D.J. R, Kouroussis G, Johnson K.L, Picoux B. и др. 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 (половина схемы) в статической постановке, что качественно соответствует длиннопериодным колебаниям. Численное моделирование выполнено в программе Plaxis 2D, предназначенной для статических расчетов НДС и устойчивости насыпи для плоской задачи. Для расчета НДС и смещений в каждой точке грунтового массива в качестве модели использована упругопластическая модель Кулона-Мора.

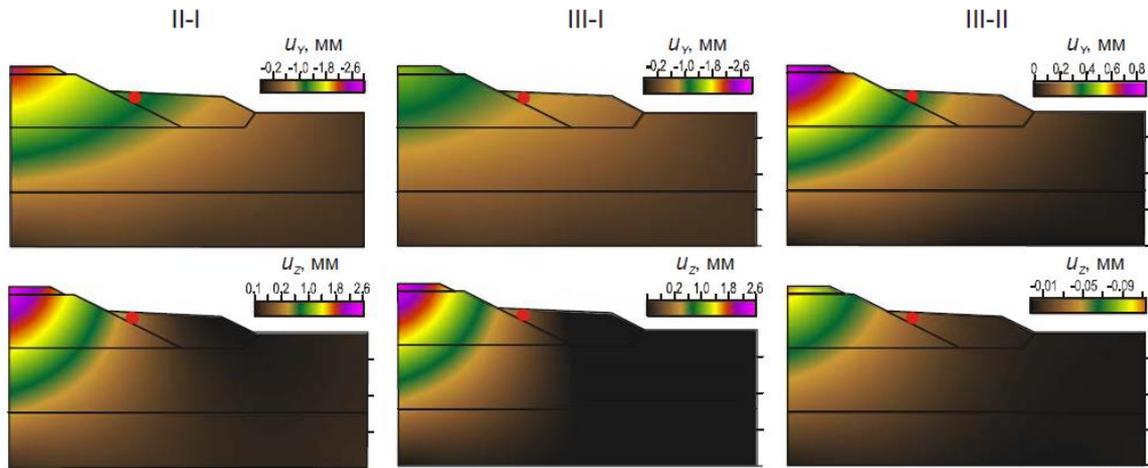


Рис.1 – Модели приращения изополей вертикальных и горизонтальных (Y) смещений, цифрами показано между какими моделями находилось приращение, ● кружок – место размещения датчика

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 мерзлоте состоянию или к влагонасыщенному (рис. 1). Максимальные изменения происходят непосредственно в подрельсовой области насыпи – 1–3 мм, что и следовало ожидать. В месте установки широкополосного датчика приращение смещений составляет 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 экспериментального 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 (M1). 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 и при нашем участии постановки задачи и сравнения с экспериментом (Антоновская и др., 2020).

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:

$$u = P(X, Y) \frac{x - X}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right)$$

$$v = P(X, Y) \frac{y - Y}{4\pi\mu} \left(\frac{z}{R^3} - \frac{1 - 2\nu}{R(R + z)} \right)$$

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

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

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 :

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

Аналогично получаем:

Виброскорость по X :

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

Виброскорость по Y :

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

Сравнение результаты 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 полупространства, описывающие распределение напряжения в среде, включающей насыпь и подстилающий грунт (М2), в зависимости от расстояния от полотна и времени после воздействия нагрузки, в нашем случае - поезда.

Вязкая среда может соответствовать зоне малых скоростей, типичной для верхов разреза. Напряжения распространяются вдоль контакта насыпь-грунт в горизонтальном направлении от ж/д пути по диффузионным законам [Elsasser, W.M. 1971.]. Схема приведена на рис 2.

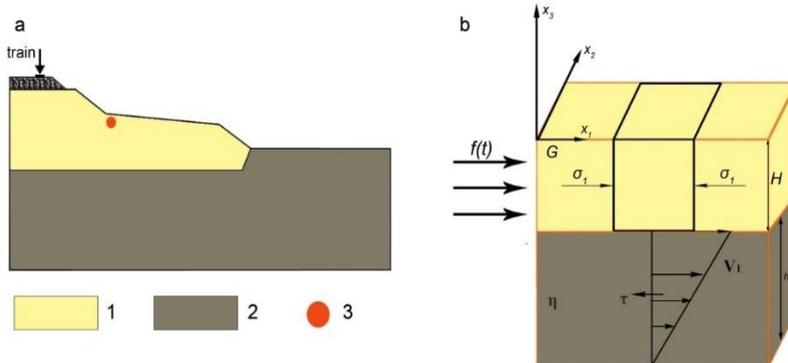


Рис. 2 - Модель передачи возмущений, создаваемых поездом в земляном полотне в горизонтальном направлении: а - схематический разрез, б - геометрия системы земляное полотно и возмущение его напряженно-деформированного состояния, 1 - земляное полотно, 2 - грунт (валунный суглинок), 3 - сейсмический датчик

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:

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

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

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], представленное в виде:

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

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 , в течение которого прикладывается возмущение. Расчеты для исследуемого участка представлены в Главе 4.

Выводы Анализ известных моделей взаимодействия поезда с земляным полотном показывает, что ранее предложено решение только для высокочастотного воздействия в системе «колесо-рельс», для низкочастотного - при моделировании рассматривается квазистатическая нагрузка от ж/д состава на грунт. Численное моделирование поведения грунтов под действием статической нагрузки позволило выявить зоны изменения состояния грунта. Однако, именно аналитическое решение задачи с движущейся нагрузкой позволяет выявить основные факторы отклика грунта, существенные для наблюдения изменений нем. Было предложены две модели: М1 - однородное деформируемое полупространство с поездом в виде движущейся силы, создающей смещения в заданной точке грунта – задача Буссинеска и М2 - 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 участке Северной железной дороги (СЖД) в Архангельской области. 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 районе Архангельской области в течение двух полевых сезонов 2017 и 2019 гг. Объектом исследований являлось земляное полотно в районе 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 (А1 - ослабленное, А2 – укрепленное ослабленное) Одновременно проводились традиционные структурные исследования методом малоглубинной сейморазведки 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. в конце апреля – середине июня были проведены длительные непрерывные наблюдения, на участке А1. Был смонтирован автономный пункт наблюдений с записью данных на флеш-носитель в регистраторе.

Для измерения вибрации, создаваемой подвижным составом, 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 0.01–0.1 Гц. 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. Анализируются экспериментальные данные, полученные широкополосными 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 методика. Существенным являются два фактора: повторяемость амплитудно-частотной характеристики 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 не 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 разделе 3.3 представлена характеристика полученного экспериментального материала и обсуждаются решаемые задачи, основные из них:

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

Работа строилась 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 2017 г. – оценка возможностей технологии путем сравнения

записей на двух участках пути: так называемом неблагоприятном и благоприятном, работы выполнялся в августе при сухой погоде («сухой» период). Второй цикл – регистрация сезонных изменений, выполнялся на неблагоприятном участке 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 параметров среды в аналитических решениях задач воздействия на среду движущегося поезда.

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. Начальным этапом обработки был отсев помех и выделение собственно записей поездов. Для этого применялся алгоритм STA/LTA для автоматического выделения событий (Allen, R.V., 1978). Затем проводилась фильтрация для исходной записи (рис. 3, а) в трех частотных диапазонах: б) среднечастотная (СЧ) 0.1-2 Гц; в) низкочастотная (НЧ) ниже 0.1 Гц; г) 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.

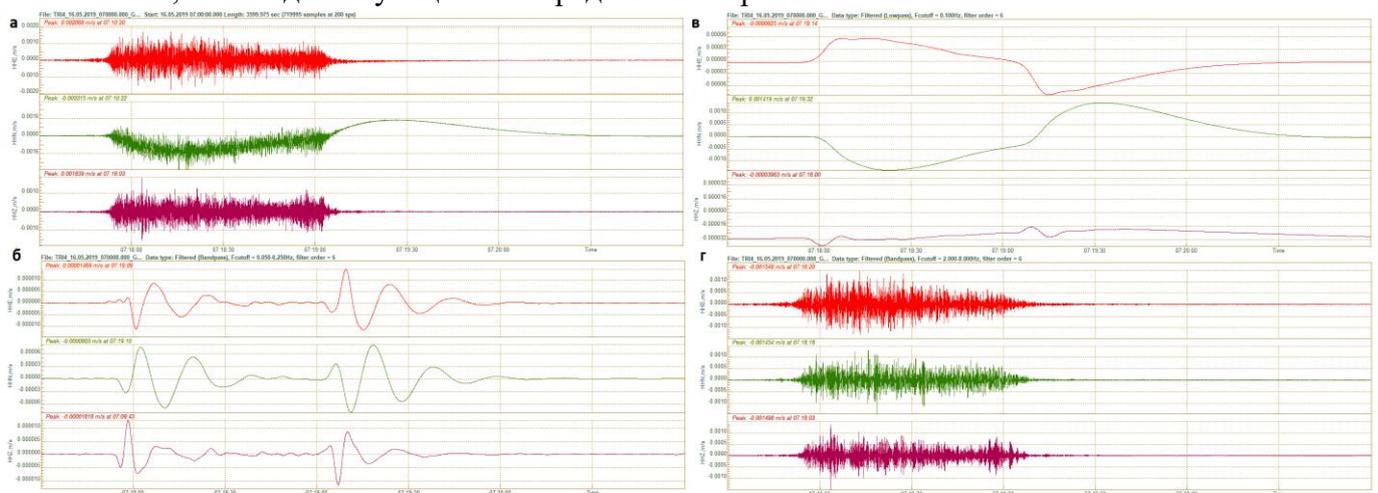


Рис. 3 – Характерный вид волновых форм, зарегистрированных широкополосным сейсмометром ТС-120s при движении поезда мимо датчика: а) – запись поезда; б) – СЧ фильтр 0.1–2 Гц; в) – НЧ фильтр ниже 0.1 Гц; г) – ВЧ фильтр 2–8 Гц

Перед нами стояло две задачи - выявить изменения как уже произошедшие в грунтах, так и сезонных изменений. Исследование показали, что для первой задачи информативным является анализ ВЧ и НЧ, для меньших вариаций состояния грунта, связанных с сезонными и климатическими изменениями необходимо анализировать СЧ и НЧ.

При обработке волновых форм применялись следующие процедуры: фильтрация записей в соответствующем диапазоне; определение набора параметров, характеризующих запись и пригодных для автоматизированной обработки (амплитуды фаз, мощность, временные задержки и пр.); создание алгоритмов и выполнение автоматизированной обработки для выбранных параметров; проведение статистического анализа параметров для получения информативных оценок, характеризующих состояние 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 Z и X компонентах по амплитуде превосходят низкочастотные больше, чем на два порядка, для Y компоненты – 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 начальная и хвостовая синусоиды – в противофазе;

- вступление первой по времени синусоиды Z–компоненты практически совпадает с вступлением интенсивных колебаний на ВЧ записи, а хвостовая синусоида вступает позже спада высокочастотных колебаний, т. е. эти колебания происходят после прохода состава мимо датчика;

- длительность НЧ колебаний существенно больше, чем ВЧ, т. е. колебания происходят 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 компоненте X (A_X). При этом A_Y на один-два порядка больше, чем A_X .

Выводы. Для технологии обоснован выбор в качестве измерительного оборудования широкополосного сейсмометра Trillium Compact 120s как наиболее стабильного и чувствительного к малым изменениям в среде. Объектом исследования выбран участок Северной железной дороги Архангельской области, где земляное полотно представляет собой сложную многофазовую среду, деформационные свойства которой изменчивы и зависят от погодных и сезонных условий. В качестве зондирующего грунты основания сигнала использовались колебания от движущегося поезда.

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

В разделе 4.1 анализируется высокочастотная составляющая сигнала движущихся поездов, определяются параметры, характеризующие состояние грунтов. Анализ спектров записей разных поездов выявил значения пиковых частот (рис. 4): 1.5–2.5 Гц, наиболее ярко выраженных для

горизонтальной составляющей поперек пути (Y), пик 4–5 Гц, характерный для вертикальной составляющей колебаний (Z), на компоненте 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.

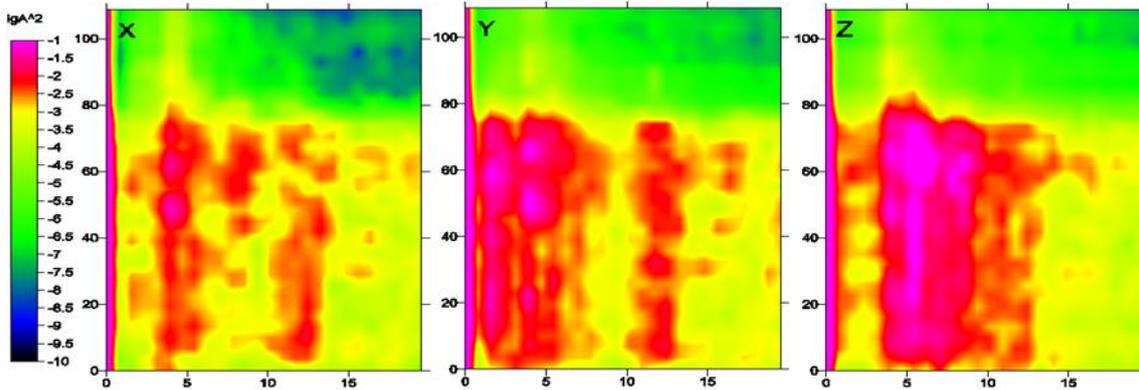


Рис. 4. Спектрально-временной анализ (СВАН) записей прохождения поезда после ВЧ-фильтрации

Учитывая, что мощность колебаний зависит от параметров поезда, мы искали типовые значения параметра. Для это были построены гистограммы амплитуд записей разных поездов в полосе 2–8 Гц, на которых наблюдаются отчетливые максимумы (рис. 5). 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.

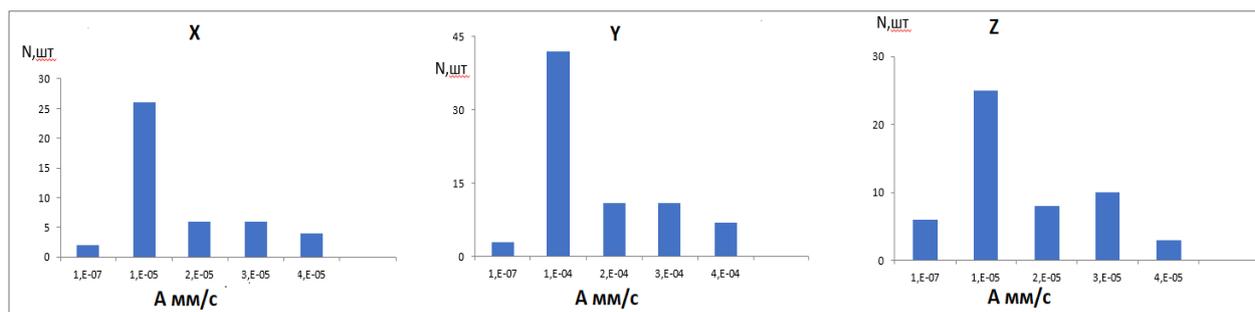


Рис. 5 Типичные гистограммы значений амплитуд волновых форм из диапазона 2–8 Гц по трем осям X, Y, Z

Для исключения влияния параметров поезда были выполнены своеобразные «нормировки» полученных значений, учитывающие как вес поезда, так и его длину и скорость, т. е. длительность записи. Для этого были рассчитаны отношения квадратов амплитуд во взаимно перпендикулярных направлениях A^2X/A^2Z (R_x), A^2Y/A^2Z (R_y)

Статистический анализ проводился не только для записей поездов за 2017 г. и 2019 г., но и для ударов кувалды при параллельно проводившейся малоглубинной сейсморазведке, для них рассчитывалась общая мощность серии ударов. Учет разного количества ударов в серии и

удаленность ударов от точки наблюдения - также путем построения отношений оценок на разных компонентах.

В августе 2017 г. была сухая погода, а в апреле 2019 г. 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 мощностей скоростей смещения в «мокрый» и «сухой» периоды для поездов и ударов малоуглубинной сейсморазведки в «сухой» период.

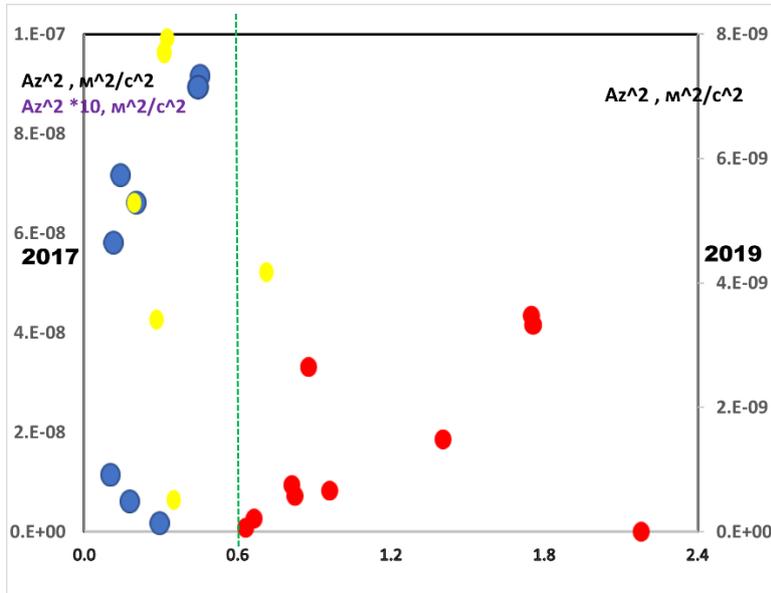


Рис. 6 Диаграмма разброса значений относительных мощностей колебаний, полученных по результатам статистического анализа записей поездов за 2017 (1) и 2019 год (2), удары сейсморазведки в 2017 г. (3)

Диаграмма разброса значений мощностей (рис. 6): относительных (A^2Y/A^2Z) и для оси Z (A^2Z) за 2017 и 2019 гг. показывает, что для сухого периода Ry 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 (или при деградации вечномёрзлых грунтов) колебания по оси Y интенсивнее, чем в сухой, что соответствует большей деформируемости грунта, в основном насыпи поперек пути при прохождении поезда.

Также можно говорить о том, что в летний «сухой» период основная энергий колебаний, вызванных движением поезда, сосредоточена в вертикальной плоскости.

В разделе 4.2 рассматриваются СЧ и НЧ составляющие сигналов и основные параметры, характеризующие состояние грунтов. Анализ записей показал, что отклик среды (земляного полотна) на воздействие поезда наблюдается не только по вертикали, но и в поперечном и продольном направлениях относительно насыпи, причем они могут превышать деформации при высокочастотных колебаниях.

СЧ-фильтрация (0.1–2 Гц). Рассмотрим возможность использования волновой формы Z-компоненты в начале записи для определения параметров деформирования грунтов. Сравнение повторяемости волновых форм для набора записей прохождения грузовых составов (рис. 7 а) показывает их подобие, т.е. наличие интенсивных экстремумов в начале и в конце записи. Наилучшая повторяемость присуща первому минимуму, его амплитуда A_1 была принята для дальнейшего анализа. Гистограмма A_1 (рис. 7, б) представлена тремя группами событий: в интервале 4.5-6 мкм/с – колебания соответствуют груженным составам, 2.5-4.5 мкм/с – пассажирские поезда, менее 2.5 мкм/с – отдельные экипажи. Оценка медианы и стандартного отклонения для груженных составов дает значения 5,01 и 0,04 мкм/с соответственно. Таким

образом, по экспериментальным данным величина A_1 мало зависит от таких параметров, как тип вагонов и длина поезда, величина скорости поезда регламентируется нормами, составляя около 70 км/час, и, по-видимому, ее вариации невелики для груженных составов. Повторяемость волновой формы и A_1 , показывает, что этот параметр может быть использован для мониторинга состояния грунтов *in situ*, т. е. для наблюдений при стационарной установке датчика в выбранной точке.

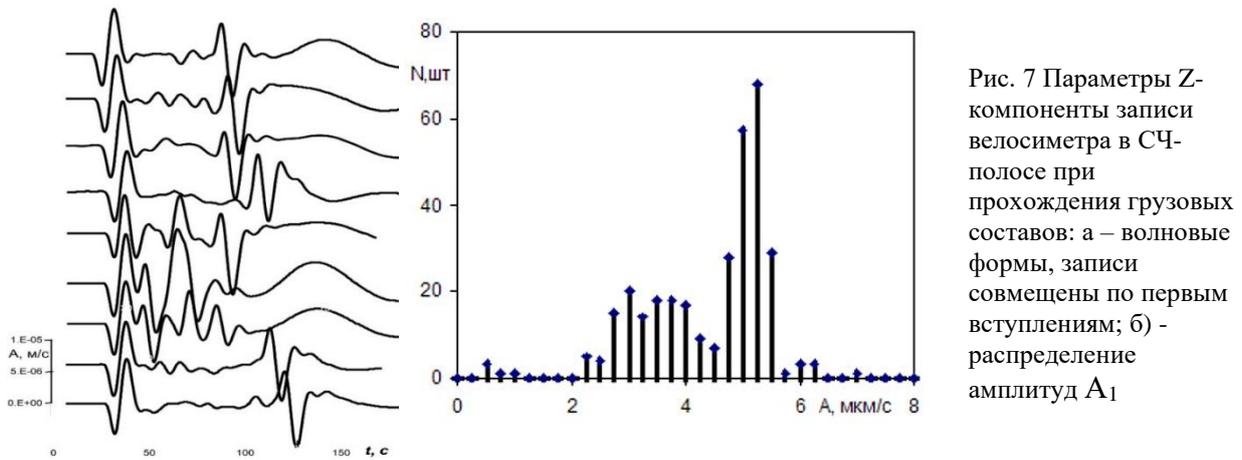


Рис. 7 Параметры Z-компоненты записи велосиметра в СЧ-полосе при прохождении грузовых составов: а – волновые формы, записи совмещены по первым вступлениям; б) – распределение амплитуд A_1

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. На рисунке 8 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_1 хорошо согласуются с экспериментальными значениями, что, совместно со схожим видом волновых форм (рис. 7а и рис. 8), показывает правильность выбранного теоретического подхода для данной области частот при рассмотрении Z-компоненты.

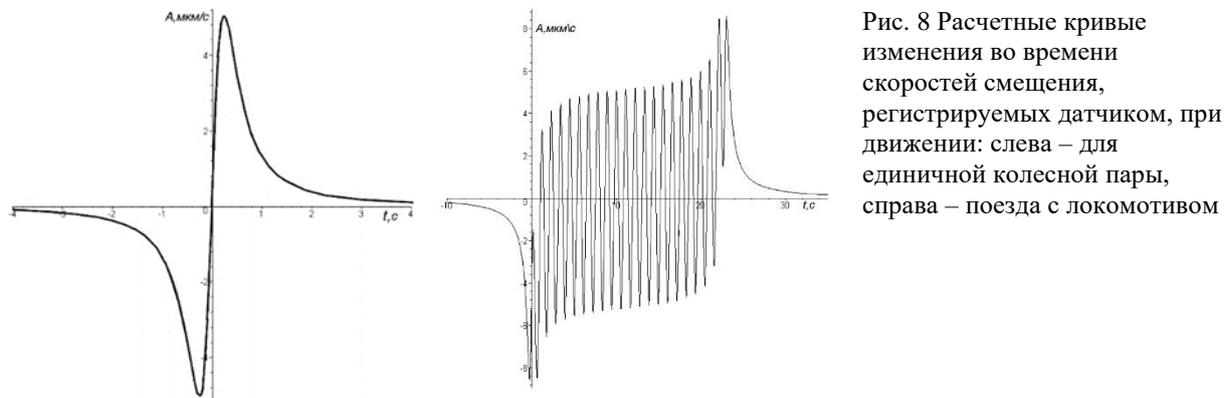


Рис. 8 Расчетные кривые изменения во времени скоростей смещения, регистрируемых датчиком, при движении: слева – для единичной колесной пары, справа – поезда с локомотивом

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 TRI-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 G уменьшается на порядок, 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 вечномерзлого грунта при его оттаивании на 1°C , что превосходит чувствительность известных нам способов внелабораторным измерений, т. е. *in situ*. Кроме того, уменьшение амплитуды в 1.5 раз при обводнении грунта в эксперименте 2019 г. (по сравнению с 2017 г.) соответствует увеличению скорости продольных волн V_p примерно в 2 и более раза. Учитывая, что $V_p \sim \sqrt{\mu}$, это соответствует увеличению μ примерно в 1.5 раза, что соответствует расчету.

Расчеты для горизонтальных компонент не дают хорошего согласия с экспериментом – колебания более высокочастотные по сравнению с Z (0,25 Гц) - для Y (1 Гц), и для X (около 2 Гц). Таким образом модель Буссинеска хорошо описывает наблюдаемые экспериментальные особенности волновых форм Z -компонент для СЧ диапазона, но мало пригодна для горизонтальных компонент СЧ и НЧ диапазонов.

НЧ фильтрация (ниже 0.1 Гц). 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) (рис. 3в, рис. 9). При этом A_Y на один-два порядка больше, чем A_X .

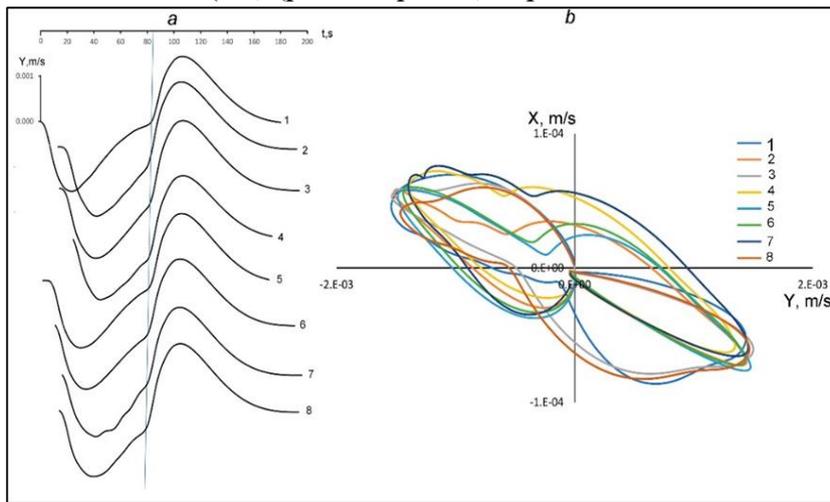


Рис. 8. Для различных поездов показаны: а) - волновые формы Y -компоненты при прохождении грузовых составов после НЧ-фильтрации, записи совмещены по времени момента после прохождения поезда; б) – траектории движения частиц в горизонтальной плоскости

Часть записи после прохождения поезда («хвост») достаточно проста по форме и подобна для разных ж/д составов (рис. 8). 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 (рис. 9).

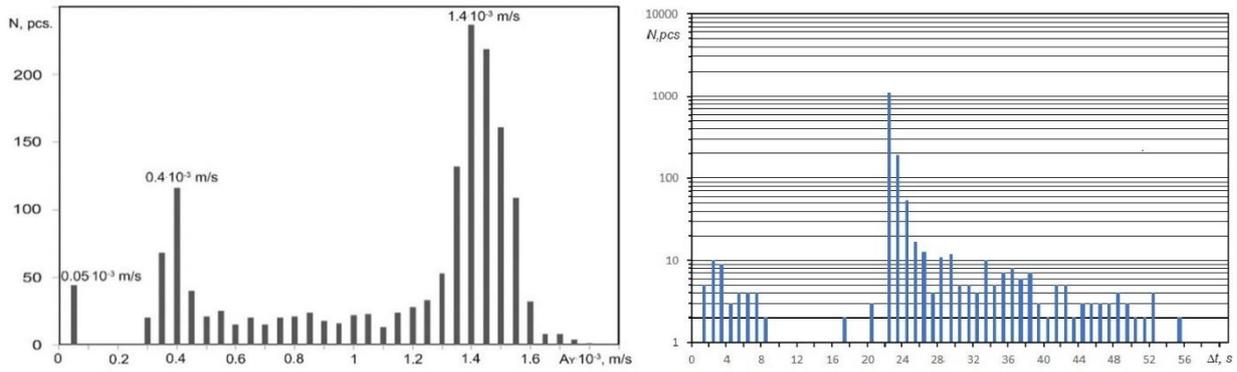


Рис. 9 Гистограммы значений: слева - амплитуд поперечной компоненты A_Y , справа - параметра Δt

Зависимость от веса поезда амплитуд показывает 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 (рис. 10). 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 были выполнены своеобразные «нормировки» полученных значений. Была принята оценка R , исходя из отношений амплитуд на горизонтальных компонентах:

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

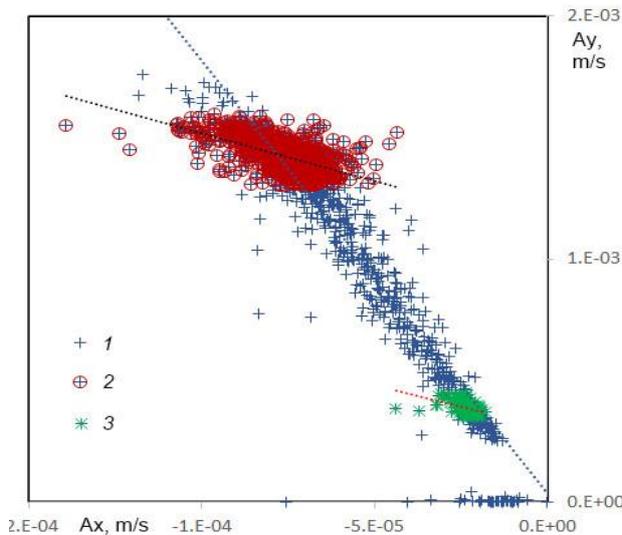


Рис. 10 Диаграмма разброса амплитуд горизонтальных компонент с указанием уравнения прямой тренда для каждого набора данных: 1 – весь набор данных, 2 – диапазон в районе $A_Y=0.4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$, 3 – диапазон в районе $A_Y=1.4 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$

Решение задачи Эльзассера для такого случая зависит от параметра a и промежутка времени T , в течение которого прикладывается возмущение в формуле (6). При задании величины a были использованы значения: $H=2.5 \text{ м}$, $h=4.5 \text{ м}$ в соответствии со схемой наблюдения результатами малоглубинной сейсморазведки. Модуль сдвига связан со скоростью поперечных волн следующим соотношением: $\mu = V_s^2 \cdot \rho = 44.8 \text{ МПа}$.

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.

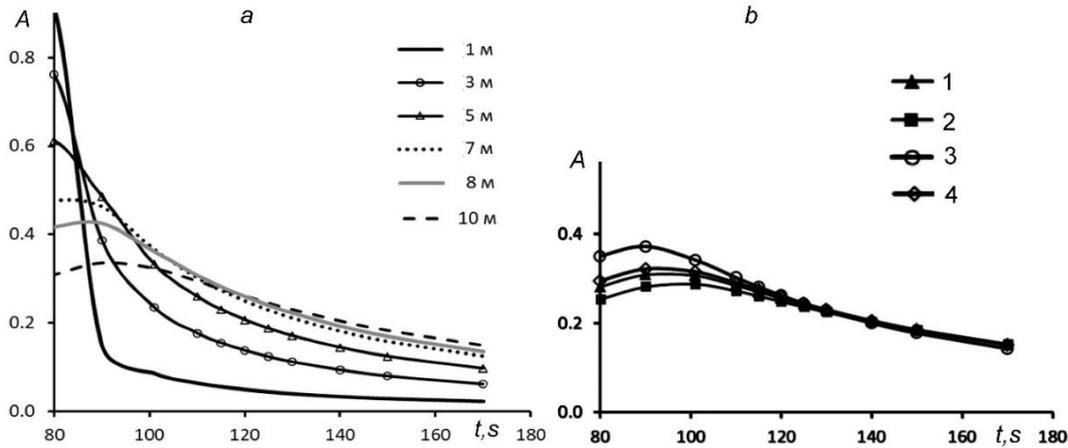


Рис. 11 Набор профилей амплитуд а) - регистрируемых на разных расстояниях от пути в зависимости от времени после прохождения поезда (после 80 с); б) – в зависимости от упруго-вязких параметров: 1- $\mu = 2 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ Па*с, 2 - $\mu = 1.8 \cdot 10^7$ Па, $\eta = 2 \cdot 10^9$ 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

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 80 с (рис. 11, а) Видно, как максимум воздействия проявляется чем дальше от пути, тем позже, при этом амплитуды возмущений уменьшаются. На расстоянии 5 м в этом 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 (рис. 11, б), 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.

В разделе 4.3 представлено тестирование технологии на сезонных изменениях. Для выявления уже произошедших изменений проводились наблюдения на неблагоприятном (АI, АII) и благоприятном участках (В).

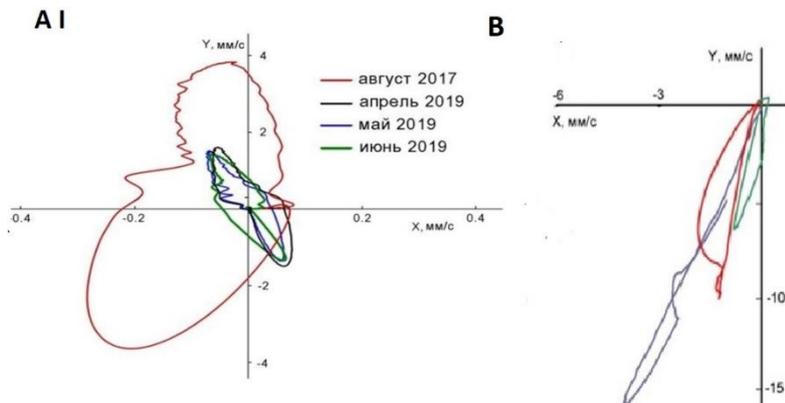


Рис. 12 Кривые траекторий движения точки насыпи при прохождении подвижных составов в полосе частот ниже 0.5 Гц в горизонтальной плоскости, датчики установлены в грунтах разных типов: неблагоприятные (АI) и устойчивые (В). Цветные линии – разные поезда

Кривые, соответствующие траекториям движения точки насыпи при движении поездов в полосе частот ниже 0,5 Гц в горизонтальной плоскости (рис. 12) позволяют выявить признак проблемного состояния грунта. Это - дипольная траектория, наличие положительных и отрицательных фаз колебаний в направлении вдоль и поперек пути. Укрепление неблагоприятных грунтов улучшают состояние грунта, вдоль пути в этом случае наблюдается однополярная низкочастотная волновая форма. Для устойчивых грунтов в горизонтальной плоскости регистрируется практически однополярный сигнал.

Возможность технологии для выявления сезонных изменений записей при длительной регистрации в одной точке. По результатам автоматизированной обработки записей в НЧ-диапазоне с определением отношения амплитуд горизонтальных компонент R и времени Δt (интервал $20 \text{ с} < \Delta t < 27 \text{ с}$), а также для параметров R_Y (ВЧ), и амплитуда первого максимума волновой формы вертикальной компоненты Z (СЧ), т.е. всех 4 параметров, был построен временной ход оценок в сравнении с кривой среднесуточной температуры в интервале времени с апреля по июнь 2019 г недельным сглаживанием (рис. 13). Параметры приведены в виде флуктуаций от среднего значения (в %) за весь период наблюдений.

Рассмотрим, как эти результаты согласуются с моделью Эльзассера. Предположительно, параметр, характеризующий высокочастотную составляющую колебаний (R_Y), при наблюдениях вблизи ж/д полотна определяется свойствами верхнего слоя. Тогда положительные значения флуктуаций до подъема температур связаны с относительно более высоким значением модуля деформации сдвига для замерзшего грунта по сравнению с значениями при последующем оттаивании.

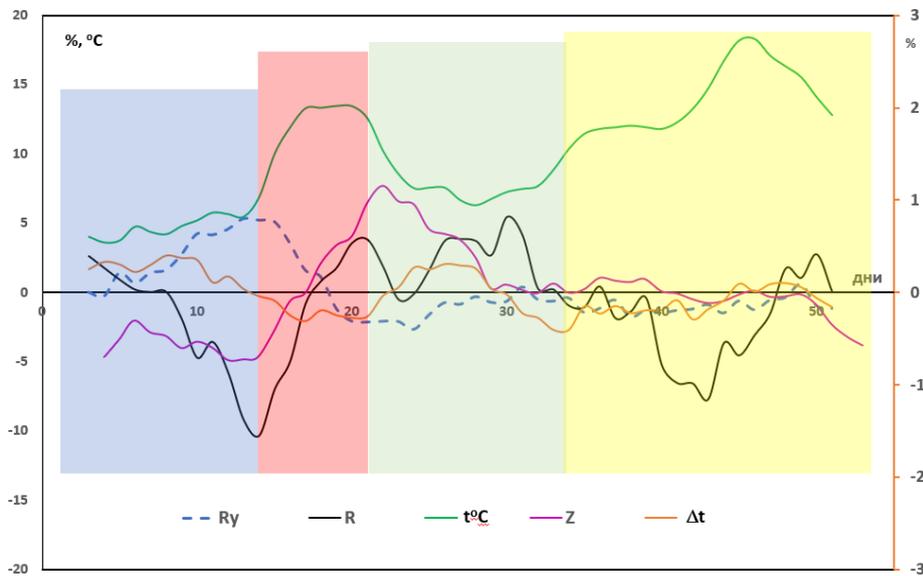


Рис. 13. Временной ход параметров R_Y , R , Δt , амплитуды компоненты Z , температуры $t^\circ\text{C}$

Минимум в начале временного хода R до подъема температур может быть также связан с большей вязкостью мерзлых грунтов в нижнем полупространстве по сравнению с последующим оттаиванием, и, согласно модели, это дало ослабление амплитуд, т. е. минимум R . При подъеме температуры под верхним слоем может происходить частичное оттаивание грунта в приграничной зоне, о чем свидетельствует запаздывание кривой R относительно хода температур. Это согласуется с данными о частичном таянии льда в грунтах при повышении даже отрицательных температур (Цытович, 1973). Вязкость в приграничной зоне становится меньше, флуктуации R становятся положительными. Следующий минимум объяснить трудно, возможно, он связан с частичным повышением вязкости всего подстилающего слоя за счет процессов при

дальнейшем прогревании. Для кривой Δt наблюдается подобие ходу кривой R в середине времени наблюдений. Согласно модели, увеличение величины Δt возможно либо при увеличении вязкости, либо при уменьшении модуля сдвига. Согласно предыдущим рассуждениям и модели, дающей заметное увеличение Δt при уменьшении модуля сдвига, именно уменьшение μ мы наблюдаем. Высказанные предположения о временном ходе кривых требуют специальных исследований, но в настоящее время нет фактов, им противоречащих.

В соответствии с моделью Эльзассера, анализ вариаций 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 Н. А. Цытовича (1973) 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 разделе 4.4 представлен алгоритм автоматизации определения параметров. На основании аналитической модели 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) времени достижения экстремума (Δt). При ВЧ-фильтрации 5–8 Гц - отношения медианных значений мощностей колебаний на горизонтальных компонентах (X , Y) к таковой на вертикальной (Z) при прохождении поезда R_x , R_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 3. Обработка данных включает два этапа: предварительная обработка и, собственно, мониторинг.

В разделе 4.5 рассматривается блок-схема технологии сейсмического мониторинга состояния грунтов основания пути с использованием движущихся поездов. 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 делать резервную копию 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 централизованная.

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. На рис. 14 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 данными от сети мониторинга пути при условии использования соответствующих датчиков. 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.

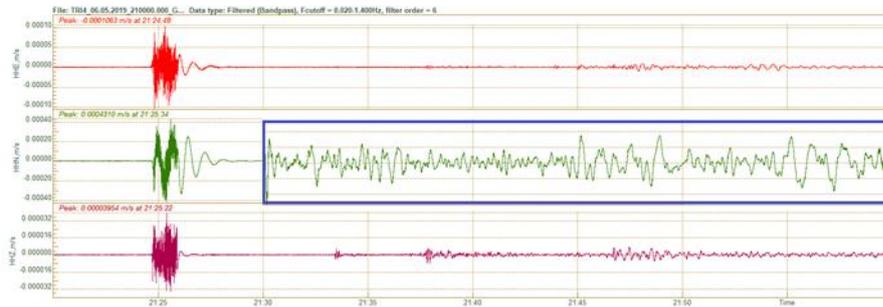


Рис. 14 – Волновые формы поезда и телесеismicкого землетрясения Папуа-Новая Гвинея, 06.05.2019, $t_0=21:19:35$, $m_b=6.9$, фильтр 0,02–1,4 Гц, записи выровнены по амплитуде, поэтому на компоненте Y землетрясение показано на врезке

В разделе 4.6 рассматривается вопрос комплексирования разрабатываемой технологии с другими методами обследования. Представлена аппаратно-методическая разработка для непрерывного геофизического мониторинга применима для широкого набора видов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты. Технология 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 изменяющимися 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-учеными Осика В.И., Кочетков Б.М., Павлов Е.И 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.

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

Выводы Рассмотрена возможность и основные элементы методики сейсмического мониторинга состояния грунтов основания железнодорожного пути с использованием вибраций от движущихся поездов. Выявлены основные параметра 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 результаты, полученные из работы, состоят в следующем:

1. Предложена аппаратурно-методическая разработка - технология непрерывного геофизического мониторинга основания железнодорожного полотна, использующая сейсмометрические наблюдения вибраций, создающих проходящими поездами. Данная разработка применима для широкого набора видов грунтов оснований путей, в том числе на обводненных территориях, при карстовых явлениях, деградации вечной мерзлоты в условиях Крайнего Севера и Сибири и других регионов со сложными грунтовыми условиями.

2. При разработке технологии важным является 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.

3. Получены сведения об изменениях важных характеристик грунтов: модуле сдвига в верхней части основания и коэффициенте вязкости в подстилающем слое, предположительно в так называемой зоне малых скоростей. Важно, что, во-первых, это один 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 синусоидальной волновой форма вертикальной компоненты (СЧ-фильтр),
- отношение амплитуд первых экстремумов в хвостовой части (после прохождения поезда) горизонтальных компонент (R), (НЧ-фильтр),
- времена достижения экстремума (Δt), (НЧ-фильтр)
- отношения медианных значений мощностей колебаний на горизонтальных компонентах (X, Y) к таковой на вертикальной (Z) при прохождении поезда R_x , R_y , (ВЧ-фильтр)

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 технологии на грунтах разного типа и в разной стадии деградации для выяснения границ применимости технологии.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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. Басакина // Вестник геонаук. 2020. № 4 (304). С. 33–39. DOI: 10.19110/geov.2020.4.5

2. Орлова И.П. Определение *in situ* упругих свойств нижнего строения железнодорожного пути при сейсмометрических наблюдениях. / Г.Н. Антоновская, И.П. Добровольский, Н.К. Капустян, И.П. Орлова // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 1. С. 44–55. DOI: 10.21455/si2020.1-4
3. Орлова И.П. Мониторинг деформационного состояния ответственных и технически сложных объектов. / В.И. Осика, Б.М. Кочетков, Е.И. Павлов, И.П. Качан (Орлова) // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 1. С. 46–52. DOI: 10.18358/np-27-1-i4652
4. Орлова И.П. Применение геофизических датчиков из кварцевого стекла в системах контроля строительных сооружений и крупных механизмов. / В.И. Осика, Б.М. Кочетков, Е.И. Павлов, И.П. Качан (Орлова), В.А. Пчелинцев // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 1. С. 19–32. DOI: 10.21455/std2017.1-2

Публикации в сборниках и материалах конференций:

5. I.P. Orlova Prospects for Passive Seismic Methods for Monitoring the Railway Base in Areas with Difficult Soil Conditions. / I.P. Orlova, N.K. Kapustian and G.N. Antonovskaya // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p.1 – 8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152071>
6. Орлова И.П. Возможности мониторинга основания железнодорожного пути пассивными сейсмическими методами. / И.П. Орлова, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина И.М. // 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.
7. 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 // В книге: Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН. Тезисы докладов и программа конференции. 2020. С. 51.
8. Орлова И.П. Опыт сейсмического исследования гетерогенной среды земляного полотна железнодорожного пути. В сборнике: Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. / И.П. Орлова, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина // Сборник трудов 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. 2019. С. 329-335.
9. Орлова И.П. Мониторинг напряженно-деформированного состояния храмов и других исторических зданий. / И.П. Орлова, В.И. Осика, Е.И. Павлов, П.И. Трофимов, Ю.В. Новак // Сборник трудов 7-й Международного научно-практического симпозиума «Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси» 14-15 ноября 2018., стр.132-140.
10. Орлова И.П. "Опыт применения приборов с кварцевой механикой для мониторинга деформаций и наклонов на руднике «Карнасурт» Ловозерского ГОК". / И.П. Орлова, В.И. Осика, Е.И. Павлов и др. // Материалы Общероссийской научно-практической конференции «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях» 18 марта 2021 г.