

На правах рукописи



Шаповалов Владимир Леонидович

**ДИАГНОСТИКА БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ И ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

2.9.2 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование
железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону
2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный консультант: *Явна Виктор Анатольевич,*
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВО
«Ростовский государственный университет
путей сообщения» (РГУПС)

Официальные оппоненты: *Ашпиз Евгений Самуилович,*
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Путь и путевое
хозяйство» ФГАОУ ВО «Российский
университет транспорта» (МИИТ);

Кулижников Александр Михайлович,
доктор технических наук, профессор, начальник
управления методов проектирования автодорог
ФАУ «Российский дорожный научно-
исследовательский институт» (РОСДОРНИИ);

Певзнер Виктор Ошеревич,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник научного центра «Путевая
инфраструктура и вопросы взаимодействия
колесо-рельс» АО «Научно-исследовательский
институт железнодорожного транспорта»
(АО «ВНИИЖТ»)

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I» (ПГУПС)

Защита состоится 23 декабря 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, читальный зал, и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
доктор технических наук, профессор

П. Н. Щербак

Актуальность темы исследования. Реализуемая компанией ОАО «РЖД» стратегия развития железных дорог предполагает поэтапное увеличение нагрузок на путь и скоростей движения поездов. Для обеспечения безопасности перевозочного процесса в условиях совмещенных воздействий скоростного и тяжеловесного грузового, а также высокоскоростного подвижного состава необходимо гарантировать эксплуатационную надежность всех элементов пути.

Перспективные методы решения этой задачи связаны с реализацией направлений научно-технологического развития холдинга «РЖД», которые определены Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации. К ним, в первую очередь, относится переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным комплексам, новым материалам и способам конструирования, созданию систем обработки больших объемов данных, машинному обучению и искусственному интеллекту.

Реализация этих направлений призвана повысить эффективность мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту железнодорожного пути, а также развитию железнодорожного сообщения. В настоящее время для обеспечения требований безопасности движения поездов выполняются различные виды ремонтов, в большей степени относящиеся к обновлению верхнего строения, в то время как основную нагрузку воспринимают не только рельсошпальная решетка и подшпальное основание, но и основная площадка земляного полотна. Проводимые ремонтные мероприятия, как правило, не затрагивают земляное полотно, о чем свидетельствует рост протяженности «больных» участков, регистрируемый в последние годы. Ремонт и усиление земляного полотна производятся крайне редко и только тогда, когда неисправности могут привести к прекращению движения поездов или значительному ограничению его скорости. В настоящее время протяженность дефектного земляного полотна достигла 10 % от общей протяженности железных дорог РФ.

В связи с высокой ресурсоемкостью работ по ремонтам земляного полотна в соответствии с «Белой книгой» (Стратегия научно-технологического развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года) особое внимание необходимо уделять развитию систем диагностики и мониторинга, способных получать объективную информацию об объектах транспортной инфраструктуры. Такие системы должны осуществлять контроль на всем протяжении железнодорожного пути с получением информации, необходимой для оценки фактического состояния обследуемых конструкций. Приоритет приобретает автоматизация прогнозирования развития ситуаций по данным соответствующих измерений. Решению этой задачи посвящены работы ученых А. Ю. Абдурашитова, Г. Л. Аккермана, В. В. Атапина, Е. С. Ашпиза, Л. С. Блажко, Н. М. Быковой, Д. В. Величко, В. В. Виноградова, Э. М. Доброва, А. А. Дорошкевича, П. И. Дыдышко, А. В. Замуховского, А. Л. Исакова, В. Д. Казарновского, Д. А. Ковенькина, А. Я. Когана, А. Ф. Колоса, Г. Г. Коншина, М. Я. Крицкого, А. Л. Ланиса, С. Я. Луцкого, В. И. Новаковича, А. В. Романова, В. О. Певзнера, А. А. Пиотровича, И. В. Прокудина, Ю. С. Ромена, А. В. Савина, А. В. Соколова, Э. С. Спиридонова, Г. М. Стояновича, Т. В. Суворовой, О. А. Сулова, В. П. Сычева, Ю. К. Фроловского, С. В. Шкурникова, В. А. Явна.

В настоящее время для определения состояния балластного слоя и земляного полотна на железных дорогах РФ используются различные инженерные и геофизические методы, а также их комплексы. Такой подход применяется при

обследовании локальных участков пути. При обследовании протяженных участков в нашей стране и за рубежом применяется метод георадиолокации, реализуемый программно-аппаратными комплексами, установленными на подвижных экипажах. Метод позволяет выполнять диагностику балластного слоя и основной площадки земляного полотна в скоростном режиме и не требует контакта измерительной аппаратуры с исследуемой средой. В России такие технологии применяются в современных диагностических комплексах типа «Интеграл» и «Эра». Такие комплексы оснащены многоканальными георадиолокационными системами, диагностирующими балластный слой и основную площадку земляного полотна. При этом необходимо увеличение информативности метода георадиолокации путем расширения перечня определяемых параметров и увеличения их достоверности для выявления предотказных состояний железнодорожного пути, повышения качества предпроектных изысканий и контроля качества выполненных ремонтных работ.

Степень разработанности. Физические основы метода георадиолокации разрабатываются на основе уравнений Максвелла, известных со второй половины XIX века.

В 1910–1912 гг. Г. Лови и Г. Леймбах выполнили исследования по просвечиванию геологической среды на высоких частотах электромагнитного излучения и разработали теоретические основы использования электромагнитных волн для анализа грунтов. Применение импульсного электромагнитного сигнала для оценки внутренней геологической среды осуществил в 1929 г. В. Штерн, а в 1956 г. – Эль-Саид. В нашей стране аналогичные исследования проводились с 1925 г. А. А. Петровским. В 1960 г. И. К. Куком был предложен способ формирования видеоимпульса.

В СССР данным направлением исследований занимались такие ученые, как Ю. И. Лещанский, М. И. Финкельштейн, В. П. Золотарёв, М. К. Крылов, В. К. Хмелевской, А. В. Калинин, Г. Г. Брызгалова, Д. Г. Малюжинец, В. А. Мендельсон и В. А. Кутев. В работах Л. М. Бреховских изложена теория распространения электромагнитных волн в слоистых средах. В развитие методов георадиолокации внесли заметный вклад М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, А. Ю. Калашников, А. Е. Резников, С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский, В. В. Капустин, Р. Р. Денисов и др. Практическим применением георадиолокационных технологий и методик на железных и автомобильных дорогах занимались ученые А. М. Кулижников, А. Г. Круглый, Е. С. Ашпиз, Н. П. Семейкин, В. В. Помозов, В. А. Явна, В. И. Грицык и др.

Исследование современного состояния вопроса применения метода георадиолокации для диагностики объектов инженерной инфраструктуры показало развитие данного направления в нашей стране и за рубежом. Так, за рассматриваемый период по теме диссертационной работы было опубликовано 314 работ, цитируемых в базах данных Scopus, 613 патентов и более 300 работ, цитируемых в отечественных базах данных. Исследованиям, связанным с взаимодействием электромагнитного излучения со средой и определением эмпирических зависимостей электрофизических характеристик различных материалов, посвятили свои работы G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan, J. C. Moore, N. Maeno, R. N. Rau, R. P. Wharton, L. C. Shen, W. C. Savre, J. M. Price, W. L. Lai, T. Kind, H. Wiggenshauser, Xicai Pan, Ute Wollschlager, Holger Gerhards, Kurt Roth, Fabio Tosti, Claudio Patriarca, Evert Slob, Andrea Benedetto, Sebastien Lambot,

R. Martinez-Sala, I. Rodriguez-Abad, R. DiezBarra, R. Capuz-Lladro, В. Д. Шестопалов, А. А. Бранд, Л. М. Бреховских, Ю. Л. Хотунцев, Н. Н. Кисель, Д. А. Усанов, А. Д. Фролов и др.

В области определения количественных параметров линейно непрерывных сред можно выделить работы авторов R. De Bold, G. O'Connor, J. P. Morrissey, M. C. Forde, в которых выполнено исследование на частотах 500, 900, 1000, 1600, 2600 МГц. Также можно отметить работы ученых Z. Leng, Al-Qadi, P. Anbazhagan, P. S. Naresh Dixit, T. P. Bharatha, В. В. Пупатенко и Я. В. Паженцева, Г. В. Лобанова, А. В. Поляковой, Л. Г. Нерадовского, Л. Л. Федоровой, Yongping Wang, Huijun Jin, Guoyu Li, Xianlei Xu, Suping Peng, Yunhai Xia, Wanjun Ji, Yuewen Zana, Zhilin Lia, Guofeng Sua, Xiyuan Zhang, занимающихся вопросами диагностики свойств грунтов и конструктивных слоев железнодорожного пути методом георадиолокации.

Применение метода георадиолокации для мониторинга локальных объектов железнодорожной инфраструктуры в нашей стране связано с работами ученых МИИТа и ВНИИЖТа и датируется второй половиной прошлого столетия. Результаты их исследований позволили создать инструкции по применению метода георадиолокации. К ним относятся «Технические указания по применению георадиолокационного метода для диагностики земляного полотна» от 29 декабря 1997 г., «Технические указания по инструментальной диагностике земляного полотна», 2000 г., которые создали нормативную базу применения метода на сети железных дорог РФ.

Первый опыт применения метода георадиолокации при мониторинге протяженных участков сети железных дорог ОАО «РЖД» с использованием вагонов-лабораторий, движущихся со скоростями до 60–80 км/ч, относится к началу 2000-х годов. В это время специалисты ООО «ЛОГИС» разработали аппаратуру, обладавшую необходимой производительностью, испытание которой в полевых условиях впервые выполнили сотрудники РГУПС и ООО «ЛОГИС» на полигоне Северо-Кавказской железной дороги (рисунок 1).



Рисунок 1 – Экспериментальная трехканальная георадиолокационная установка

В данной работе для развития возможностей георадиолокации при решении задач мониторинга протяженных участков железных дорог разработаны программные комплексы, способные автоматически в режимах реального времени и камеральной обработки профилировать конструктивные слои, определять их деформации и физические свойства. Описание разработанного комплекса приведено в главе 4 диссертации. В настоящее время на сети железных дорог используются программные комплексы РГУПС на базе вагонов «ДЕКАРТ» и «ИНТЕГРАЛ» АО «Фирма Твема» (Распоряжение № 2615р от 5 декабря 2011 г. «Об утверждении Инструкции по оценке состояния инфраструктуры с использованием новых диагностических средств комплексной диагностики инфраструктуры ОАО «РЖД» (ИНТЕГРАЛ, ЭРА)»).

Для внедрения на сети железных дорог результатов исследования данной диссертационной работы разработаны нормативные документы, регламентирующие использование метода георадиолокации для диагностики и мониторинга

конструкции железнодорожного пути, включая протяженные участки. К ним относятся: «Методические указания по георадиолокационной диагностике объектов земляного полотна железнодорожного пути» (2005 г.), «Методика георадиолокационного обследования опор мостов и других инженерных конструкций» (2007 г.), «Методика и технологические инструкции обнаружения инородных объектов в балластном слое железнодорожного пути методом георадиолокации» (2008 г.), «Технология приемки участков пути после ремонтов, оценки загрязнения щебня, мониторинга развития деформативности, определения переувлажнения земляного полотна методом георадиолокации» (2010 г.), «Регламент проведения георадиолокационных работ на железнодорожном пути в различных природно-климатических условиях» (2010 г.), «Инструкция по применению скоростной георадиолокационной диагностики железнодорожного пути» (Распоряжение ОАО «РЖД» от 27 декабря 2012 г. № 2704р), в которых нашли отражение новые аппаратные и программные возможности метода георадиолокации.

В результате этой работы в настоящее время метод георадиолокации занял подобающее место в системе наблюдений за состоянием балластного слоя и земляного полотна железных дорог.

Цели и задачи исследования. Цели и задачи диссертационной работы сформулированы на основе анализа мирового и отечественного опыта диагностики балластного слоя и земляного полотна железных дорог, а также возможностей современного георадиолокационного оборудования, применяемого на железнодорожном пути и возможностей программного обеспечения для обработки информации, полученной в скоростном и пешем режимах.

Целью исследования является разработка технологии диагностики локальных и протяженных участков железных дорог, которая позволит определять параметры толщины и засоренности балластного слоя, плотности и влажности грунтов основной площадки земляного полотна, необходимые для оценки отклонений от нормативных значений и назначения ремонтов пути по его фактическому состоянию.

Достижение поставленной цели связано с исследованиями, направленными на повышение качества георадиолокационной информации в условиях развитой инженерной инфраструктуры железных дорог, а также с развитием методов количественной обработки георадиолокационной информации, с созданием методов получения физических характеристик исследуемых сред, в том числе и при автоматической обработке георадиолокационных данных, с развитием методов диагностики состояния многослойных конструкций, к которым относятся конструктивные слои железнодорожного пути.

Таким образом, к основным задачам, решаемым для достижения поставленной цели, можно отнести:

- разработку теоретических подходов для получения новых качественных и количественных характеристик железнодорожного балластного слоя и земляного полотна при их диагностике;
- создание алгоритмов и методик определения параметров балластного слоя и основной площадки земляного полотна, позволяющих оценивать их состояние и назначать ремонты пути по его фактическому состоянию;
- расширение возможностей программно-аппаратного комплекса георадиолокационной диагностики разработанными алгоритмами для автоматического выявления дефектов балластного слоя и деформаций основной площадки земляного полотна;

– апробацию и внедрение разработанных методик, алгоритмов и программ для диагностики и мониторинга протяженных участков сети железных дорог.

Решение поставленных задач диссертационной работы с учетом стратегии и концепции развития компании ОАО «РЖД» направлено на решение двух важных задач путевого хозяйства:

– обеспечение безопасности движения поездов за счет предупреждение предотказного состояния пути;

– решение задач организации технического обслуживания за счет оптимизации планирования работ по текущему содержанию и ремонтам пути.

Научная новизна. Научная новизна выполненной в данной работе исследований обосновывается следующими положениями.

1. Разработаны и верифицированы георадиолокационные методы определения засоренности железнодорожного балластного слоя и плотности грунта земляного полотна при его строительстве и ремонте. В отличие от используемых методов, георадиолокация является неразрушающим методом и предусматривается при обследовании протяженных участков железнодорожного пути, в том числе и в скоростном режиме.

2. Разработаны и верифицированы методы определения удельной проводимости и влажности конструктивных слоев железнодорожного пути.

3. Разработаны и верифицированы корреляционные методы, связывающие электрические и физические свойства конструктивных слоев железнодорожного пути. Методы, приведенные во 2 и 3 пунктах, на момент их разработки не имели аналогов.

4. Созданы программные продукты для обработки и интерпретации георадиолокационной информации с автоматическим получением диагностической информации о состоянии балластного слоя и земляного полотна. Разработанные алгоритмы на момент разработки и получения правоохранных документов не имели аналогов, используемых при диагностике отечественных железных дорог.

Теоретическая значимость работы. Результаты теоретических исследований, проведенных в данной работе, позволили разработать метод георадиолокации для решения задач мониторинга и диагностики балластного слоя и основной площадки земляного полотна протяженных участков железных дорог при их строительстве, ремонте и текущем содержании.

В результате теоретических исследований удалось повысить качество информации о толщине и засоренности балластного слоя, влажности и плотности грунтов основной площадки земляного полотна. Разработанные компьютерные алгоритмы и программы автоматизировали выявление и оценку скорости изменения геометрических параметров деформаций основной площадки земляного полотна, что необходимо для диагностирования предотказных состояний железнодорожного пути.

Полученные теоретические результаты могут квалифицироваться, как важные для железнодорожного транспорта научные достижения.

Практическая значимость работы.

Результаты теоретических исследований, проведенных в данной работе, легли в основу создания программно-аппаратного комплекса для скоростного контроля состояния железнодорожного пути, который в автоматическом режиме позволяет определять основные геометрические и физические параметры балластного слоя и основной площадки земляного полотна, влияющие на деформа-

тивность железнодорожного пути. К определяемым параметрам относятся: засоренность и толщина балластного слоя, влажность, плотность и скорость изменения геометрических параметров деформаций основной площадки земляного полотна.

Программно-аппаратный комплекс включен в перечень инновационных технологий Министерства транспорта Российской Федерации и внедрен на объектах ОАО «Российские железные дороги», ФГУП «Крымская железная дорога» и железных дорог Республики Казахстан. На полигоне ОАО «РЖД» он используется на базе вагонов «ДЕКАРТ» и «ИНТЕГРАЛ» производства АО «Фирма Твема».

Обобщение результатов диагностики и мониторинга локальных и протяженных участков железных дорог, выполненное в данной работе, позволило разработать и утвердить ряд нормативных документов, регламентирующих использование метода георадиолокации на сети железных дорог при обследовании балластного слоя и основной площадки земляного полотна (приведены в разделе «Степень разработанности»).

Эти результаты могут квалифицироваться, как имеющие важное хозяйственное значение для железнодорожного транспорта.

Объект исследования. Объектом исследования является балластный слой и основная площадка земляного полотна железнодорожного пути.

Предмет исследования. Предметом исследования является загрязненность и толщина балластного слоя, влажность и плотность грунтов основной площадки земляного полотна.

Методы исследования. При решении задач, поставленных в работе, проводились теоретические и экспериментальные исследования в лабораторных условиях и на натуральных объектах. Лабораторные исследования выполнялись на поверенном оборудовании в аккредитованной научно-исследовательской испытательной лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве» РГУПС. Натурные исследования были выполнены на действующих и строящихся участках железных дорог. Теоретические исследования выполнялись методами классической электродинамики, компьютерного моделирования, программирования и алгоритмизации процессов распространения электромагнитного излучения в веществе и его взаимодействие с неоднородностями вещества.

Положения, выносимые на защиту.

1. Теоретические соотношения, позволяющие по данным георадиолокационного обследования определять влажность и плотность грунтов основной площадки земляного полотна, протяженность и скорость развития деформаций.

2. Методики, необходимые для оценки технического состояния балластного слоя и основной площадки земляного полотна железных дорог, базирующиеся на результатах обработки георадиолокационных данных:

- методика определения засоренности балластного материала;
- методика оценки плотности грунтов при строительстве и ремонтах земляного полотна;
- методика оценки влажности грунтового материала, подготовленного для уплотнения при строительстве и ремонтах земляного полотна;
- методика пространственной обработки георадиолокационной информации.

3. Георадиолокационный программно-аппаратный комплекс, позволяющий в скоростном режиме получать георадиолокационную информацию о состоянии балластного слоя и основной площадки земляного полотна, привязывать ее к железнодорожным координатам, обрабатывать информацию в режиме реального времени и камеральной обработки с целью определения их фактического состояния.

4. Критерии оценки состояния балластного слоя и основной площадки земляного полотна по данным георадиолокационной диагностики при текущем содержании пути и контроле качества его ремонтов.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных теоретических результатов и выводов определяется использованием классической теории электродинамики, корректностью выполненных преобразований, верификацией теоретических результатов экспериментальными измерениями, проведенными в лабораторных условиях и на натуральных объектах.

Достоверность георадиолокационных методов определения физических и электрофизических свойств конструктивных слоев железнодорожного пути и свойств природных и инфраструктурных объектов базируется на:

- применении при регистрации и обработке георадиолокационных данных апробированного программного обеспечения;
- верификации в лабораторных и натуральных условиях поверенным оборудованием испытательной лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве» РГУПС (аттестат аккредитации № RA.RU.21PC69 от 29.01.2016).

Достоверность методов и алгоритмов оценки засоренности балластного слоя, послойного сканирования конструктивных слоев, а также привязки результатов георадиолокационного обследования линейных и площадных объектов к путевым координатам верифицированы лабораторными и натурными измерениями, которые выполнялись по утвержденным методикам и нормативным документам.

Достоверность выводов о возможностях и производительности созданного программного обеспечения для георадиолокационного мониторинга протяженных участков железнодорожного пути обосновывается общесетевым характером его внедрения.

Достоверность корреляционных методов, связывающих электрические и физические свойства материалов конструктивных слоев железнодорожного пути и объектов инфраструктуры, верифицировалась результатами лабораторных исследований.

Информация по объемам выполненных работ. Результаты разработанных в рамках данной диссертационной работы алгоритмов, методик, технологий и программ отражены в актах об использовании результатов георадиолокационной диагностики при проектировании ремонтов железнодорожного пути на объектах Северо-Кавказской железной дороги, о проведении испытаний программно-аппаратных средств георадиолокационной диагностики в рамках проекта АСУ «Магистраль», о проведении испытаний программно-аппаратного комплекса (ПАК) для обработки результатов скоростной георадиолокационной диагностики железнодорожного пути в составе диагностического комплекса «ИНТЕГРАЛ» и об адаптации конструкций георадаров к условиям железнодорожной инфраструктуры при сотрудничестве с проектно-изыскательским инсти-

тутом «Кавжелдорпроект» – филиалом АО «Росжелдорпроект», ТОО «НИИ развития путей сообщения», Казахстан, ЗАО «Фирма ТВЕМА» и ООО «ЛОГИС» соответственно. Объемы выполненных работ с применением разработанных алгоритмов, методик, технологий и программ можно оценить следующими значениями. В рамках проектирования ремонтов и модернизации железнодорожного пути было обследовано 74 линейных объекта общей протяженностью 728,7 км, на которых проводилась диагностика балластного слоя и основной площадки земляного полотна. В результате была определена толщина балластного слоя на всем его протяжении и выявлены более 70 мест с деформациями основной площадки. Эти данные были учтены при проектировании ремонтов на обследованных участках. Ежегодный объем обследования балластного слоя и основной площадки земляного полотна железнодорожного пути диагностическими комплексами производства «ТВЕМА», в состав которых входят георадары, можно оценить величиной более 85 тыс. км. Кроме этого, георадиолокационные технологии были использованы при проектировании ремонта железнодорожного пути в тоннелях.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы были доложены на Всероссийских научно-практических конференциях: «Транспорт-2004», «Транспорт-2006», «Транспорт-2010», «Транспорт-2011», «Транспорт-2012», Международных научно-практических конференциях: «Транспорт-2013», «Транспорт-2014», «Транспорт-2019», «Транспорт-2020», «Транспорт-2021» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2004, 2006, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2019, 2020, 2021 гг.), на Международной научной конференции «Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2004 г.), на Четвертой международной научно-практической конференции «Георадар-2004» (Москва, МГУ, 2004), на Международной научно-практической конференции «Современные проблемы путевого комплекса, повышения качества подготовки специалистов и уровня научных исследований» (МИИТ, Москва, 2004 г.), на Третьей и Четвертой международных научно-практических конференциях «ТелекомТранс-2005» и «ТелекомТранс-2006» (Сочи, РГУПС), на Международной научно-практической конференции «Инженерная геофизика – 2006» (Геленджик, EAGE, 2006 г.), на Второй международной научно-практической конференции «ИнтеллектТранс-2012» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2012 г.), Третьей российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-12) (Москва, ИПУ РАН, 2012 г.), на международных конференциях и выставках «Инженерная геофизика – 2012», «Инженерная геофизика – 2013», «Инженерная геофизика – 2014», «Инженерная геофизика – 2015», «Инженерная геофизика – 2016» (Геленджик, EAGE, 2012, 2013, 2014, 2015 гг., Анапа, 2016 г., Кисловодск, 2017 г.), «Инженерная и рудная геофизика – 2018», «Инженерная и рудная геофизика – 2019», «Инженерная и рудная геофизика – 2020» (Казахстан, Алматы, 2018 г., Геленджик, 2019 г., Пенза, 2020 г., Геленджик, 2021 г.), на заседании Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» (Москва, 2013 г.), на Международном семинаре «Инновационные технологии для решения топографо-геодезических задач» (Ростов-на-Дону, Новочеркасск, 2013 г.), на Третьей международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте – 2013» (Санкт-Петербург, 2013 г.), на международных научно-технических конференциях: 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2014 (Brussels, Belgium, 2014) Construction and Maintenance of Railway

Infrastructure in Complex Environment (Beijing, China Beijing Jiaotong University (BJTU), 2014), «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца» (Москва, МИИТ, 2014, 2017, 2021 гг.), на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» (Ростов-на-Дону, РГУПС, 2017 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, обсуждены и опубликованы в 67 работах из общего списка в 94 научных работ. Из них 17 работ опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 20 работ – в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент на изобретение, 6 патентов на полезную модель и 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 396 страниц машинописного текста, в том числе 331 страница основного текста, 159 рисунков, 38 таблиц, 4 приложения. Список литературы включает 343 наименования отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности направления исследований диссертационной работы, постановку целей исследования и решаемых задач. Во введении отражены методы и объекты исследований, показаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе, в параграфе 1.1, рассмотрены общие вопросы надежности и мониторинга действующих и перспективных объектов железнодорожной инфраструктуры.

В параграфе 1.2 рассмотрены используемые методы оценки состояния балластного слоя по засоренности балластного материала и толщине балласта под шпалой.

В качестве метода оценки засоренности рассмотрена методика, приведенная в Методических указаниях № ЦПТ-16-77 по обследованию балластного слоя, которая предусматривает отбор и рассев балластного материала с установлением массы засорителя и загрязнителя. Важность этого параметра определяется Техническими условиями на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути (введены распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 № 75р (с изм. от 07.07.2020)) и определяется возможностью:

– назначения проведения ремонтов пути по фактическому состоянию балласта, когда засоренность балластного материала превышает значение 30 % по массе;

– организации контроля качества выполненного ремонта, когда засоренность балластного материала не должна превышать 5 % по массе.

Еще одним критерием качества балластного слоя являются его размерные параметры, основными из которых можно считать ширину плеча балластной призмы и ее толщину. Толщина балластного слоя влияет на равномерность распределения поездной нагрузки и нагрузки от собственного веса рельсошпальной решетки. Размерные параметры балластной призмы и методы их измерения (метод бурения (шурфления) или применение зондировочного лома) введены распоряжением ОАО «РЖД» от 18.01.2013 № 75р (с изм. от 07.07.2020).

Регламентированные для оценки состояния балластного слоя методы измерений являются дискретными и не всегда обеспечивают достаточную информацию для качественного проектирования ремонтов пути. Для повышения информативности необходимо использование современных технологий, позволяющих обеспечить получение качественной информации на большом протяжении бесконтактным способом.

В частности, существуют методики, позволяющие при визуальном обследовании выявлять наличие участков с выплесками и по их наличию и количеству судить о состоянии балластного слоя. Однако при таком обследовании не известно фактическое засорение, поскольку интервал засоренности, при котором могут проявляться выплески, очень широк и его начальный предел может находиться ниже порогового значения.

В качестве другого перспективного бесконтактного метода, который можно использовать для скоростной диагностики балластного слоя, можно выделить метод георадиолокации. В России такой метод используется в диагностических комплексах «ЭРА», «ИНТЕГРАЛ» и «ДЕКАРТ». Аналогичные технологии разрабатываются и внедряются за рубежом. Метод георадиолокации, при наличии соответствующих технологий и методик, позволяет определить засоренность балластного материала, толщину балластного слоя и структуру нижележащих конструктивных слоев в скоростном режиме с автоматической обработкой полученных результатов. Обзор современной отечественной и зарубежной литературы показал большой интерес к применению метода георадиолокации для диагностики балластного слоя.

В параграфе 1.3 рассмотрены основные конструкции земляного полотна, грунты, методы контроля и мониторинга земляного полотна. Предпроектные изыскания, качественные ремонты и периодическое обследование (мониторинг) земляного полотна позволяют предотвратить внезапные деформации за счет своевременного выявления и устранения нарушений.

Обследование земляного полотна состоит из визуальных осмотров и проведения инженерно-геологических изысканий, а также анализа лент вагонов-пути измерителей по просадкам пути с автоматическим анализом при использовании разработанной в МИИТ д.т.н. Е. С. Ашпизом специализированной программы StabWay.

Инженерно-геологические изыскания проводятся согласно СП II-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства» и включают в себя инженерно-геологическое бурение скважин и испытания грунта, как основной метод, дающий наиболее полную информацию о физико-механических, прочностных и деформативных характеристиках грунтов. Другим способом исследования грунтов является метод пенетрации. Метод связан с вдавливанием в грунт зонда под действием статической или динамической нагрузки с одновременным измерением его свойств.

Помимо разрушающих методов в последнее время все чаще используют геофизические методы для оценки качественных и количественных характеристик грунтов, получения данных о литологическом строении тела насыпи и его основания, выявления деформаций и их локализации. Анализ возможностей геофизических методов посвящен **параграфу 1.4**.

Современные геофизические методы, в которых анализируются естественные или искусственные физические поля (сейсмические, акустические, магнит-

ные, электрические, электромагнитные, тепловые и др.), позволяют выявлять неоднородности и локальные включения в структуре геологической среды, определять их форму и физические свойства.

В последнее время при обследовании земляного полотна применяют достаточно проработанные и эффективные методы георадиолокации, сейсморазведки и электроразведки.

В параграфе 1.5 выполнено сравнение возможностей разрушающих и геофизических методов при диагностике объектов транспортной инфраструктуры.

Выполненный анализ существующих современных методов обследования позволил сделать выводы об эффективности того или иного метода при решении задач диагностики типовых объектов транспортной инфраструктуры и определить основной геофизический метод, позволяющий диагностировать широкий спектр объектов с получением необходимых параметров.

Ниже представлены обобщенные результаты анализа геофизических методов обследования различных типов объектов транспортной инфраструктуры (рисунок 2).

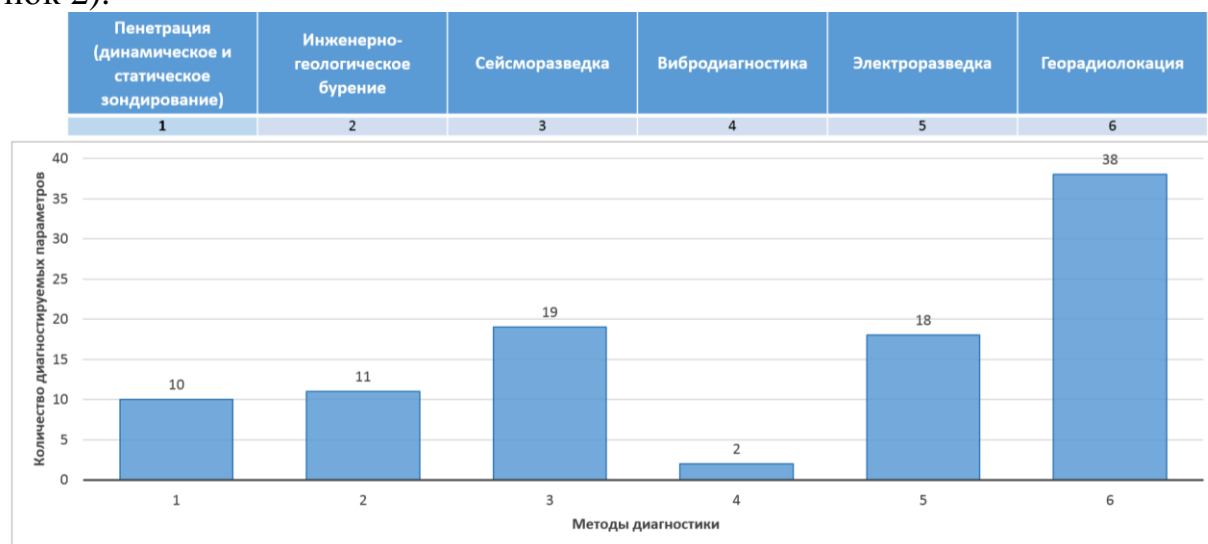


Рисунок 2 – Эффективность методов при обследовании объектов транспортной инфраструктуры

Анализ данных, приведенных на рисунке 2, позволяет заключить, что при обследовании железнодорожной инфраструктуры метод георадиолокации является наиболее универсальным.

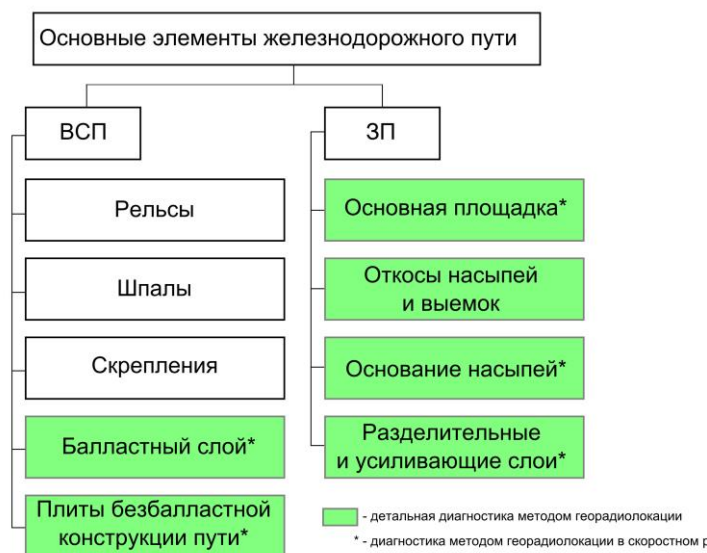
В параграфах 1.6–1.9 рассмотрены метод георадиолокации, область его применения, аппаратные и программные средства, используемые при проведении георадиолокационной диагностики. Исходя из выполненного анализа определена эффективная область применения метода георадиолокации на железнодорожном пути.

На рисунке 3 представлены основные элементы путевой инфраструктуры, которые можно диагностировать методом георадиолокации.

Из рисунка 3 видно, что метод георадиолокации позволяет осуществлять обследования верхнего и нижнего строения пути как при выполнении детальной диагностики, так и в скоростном режиме.

К основным задачам диагностики железнодорожного пути методом георадиолокации можно отнести:

- профилирование конструктивных слоев железнодорожного пути (балластный слой, разделительные и усиливающие слои, земляное полотно и его основание);
- обнаружение/локализация дефектов и зон деформаций конструктивных слоев (балластные корыта, ложа, мешки и т. п., ослабленные и переувлажненные зоны грунтов основной площадки земляного полотна);
- определение засоренности/загрязненности балластного слоя;
- позиционирование границы грунтовых вод;



приятными. Решение этой задачи базируется на создании теоретически обоснованных методик, алгоритмов и программ обработки первичной георадиолокационной информации.

Еще одна проблема связана с необходимостью выполнения большого количества заверочных измерений разрушающими методами, что на линейных протяженных объектах железных дорог является достаточно сложной и трудоемкой задачей.

В главе 2 выполнены исследования, направленные на установление корреляционных зависимостей электрических характеристик и параметров, позволяющих судить о состоянии балластного слоя и основной площадки земляного полотна, а также создание теоретических основ и метода количественной обработки информации, позволяющих уменьшить число заверочных измерений за счет тарировки георадиолокационной аппаратуры и повысить точности определения параметров деформаций.

В параграфах 2.1–2.2 в приближении плоских волн падающего электромагнитного излучения получены выражения для определения удельной проводимости среды по известным значениям показателя преломления и коэффициента ослабления, а также показателя преломления и диэлектрической проницаемости:

$$\sigma = \frac{2pn}{\mu_0 c}, \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{4n^2 \omega^2}{\mu_0^2 c^4} (n^2 - \varepsilon)}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость, n – показатель преломления, ε – диэлектрическая проницаемость среды, μ_0 – магнитная проницаемость среды, c – скорость света в вакууме, ω – средневзвешенная круговая частота георадиолокационного импульса, p – коэффициент ослабления электромагнитного излучения в первом конструктивном слое.

Необходимые для применения уравнений (1)–(2) значения показателя преломления и коэффициента ослабления связаны с амплитудами электромагнитных волн, отраженных от верхних границ первого (3) и второго (4) конструктивных слоев:

$$E_1 = E_0 e^{-2p_1 h_1} \frac{\sqrt{(n_1 - n_2)^2 + (\chi_1 - \chi_2)^2}}{\sqrt{(n_1 + n_2)^2 + (\chi_1 + \chi_2)^2}}, \quad (3)$$

$$E_2 = 4E_0 e^{-2p_1 h_1} \frac{\sqrt{(n_1^2 + \chi_1^2)(n_2^2 + \chi_2^2)}}{(n_1 + n_2)^2 + (\chi_1 + \chi_2)^2} e^{-2p_2 h_2} \frac{\sqrt{(n_2 - n_3)^2 + (\chi_2 - \chi_3)^2}}{\sqrt{(n_2 + n_3)^2 + (\chi_2 + \chi_3)^2}}, \quad (4)$$

где E_0 – амплитуда падающей электромагнитной волны, n_1 и n_2 – показатели преломления воздуха и первого конструктивного слоя, p_1 – коэффициент ослабления электромагнитного излучения в воздухе, $\chi = \frac{\varepsilon}{\omega} p$, n_3 и χ_3 характеризуют свойства третьего слоя.

В случае обследования конструкции, содержащей m слоев, последнее выражение может быть представлено в виде:

$$E_m = 4^{m-1} E_0 \left(\prod_{i=1}^m e^{-2p_i h_i} \right) \left(\prod_{i=2}^m \frac{\sqrt{(n_{i-1}^2 + \chi_{i-1}^2)(n_i^2 + \chi_i^2)}}{(n_{i-1} + n_i)^2 + (\chi_{i-1} + \chi_i)^2} \right) \sqrt{\frac{(n_m - n_{m+1})^2 + (\chi_m - \chi_{m+1})^2}{(n_m + n_{m+1})^2 + (\chi_m + \chi_{m+1})^2}}. \quad (5)$$

Решение систем уравнений вида (3)–(5) относительно показателей преломления подразумевает независимое определение коэффициентов ослабления и амплитуды E_0 , а также измерение напряженностей электрического поля в точках радарограммы, соответствующих границам слоев. Строгое решение таких систем уравнений подразумевает самосогласованную процедуру в случае, когда не известны значения толщин слоев.

В параграфах 2.3–2.4 выполнены исследования, направленные на уточнение приближения плоской волны. Предложена методика определения угловой расходимости георадиолокационного излучения антенного блока, базирующаяся на измерениях диаграммы направленности. Показано, что формирование импульсного георадиолокационного сигнала, отраженного границей конструктивного слоя, осуществляется при толщинах слоев, сравнимых с характерной длиной волны излучения; затухание сигнала связано с расходимостью электромагнитных волн в среде и ее электрофизическими свойствами, причем влияние первого фактора падает с ростом толщины конструктивного слоя. Показано, что при увеличении влажности материала конструктивного слоя показатель преломления увеличивается. В случае песчаных грунтов рост носит характер линейной зависимости с точностью порядка 10 %; зависимость коэффициента ослабления электромагнитного излучения при толщинах конструктивных слоев, достаточных для формирования отраженного сигнала, от влажности выражается линейным законом. Проведенные исследования показали, что угловую расходимость излучения антенного блока можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью аналогично описанию ослабления плоской волны электромагнитного излучения в веществе, что упрощает решение уравнения для расчета амплитуд георадиолокационного излучения, отраженного границами конструктивных слоев, и устанавливает точность решения задачи в 10–20 % вне зависимости от свойств материалов.

В параграфе 2.5 приведена методика тарировки георадиолокационной аппаратуры. Действия, предусмотренные методикой, проводятся один раз для определенного антенного блока. Это позволяет при георадиолокационных исследованиях связать амплитуды отраженных электромагнитных волн с электрофизическими параметрами (показателями преломления и коэффициентами ослабления) грунтовых слоев согласно выражениям (3)–(5) и, после их вычисления, определить проводимость согласно выражениям (1)–(2) и связанные с ней физические характеристики: засоренность балласта, плотность и влажность грунтов основной площадки земляного полотна.

В параграфе 2.6 изложена методика количественной обработки георадиолокационных данных. Получены выражения, связывающие величины показателей преломления слоев и амплитуды сигналов, отраженных их границами, с амплитудой отраженных сигналов в антенном блоке и коэффициентами ослабления электромагнитного излучения в конструктивных слоях.

Создана методика определения коэффициента ослабления электромагнитного излучения в конструктивном слое по форме трассы георадиолокационного обследования.

Получено выражение, связывающее коэффициент ослабления электромагнитного излучения в конструктивном слое известной переменной толщины с амплитудами волн, отраженными его нижней границей.

Параграфы 2.7–2.8 посвящены разработке методов, позволяющих выполнять дополнительный анализ при изучении поведения фазы трассы в области границ и средневзвешенной (пиковой) частоты трассы в конструктивных слоях.

В параграфе 2.9 сформулированы основные выводы главы, включающие выражения, связывающие электрические характеристики многослойных конструкций с данными георадиолокации и технологию тарирования георадиолокационной аппаратуры, позволяющую определять численные значения влажности грунта в процессе мониторинга.

На основании выводов сформулировано научное положение, выносимое на защиту.

Для расширения возможностей метода георадиолокации и перехода от получения качественных характеристик исследуемых объектов к количественным **в третьей главе** представлены разработанные алгоритмы и методики получения и обработки диагностической информации. Третья глава разбита на несколько блоков, в которых изложены алгоритмы и методики профилирования конструктивных слоев, определения засоренности балластного слоя, оценки состояния основной площадки земляного полотна, а также описаны разработанные технологии обследования железнодорожного пути и комплексирование метода георадиолокации с другими диагностическими методами.

В параграфе 3.1 приведены значения оптимальной частоты антенного блока для диагностики конструктивных слоев железнодорожного пути.

В параграфе 3.2 изложены разработанные методы оценки качества балластного слоя.

Для контроля толщины балластного слоя и классификации балластных углублений разработаны и апробированы методика и алгоритм профилирования нижней границы балластного слоя. Основным признаком, который чаще всего используют для автоматического профилирования слоев грунта, является локальное увеличение амплитуды отраженного сигнала в трассе. В случае решения задачи определения нижней границы балластного слоя применение этого признака позволяет в большинстве случаев надежно идентифицировать нижнюю границу балластного слоя при обработке георадиолокационной информации как в режиме постобработки, так и в режиме реального времени.

Алгоритм профилирования границ раздела слоев реализован в несколько шагов. На первом шаге определяется размер «окна» для поиска максимального значения напряженности электрического поля. На втором шаге происходит поиск максимального значения в каждой трассе в заданном окне. После определения максимальных значений выполняется их объединение в линию (границу). Заключительным шагом обработки является представление результатов обработки в виде продольного профиля с литологическим строением грунтов (рисунок 4).

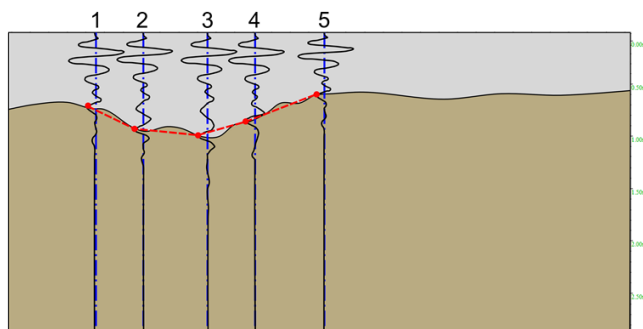


Рисунок 4 – Представление результатов обработки радарограмм

Выполненные на линии Туапсе – Адлер натурные исследова-

ния эффективности предложенной методики профилирования конструктив-

ных слоев показали, что детальная обработка радарограмм, полученных с использованием георадиолокационных антенных блоков с центральной частотой 1700 МГц, позволяет определить толщину балластного слоя с точностью до 0,05 м, что подтверждается прямыми заверочными методами. В случае многослойной структуры балластного слоя могут наблюдаться расхождения в интерпретации георадиолокационных данных. Так, из 42 измерений расхождение более 0,1 м выявлено в 5 %, в интервале 0,5–0,1 м – в 25 %, менее 0,05 м – в 70 % случаев.

Еще одним критерием качества балластного слоя можно считать его засоренность, которая влияет на нормальную работу балластного слоя и может приводить к повышенной динамике за счет нарушения диссипативных характеристик балласта, появлению выплесков и деформаций основной площадки земляного полотна за счет ее переувлажнения. Для георадиолокационного контроля засоренности балласта разработана методика, основанная на определении относительной отражательной способности:

$$\tilde{\Sigma}_m = \frac{\Sigma_m}{\Sigma_\infty} = \frac{\int_0^{t_m} |F(t)| dt}{\int_0^\infty |F(t)| dt}, \quad (6)$$

где Σ_m – отражательная способность балластного слоя, Σ_∞ – отражательная способность всех зарегистрированных слоев, $F(t)$ – георадиолокационная трасса.

На основании выполненных лабораторных исследований получены зависимости отражательной способности балластного слоя от его засоренности, высоты расположения измерительного оборудования над поверхностью балластного слоя и от влажности балластного материала. Для проведения измерений использованы антенные блоки георадаров с частотами излучения от 1000 до 1700 МГц.

Апробация указанной методики выполнена на шести контрольных однопутных участках линии Туапсе – Адлер (1907-й км, 1929, 1942, 1958 и 1968-й км) в весенний период. Сравнение прямых измерений и данных, полученных георадиолокационным методом, показало корреляцию с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,71$.

Другой подход к оценке засоренности балластного материала связан с оценкой амплитуды сигнала, отраженного от поверхности балластного слоя. Он позволяет не учитывать толщину балласта, что повышает точность определения засоренности, а также исключает влияние нижележащих слоев на формируемый сигнал.

Представим случай падения георадиолокационного излучения с амплитудой E_0 из воздушной среды на поверхность балласта. Тогда амплитуда отраженного сигнала (E) может быть оценена следующим выражением:

$$E = E_0 \sqrt{\frac{(n-1)^2 + \chi^2}{(n+1)^2 + \chi^2}}, \quad (7)$$

где n – показатель преломления, $\chi = nk = \frac{c}{\omega} p$, k – волновое число.

Если балластный слой имеет низкую влажность (естественную) и низкое содержание мелких фракций, тогда можно считать, что $\chi \ll n$. Необходимое для расчетов значение E_0 можно определить методом тарировки (глава 2, параграф 2.5). Тогда формулу (7) можно представить в виде:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{n-1}{n+1}. \quad (8)$$

Используя связь относительной диэлектрической проницаемости и показателя преломления из формулы (8), получим:

$$\varepsilon = \left(\frac{\frac{E}{E_0}}{1 + \frac{E}{E_0}} \right)^2. \quad (9)$$

Формула (9) была использована для определения значения засоренности балластного материала на натуральных участках действующего пути Приволжской и Северо-Кавказской железных дорог. Обследование выполнено георадаром рупорной конструкции излучателя с центральной частотой 400 МГц. Результаты расчетов, выполненных по формуле (9), приведены на рисунке 5. На этом же рисунке красной линией представлены результаты линейной интерполяции расчетных значений:

$$\varepsilon = 3,93 + 0,048 \cdot x, \quad (10)$$

где x – засоренность щебеночного балласта, выраженная в процентах. Коэффициент детерминации, соответствующий выражению (10), оказался равным $R^2 = 0,28$. Погрешность рассмотренных методик определения засоренности можно оценить величиной, не превышающей 10 %.

Применение данного метода позволяет повысить экономическую эффективность

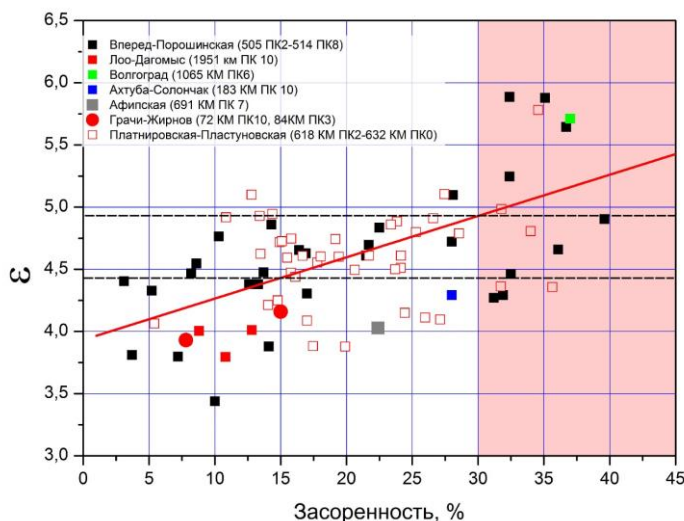


Рисунок 5 – Зависимость диэлектрической проницаемости, рассчитанной по формуле (10), от засоренности балластного материала

ремонтных работ за счет учета фактического состояния балластного материала. Приблизительно экономический эффект от применения разработанной методики можно оценить, опираясь на стоимость работы путевых машин по очистке балластного материала.

В качестве примера рассмотрены два участка Северо-Кавказской железной дороги, территориально расположенных на большом расстоянии друг от друга. Первый участок перегона: Вперед – Порошинская 505

км ПК2 – 514 км ПК8 протяженностью 9,6 км, и второй участок: Платнировская – Пластуновская 618 км ПК2 – 632 км ПК0 протяженностью 13,8 км. Представленные данные позволяют выделить участки пути, где засоренность балластного слоя не превышает значения 30 % и, следовательно, не требующие очистки. Такие участки продемонстрированы на рисунке 6, где также указана их протяженность, которая для перегона Вперед – Порошинская составила 6,5 км, а для перегона Платнировская – Пластуновская – 6,7 км. Учитывая стоимость очистки 1 км пути при глубине вырезки балласта 0,4 м и протяженности участков, не требующих очистки, в среднем по типам машин на участке Вперед – Порошинская –

5018 тыс. руб. и Платнировская – Пластуновская – 5172,4 тыс. руб. в ценах 2022 года, экономия средств составит соответственно 7289,8 тыс. руб. и 7514,1 тыс. руб. При сокращении участков, подлежащих очистке, также может быть сокращена продолжительность «окна» или их количество.

Вперед-I Юорошинская

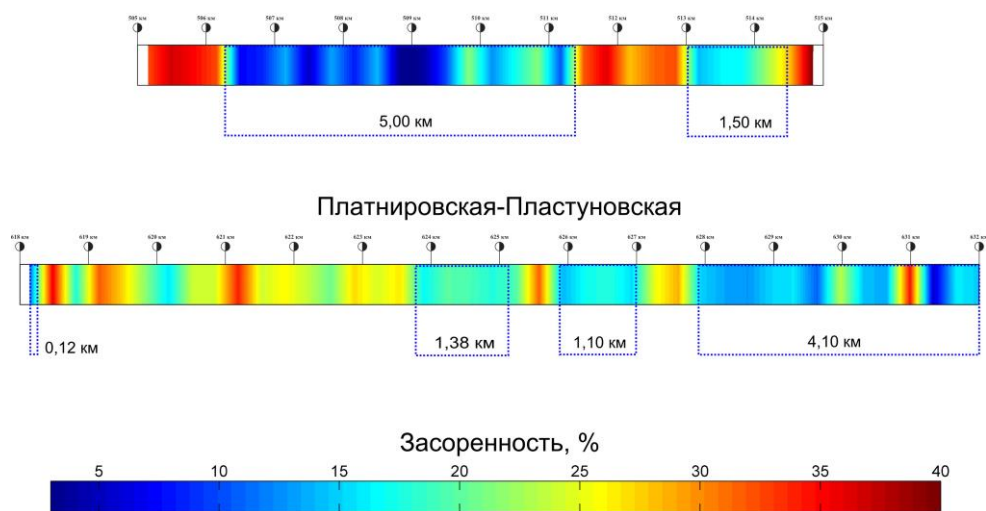


Рисунок 6 – Результаты определения засоренности балластного слоя

В параграфе 3.3 представлены методики и технологии определения параметров основной площадки земляного полотна железных дорог как при текущем содержании, так и при строительстве.

Рассмотрены амплитудные, частотные и фазовые изменения в радарограммах, которые соответствуют деформациям в теле земляного полотна, что позволило исследовать динамику границы основной площадки при развитии деформаций.

Получение диагностической информации о состоянии земляного полотна осуществляется комплексами, включающими геофизические методы и методы прямых измерений. В данной работе для оценки состояния эксплуатируемого земляного полотна в результате теоретических и экспериментальных исследований разработана георадиолокационная методика определения сезонного изменения электрофизических свойств грунтовых слоев, которую можно использовать без данных других геофизических методов или результатов прямых измерений. Методика базируется на получении и использовании системы уравнений для расчета электрофизических параметров: диэлектрической проницаемости, удельной проводимости и коэффициента ослабления электромагнитного излучения. Методика требует, чтобы расчет параметров выполнялся с использованием георадиолокационных данных, полученных в течение года при разных погодных условиях. В результате применения разработанных методик на практике можно повысить точность определения засоренности балластного материала, профилирования границы раздела балластной призмы и основной площадки земляного полотна.

Проведение регулярных георадиолокационных исследований и анализа сезонного влажностного режима земляного полотна позволяет снизить риски внезапного развития деформаций и снижения устойчивости железнодорожного пути. Оценка влажностного режима в работе реализована двумя способами. В первом – при обработке радарограмм анализируются амплитудные характеристики всей трассы, что позволяет сравнивать интегральные значения амплитуд в различные промежутки времени. Если предположить, что при эксплуатации свойства грун-

тов меняются незначительно, тогда изменения георадиолокационных характеристик можно связать с изменением влажностного режима. Второй способ предполагает послойный анализ обследованного грунта. В этом случае радарограмма делится по глубине на слои заданной толщины, в которых оценивается влажность грунта. Таким образом, применение методов георадиолокационного мониторинга позволяет оценить эффективность функционирования дренажных и водоотводных систем, а при детальном изучении сезонных изменений влажности грунтовых слоев помогает установить причины наблюдаемых расстройств пути и дает необходимую информацию по составу и объемам ремонтных работ.

В параграфе 3.4 рассмотрены возможности применения метода георадиолокации при определении плотности и влажности грунтов в ходе строительства и ремонта земляного полотна. С этой целью в работе выполнен комплекс полевых и лабораторных исследований, позволивший тарировать метод георадиолокации на определение указанных характеристик.

Первый подход к тарировке связан с установлением корреляции между плотностью и относительной диэлектрической проницаемостью, определяемой по экспериментальным радарограммам. В качестве примера на рисунке 7 приведена корреляционная зависимость, полученная при использовании песчано-гравийных смесей (ПГС) для строительства земляного полотна.

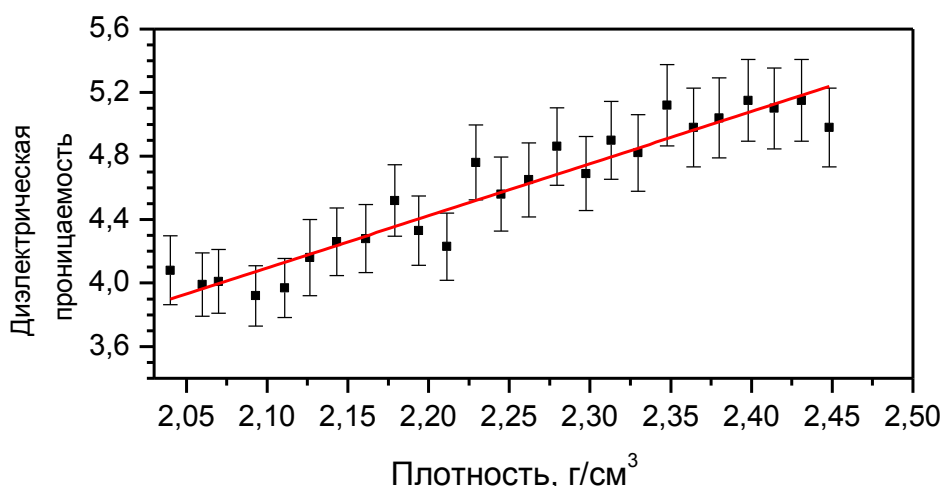


Рисунок 7 – Зависимость плотности грунта от диэлектрической проницаемости. Вертикальные отрезки использованы для отображения погрешности линейной аппроксимации и составляют 5 % величины плотности

Из данных рисунка 7 видно, что в процессе сооружения земляного полотна значение диэлектрической проницаемости выросло с 3,9 до 5,2. Красная линия представляет собой линейную аппроксимацию приведенных результатов. Видно, что линейная аппроксимация с точностью 5 % передает изучаемую зависимость.

Второй подход основывается на определении корреляции плотности и отражательной способности грунта. Для этого по георадиолокационным разрезам, полученным при различном уплотнении, определены значения отражательной способности:

$$\Sigma_{n,m,j} = \sum_{i=n}^m |F_j(r_i)|, \quad (11)$$

где $\Sigma_{n,m,j}$ – отражательная способность слоя в j -й точке разреза, рассчитанная

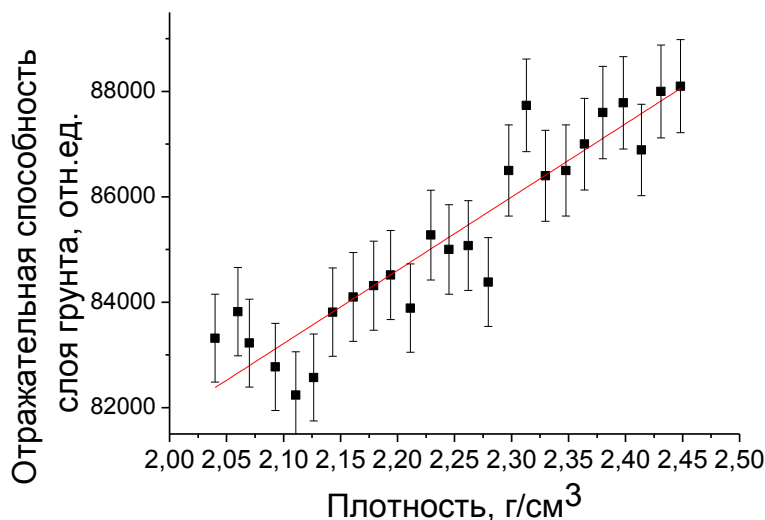


Рисунок 8 – Графики зависимости плотности от отражательной способности слоя грунта. Вертикальные отрезки использованы для отображения погрешности линейной аппроксимации и составляют 5 % величины плотности

между точками трассы с номерами n и m , соответствующими глубинам r_n и r_m .

Значения отражательной способности слоя толщиной 0,3 м использованы для построения графика, отражающего корреляцию плотности грунта и отражательной способности слоя в процессе строительства, который представлен на рисунке 8. Красная линия представляет собой линейную аппроксимацию приведенных результатов.

Рассмотренные выше подходы позво-

ляют определить изменение плотности грунта в процессе строительства земляного полотна по характеристикам, получаемым при обработке георадиолокационных разрезов. В данной работе для дальнейших исследований предпочтение отдано второму методу, выбор которого связан с удобством реализации численных процедур.

Применение второго метода продемонстрировано на примере уплотнения слоя ПГС толщиной 0,6 м. Слой условно разбит на шесть субслоев толщиной 0,1 м. При расчете отражательной способности субслоев учтена различная степень затухания электромагнитного излучения, отраженного субслоями, расположенными на разной глубине. Предположим, что при формировании слоя, подготовленного для дальнейшего уплотнения, плотности субслоев и их относительные отражательные способности одинаковы. Равенство отражательных способностей удастся обеспечить при увеличении отражательных способностей субслоев согласно формуле:

$$Z_j = 177801e^{-25 \cdot r_j} + 535, \quad (12)$$

где j нумерует слои, размещенные на глубине r_j .

Применение формулы (12) и использование привязанной ко второму слою шкалы плотности материала, полученной при пробном уплотнении, позволяют получить уплотнение на различной глубине (рис. 9).

На рисунке 9 не анализируется первый слой, и видно, что с ростом глубины плотность материала конструктивного слоя уменьшается.

Для изучения равномерности уплотнения грунта вдоль земляного полотна рассмотрен второй слой толщиной 0,1 м. Для каждого прохода катка рассчитана отражательная способность согласно формуле (10). Результаты расчета усреднены по 51 трассе и представлены на рисунке 10 для неуплотненного материала, а также после проходов катка 1, 8, 16, 24 раза.

Эти значения подвергнуты аппроксимации сплайнами. Соответствующие линии приведены на рисунке тем же цветом, что и расчетные значения. Сплошные горизонтальные линии отмечают средние значения отражательной способности для неуплотненного материала и после 24 проходов катка. Справа приведена шкала плотностей, повторяющая данные рисунка 9.

Действующие в России нормативные документы на строительство земляного полотна устанавливают вариацию значения влажности δ_w в пределах 10 % от оптимального значения, что приводит к уменьшению плотности при выполнении стандартной процедуры уплотнения на 1,5–2,5 %.

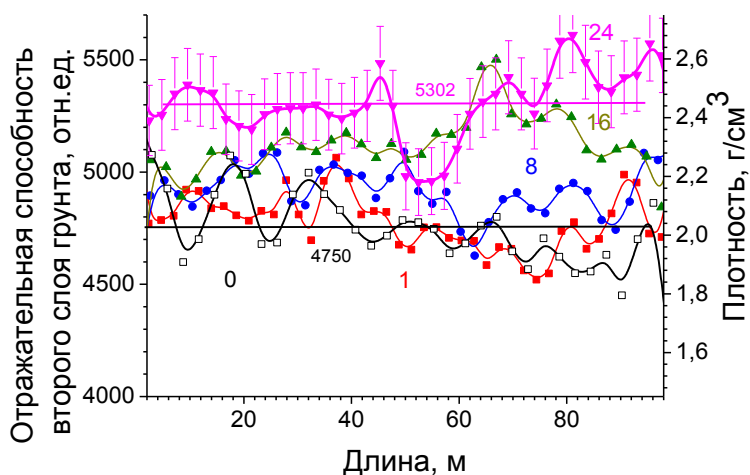


Рисунок 10 – Аппроксимация сплайнами отражательной способности второго слоя ПГС вдоль георадиолокационного разреза в зависимости от числа проходов катка. Приведены результаты для неуплотненного материала (□), а также после 1-го (■), 8-го (●), 16-го (▲) и 24-го (▼) прохода катка

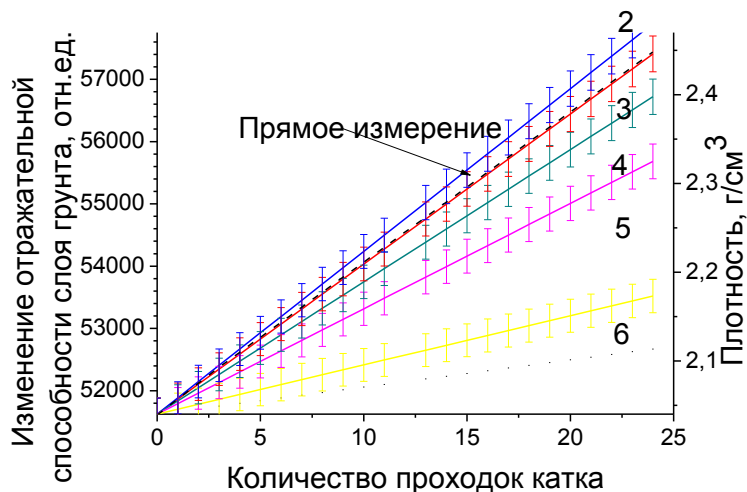


Рисунок 9 – Прямые линии, аппроксимирующие отражательную способность слоев ПГС, усредненную по всему профилю. Цифрами указаны номера слоев. Штриховой линией (---) приведена плотность, определенная по методу замещения объема. Вертикальными отрезками приведены погрешности 0,5 %

Использованная в данном исследовании ПГС содержит примерно $\omega = 32,2\%$ песочной фракции, что приводит к погрешности в определении относительной отражательной способности, рассчитанной по формуле $\delta_E = \omega \delta_w$ и равной 3 %. Соответствующие абсолютные погрешности приведены вертикальными отрезками для расчетов отражательной способности после 24 проходов катка.

Результаты расчетов, приведенные на рисунке 10,

позволяют отметить разницу в плотности слоев в зависимости от количества проходов катка.

На рисунке 10 видно, что в среднем разброс плотности составляет величину порядка 10 %. Кроме этого, наличие в подстилающем слое аномалии на отметке 57 м приводит к аномалии плотности, формирующейся уже на 8-м проходе (координата 60 м) и не исчезающей к 24-му проходу (координата 53 м). Это обстоятельство позволяет сформулировать требование к однородности подстилающих конструктивных слоев.

Известно, что при строительстве земляного полотна формирование конструктивных слоев насыпей ограничивается нормативными документами по толщине. В качестве примера можно привести пособие по технологии сооружения земляного полотна железных дорог (в развитие СНиП 3.06.02-86), где толщина отсыпки очередного конструктивного слоя варьируется в пределах 0,25–0,6 м в зависимости от типа грунтов и используемых строительных технологий. Это ограничение получено прямыми методами измерения уплотнения при оптимальной влажности. Аналогичные выводы можно сделать при анализе георадиолокационной информации. На рисунке 9 приведены локальные данные о результатах уплотнения ПГС при выполнении строительных работ. Видно, что грунт с увеличением толщины слоя уплотняется по глубине неравномерно. Уплотнение второго и третьего слоев, расположенных на глубине до 0,3 м, при 24 проходах катка увеличивается на 20 %, в то время как уплотнение пятого слоя, расположенного на глубине от 0,4 м до 0,5 м, увеличивается лишь на 10 %. При организации грунтовых слоев с большими толщинами достижение проектных значений коэффициента уплотнения может потребовать большего числа проходов виброкатка, что повлечет необоснованные материальные затраты. Кроме этого, формирование земляного полотна насыпей из конструктивных слоев, границы которых формируются грунтами разной плотности, может приводить к снижению устойчивости откосов. В связи с этим оптимальную толщину конструктивных слоев, подготовленных к уплотнению, необходимо определять для каждого типа грунта на этапе пробных уплотнений.

На рисунке 10 приведены значения плотности второго грунтового слоя толщиной 0,19 м на участке строительства длиной 100 м. Видно, что разброс плотности может составлять величину до 10 %. Немонотонное поведение значений плотности в процессе выполнения строительных работ должно учитываться в случае, когда однородность конструкции оговорена в технических условиях или проекте.

Таким образом, разработанная георадиолокационная методика позволяет оперативно оценить плотность грунтов земляного полотна в процессе строительства или реконструкции, как вдоль всего фронта проведения работ, так и по глубине.

Для контроля влажности грунтов, подготовленных к проведению работ по уплотнению при строительстве или ремонте земляного полотна железных дорог, разработана технология тарировки применяемого георадара. Проведение тарировки подразумевает определение амплитудной характеристики антенного блока E_0 и коэффициента ослабления p электромагнитного излучения из-за углового расхождения в воздухе. Эти параметры являются уникальными для используемого оборудования и определяются один раз. Для этого используется вариационный метод, в результате применения которого к теоретическому значению

амплитуды сигнала, отраженного от проводящей поверхности, удается достичь совпадения с экспериментом.

Например, для антенного блока АБ1700 МГц (заводской номер № 278), получены значения $p = 1,8 \text{ м}^{-1}$ и $E_0 = 35\,000$ отн. ед. Определение амплитудной характеристики и коэффициента затухания в воздухе позволяет связать относительный показатель преломления грунта и амплитуду волны, отраженной от верхней (формула (13)) и нижней границ грунтового слоя (формула (14)).

$$E_1 = 35\,000 e^{-2 \cdot 1,8 \cdot h_1} \frac{\sqrt{(n_2 - 1)^2 + (\chi_2)^2}}{\sqrt{(n_2 + 1)^2 + (\chi_2)^2}}, \quad (13)$$

$$E_2 = 35\,000 e^{-2 \cdot 1,8 \cdot h_1} \frac{4n_2}{(n_2 + 1)^2 + (\chi_2)^2} e^{-2p_2 h_2} \frac{\sqrt{(n_2 - n_3)^2 + (\chi_2 - \chi_3)^2}}{\sqrt{(n_2 + n_3)^2 + (\chi_2 + \chi_3)^2}}. \quad (14)$$

Сравнение рассчитанного значения модуля показателя преломления (13) с полученной заранее корреляционной зависимостью относительного показателя преломления используемого материала от влажности дает возможность определить влажность в режиме реального времени по амплитуде отраженного сигнала. Дополнительное применение формулы (14), определяющей амплитуду сигнала, отраженного нижней поверхностью, позволяет оценить однородность материала конструктивного слоя. Значения, полученные при расчетах с использованием формул (13)–(14), и результаты обработки георадиолокационной информации при исследованиях с мелким речным песком показаны на рисунках 11 и 12.

Видно, что экспериментальные значения величин согласуются с расчетом, с точностью 10 %.

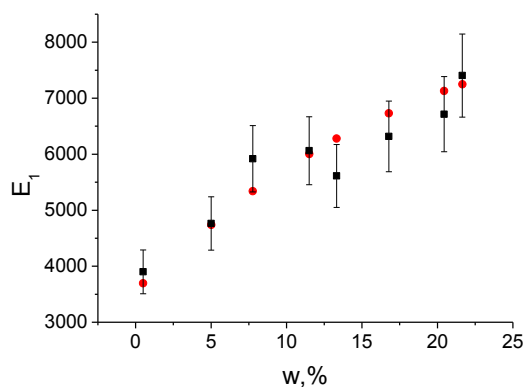


Рисунок 11 – Зависимость амплитуды отраженного верхней поверхностью речного песка, от влажности:

- – результаты обработки георадиолокационных данных, показаны 10 % погрешности величин;
- – результаты расчета по формуле (12)

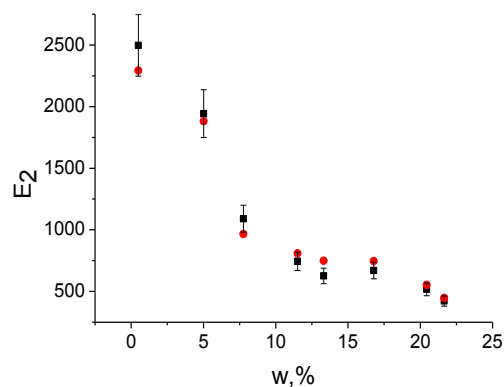


Рисунок 12 – Зависимость амплитуды отраженного нижней поверхностью речного песка, от влажности:

- – результаты обработки георадиолокационных данных, показаны 10 % погрешности величин;
- – результаты расчета по формуле (13)

Предложенные методы обработки георадиолокационной информации могут использоваться при создании технологии определения влажности и однородности материала конструктивного слоя, подготовленного к проведению работ по уплотнению при строительстве или ремонте земляного полотна железных.

В параграфе 3.5 приведены методики получения, обработки, интерпретации и пространственного воссоздания внутреннего строения бетонных и железобетонных конструкций на основании данных георадиолокации (рисунок 13).

Для оценки состояния бетонных элементов верхнего строения при безбалластной конструкции и его основания при обследовании железнодорожного пути в тоннелях разработан метод определения абсолютных показателей преломления конструктивных слоев и соответствующих коэффициентов ослабления в СВЧ-диапазоне 1200–1700 МГц, основанный на количественной обработке георадиолокационных данных. Полученные результаты использованы для уточнения размерных параметров слоев и определения объемной влажности бетонов, необходимых при планировании ремонтов и реконструкции.

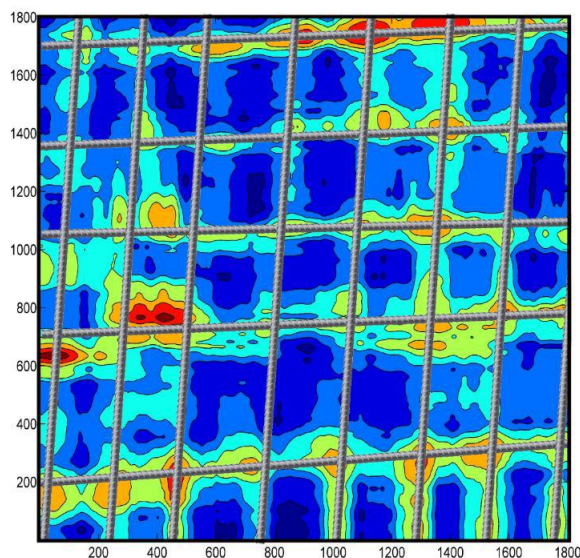


Рисунок 13 – Результаты восстановления арматурного каркаса

Созданные методики позволили разработать технологию георадиолокационной диагностики железнодорожного пути. **В параграфе 3.6** отражены основные этапы проведения георадиолокационной диагностики при текущем содержании, проектировании и проведении ремонтов железнодорожного пути, а также контроле качества их выполнения. В технологии регламентирована периодичность проведения георадиолокационной диагностики эксплуатируемых участков пути, определен выбор способа и режимов проведения георадиолокационной диагностики железнодорожного пути и сформулированы требования к количественному составу и квалификации персонала, обслуживающего георадиолокационную технику.

В случае, когда применение только одного диагностического метода не может обеспечить получение достаточной информации о состоянии объекта, необходимо использовать дополнительные диагностические методы. **В параграфе 3.7** рассмотрены вопросы комплексирования метода георадиолокации геофизическими методами и предложен оптимальный комплекс методов для решения различных диагностических задач.

В результате выполнения исследований в рамках третьей главы разработаны методики определения физических параметров конструктивных слоев железных дорог, базирующиеся на обработке георадиолокационных данных, позволяющие выполнить оценку состояния балластного слоя, земляного полотна, а также технология применения метода георадиолокации, в том числе и в комплексе с другими методами.

В четвертой главе решается задача автоматизации диагностики и мониторинга конструктивных слоев железнодорожного пути. Выполненные теоретические исследования, приведенные во второй главе и разработанные в третьей главе алгоритмы и методики позволили создать программно-аппаратный комплекс (ПАК) георадиолокационной диагностики железнодорожного пути для качественной и количественной обработки и мониторинга конструктивных слоев

железнодорожного пути. В четвертой главе рассмотрен разработанный ПАК георадиолокационной диагностики балластного слоя и основной площадки земляного полотна: его состав, возможности и результаты работы.

С начала 2000-х годов в РГУПС совместно с ООО «ЛОГИС» началась разработка оборудования, способного эффективно работать в условиях развитой железнодорожной инфраструктуры. Результатом такой работы стали рупорные конструкции антенных блоков, а также методики и рекомендации по применению метода георадиолокации при обследовании балластного слоя и земляного полотна железных дорог, в которых рекомендована оптимальная центральная частота излучения передающих антенных блоков и высота их подъема над поверхностью обследуемой среды, а также оптимальные настройки оборудования для получения качественной георадиолокационной информации.

Созданное оборудование позволило разработать ПАК георадиолокационной диагностики, позволяющий в автоматическом режиме получать и обрабатывать информацию о состоянии балластного слоя и основной площадки земляного полотна.

Основными особенностями работы ПАК, как обособленно (при установке комплекса на путевые тележки или иные подвижные единицы), так и в составе диагностических комплексов, являются:

- получение диагностической информации по обочинам и оси пути до глубины 6 м (при использовании антенных блоков, работающих на частоте 400 и 1700 МГц);
- автоматическая привязка полученной информации в глобальной и железнодорожной системах координат;
- дополнительная видеофиксация окружающей ситуации;
- автоматическая обработка георадиолокационной информации с определением засоренности и толщины балластного слоя (профилирование), позиционирование деформаций основной площадки земляного полотна;
- автоматическое формирование выходных форм отчетных документов.

В параграфе 4.1 изложены назначение и основные возможности программного комплекса георадиолокационной диагностики железнодорожного пути Geo_offline_x64.

Разработанный программный комплекс предназначен для обработки георадиолокационной информации в режимах камеральной обработки и реального времени и состоит из двух отдельных модулей – Geolib и CFReceiver. Такая архитектура программного комплекса позволяет организовать обработку информации как в составе мобильных диагностических комплексов, так и в составе иных комплексов и подвижных единиц. Функции библиотечного модуля Geolib.dll заключаются в следующем. Модуль принимает георадиолокационные данные в виде отдельных трасс, обрабатывает георадиолокационную информацию, привязывает результаты обработки к линейным координатам и формирует выходные графические и табличные формы документов. Программный модуль CFReceiver выполняет функцию совмещения форматов данных в случае использования данного программного комплекса с георадиолокационным оборудованием различных производителей.

В параграфе 4.2 отражена работа отдельных блоков программного обеспечения по получению, хранению и предварительной обработке георадиолокационной информации при профилировании конструктивных слоев и выявлении участков повышенной влажности.

При работе программы в режиме реального времени одновременно с обработкой осуществляется запись георадиолокационной информации для долговременного хранения и камеральной обработки исходных данных. Поскольку в специализированных вагонах и диагностических комплексах аппаратура ПАК размещается на подрессоренной части подвижного состава, при движении возникают колебания, которые приводят к смещению положения конструктивных слоев на радарограмме. Для решения этой проблемы разработан специальный алгоритм, устраняющий эффект колебания подвеса.

Управление выполнением программных процедур, реализующих перечисленные выше и другие преобразования георадиолокационных данных, осуществляется заданием значений параметров, собранных в специальном файле `geolib.ini`, который используется для предварительной настройки программного комплекса.

В разработанном программном комплексе реализованы процедуры автоматической интерпретации обработанной георадиолокационной информации, к которым относятся профилирование конструктивных слоев, обнаружение и классификация деформаций основной площадки земляного полотна, выявление участков повышенной влажности и участков, имеющих разделительные слои. Количественная интерпретация георадиолокационных данных включает определение степени засоренности балластного материала, оконтуривание балластных углублений и определение степени переувлажнения грунта основной площадки земляного полотна.

В параграфах 4.3 и 4.4 описаны способы привязки георадиолокационной информации к глобальным и локальным координатам с одновременной синхронизацией с видеопотоком. При обследовании железнодорожных линейных объектов с помощью разработанного ПАК привязка реализована разными способами. Наилучшее качество привязки получается при комбинированном использовании систем глобального позиционирования ГЛОНАСС/GPS и метода, базирующегося на использовании датчиков перемещения. При этом необходимо иметь предварительно подготовленную базу данных координат километровых и пикетных столбов и осей искусственных сооружений.

Для удобства реализации постобработки разработана процедура привязки георадиолокационной информации к видеопотоку. При этом происходит привязка трасс радарограммы к видеоряду, что позволяет визуально отслеживать внешние объекты и учитывать их помехи при интерпретации радарограмм. А в случае сбоев при позиционировании указанная процедура позволяет выполнить привязку полученной георадиолокационной информации к железнодорожному пикетажу.

В параграфе 4.5 представлены разработанные выходные формы, которые автоматически формируются и заполняются при георадиолокационной диагностике балластного слоя и основной площадки земляного полотна.

Форма ДФ-3.4 разбита на две части, в которые после обработки и интерпретации радарограмм автоматически вносятся данные о состоянии балластного слоя. В ведомости ДФ-3.4 (а) отображается загрязненность балластного материала, а в ведомости ДФ-3.4 (б) – толщина балластного слоя. В качестве граничных условий для внесения участков в ведомость толщины балласта обозначен интервал толщин от 0,35 до 0,60 м. Если зафиксированная глубина не входит в указанный интервал, этот участок вносится в ведомость. По параметру засоренности определены два интервала, соответствующие 30–50 % и более 50 % засоренно-

сти. Полученные значения засоренности, которые соответствуют этим критериям, вносятся в ведомость. Графическая форма ДФ-3.5 выражена в виде радарограммы, привязанной к железнодорожной системе координат с нанесенными на ней границами конструктивных слоев (рисунок 14). Ведомости ДФ-3.7 и ДФ-3.8 описывают характеристики основной площадки земляного полотна, а именно наличие и размеры балластных углублений (ДФ-3.7) и участки, имеющие увлажнения грунтов основной площадки земляного полотна (ДФ-3.8). Помимо указанных выше характеристик дополнительно формируются ведомости ДФ-3.10, где отражено наличие разделительного слоя и ведомость ДФ-4.1 с указанием толщины балласта на мостах (с ездой на балласте).

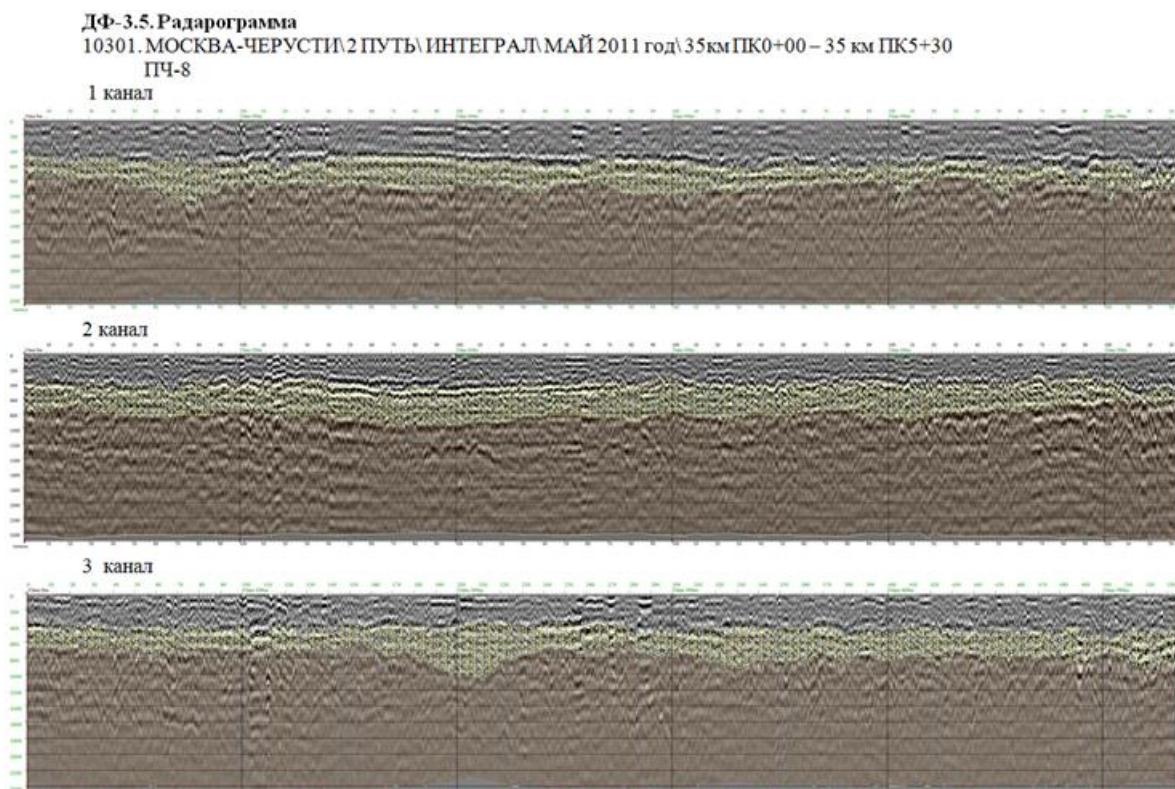


Рисунок 14 – Пример ведомости ДФ-3.5

Разработанные формы были утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 27 декабря 2012 г. № 2704р в составе Инструкции по применению скоростной георадиолокационной диагностики железнодорожного пути.

В параграфе 4.6 представлена разработанная георадиолокационная технология, используемая при контроле качества ремонта железнодорожного пути с применением программно-аппаратного комплекса. Использование такой технологии при контроле качества позволяет оценить характеристики отремонтированного балластного слоя вдоль всего объекта, где осуществлялись ремонтные работы и выделить те участки, где имеются отклонения от проектных значений толщины балластного слоя и засоренности балластного материала с формированием ведомости отклонений.

В пятой главе представлен опыт применения метода георадиолокации для оценки состояния объектов транспортной инфраструктуры. Рассмотрены результаты применения метода георадиолокации на локальных объектах, протяженных участках и в составе комплексного геофизического обследования.

В параграфе 5.1 проанализирован опыт использования георадаров при обследовании балластного слоя и основной площадки земляного полотна на протяженных участках железных дорог. В период с 2012 по 2015 г. обследовано более 700 км железнодорожного пути. Полученная информация о состоянии балластного слоя и основной площадки земляного полотна использована при проектировании ремонтов пути. Профилирование радарограмм выполнялось в автоматическом и полуавтоматическом режиме, выделялись участки, имеющие деформации основной площадки по обочинам и оси пути.

В параграфе 5.2 проанализирован опыт применения метода георадиолокации при обследовании основной площадки земляного полотна на локальных объектах. В разделе представлены примеры использования метода и разработанных методик, в том числе и при комплексировании с другими диагностическими методами. Результаты проведенных обследований использованы для геотехнических расчетов методами компьютерного моделирования, что позволяет проектировать ремонты пути и своевременно выполнять работы по восстановлению нормативного состояния.

В параграфе 5.3 рассмотрены случаи применения метода георадиолокации при обследовании железнодорожного пути в тоннелях. Метод показал себя эффективным в определении параметров балластного слоя и конструктивных элементов тоннелей. Так, в результате диагностики указанным методом удалось установить толщины балластного слоя по оси и обочинам пути. Эта информация с высокой точностью позволила оценить объемы щебеночного материала и определить отметки верха бетона обратного свода, что было в дальнейшем использовано для проектных решений.

В параграфе 5.4 проанализированы возможности метода при обследовании склонов, расположенных вблизи железнодорожного пути.

В работе рассмотрен пример комплексного обследования грунтов оползнеопасного склона. Натурное обследование методом георадиолокации на объекте выполнено в целях изучения литологического строения грунтов оползневого склона. В результате комплексного обследования была создана компьютерная модель (рисунок 15), которая позволила оценить устойчивость склона. Рассчитанный коэффициент устойчивости склона в естественном состоянии оказался меньше нормативного значения, следовательно, склон не устойчив и подлежит усилению.

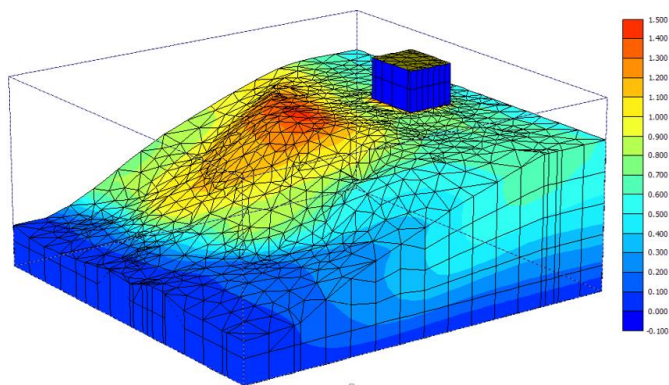


Рисунок 15 – Деформации грунтов склона при активизации оползневого процесса

Натурное применение методик показало эффективность метода георадиолокации при получении физических свойств исследуемых объектов.

Комплексные подходы при диагностике объектов инфраструктуры, представленные в главе 3 и примененные на практике в главе 5, позволяют получить более подробную информацию о состоянии объекта, используемую в дальнейшем для математического моделирования напряженно-деформированного состояния объектов земляного полотна, что позволяет оценивать устойчивость и

надежность конструкций на всех этапах жизненного цикла и прогнозировать наступление отказов пути и его элементов.

Разработанные методики, технологии и натурная апробация позволили выработать ряд критериев качества балластного слоя и основной площадки земляного полотна при георадиолокационной диагностике железнодорожного пути, которые приведены *в параграфе 5.5*. Указанные критерии относятся к засоренности и толщине балластного слоя, параметрам прямолинейности основной площадки и однородности земляного полотна и определены численными значениями.

В **Заключении** приведены основные выводы, сформулированные в работе.

1. Анализ мирового опыта в области диагностики и мониторинга позволил заключить, что при обследовании железнодорожной инфраструктуры метод георадиолокации является наиболее универсальным. Из 40 рассмотренных диагностических задач, применение метода георадиолокации позволяет решить 38.

2. Для разработки методик определения толщины и состояния балластного слоя, защитных слоев и земляного полотна в приближении нормального падения плоских электромагнитных волн получены выражения, связывающие:

- показатели преломления материалов с амплитудами волн, отраженными границами слоев;

- удельные проводимости материалов с показателями преломления и коэффициентами ослабления электромагнитных волн.

3. Предложен метод, позволяющий повысить точность профилирования нижней границы балластной призмы при мониторинге участка железнодорожного пути за счет непрерывного определения диэлектрической проницаемости балластного материала.

4. Для учета особенностей проведения георадиолокационной диагностики балластного слоя и основной площадки земляного полотна в скоростном режиме предложена методика учета угловой расходимости излучения антенного блока, что позволило рассчитать амплитуды георадиолокационного излучения, отраженные границами конструктивных слоев с точностью 10-20% для практически значимого расположения измерительной аппаратуры в диагностических комплексах.

5. Разработанная георадиолокационная методика по определению толщины балластного слоя позволяет с использованием георадиолокационных антенных блоков с центральной частотой 1700 МГц получить точность позиционирования границы слоя не хуже 0,05 м, что соответствует разрешающей способности оборудования и подтверждено прямыми измерениями.

6. Экспериментально установлено, что при определении характеристик балластного слоя и земляного полотна, методики, основанные на анализе затухания волнового пакета, будут более информативны, чем методики, основанные на определении изменения его частотного спектра.

7. При определении засоренности балластного слоя, влажность щебня влияет на отражательную способность среды на порядок сильнее, чем внесение сухих засорителей такой же массы. Разработанный метод определения засоренности балластного материала по величине отраженного от его поверхности сигнала георадара снижает влияние влажности исследуемого слоя на результаты измерений и позволяет определить засоренность с абсолютной погрешностью (Δ), не превышающей 9,7% засоренности.

8. При использовании технологии оценки засоренности балластного материала методом георадиолокации при планировании ремонтов может достигаться экономический эффект свыше 60 % от стоимости работ по очистке балластного материала.

9. Системные наблюдения за земляным полотном с применением метода георадиолокации позволяют контролировать рост абсолютных осадков и скорость их развития для планирования и своевременного проведения комплекса мероприятий по снижению риска появления внезапных деформаций.

10. Применение методов георадиолокационного мониторинга позволяет оценить эффективность функционирования дренажных и водоотводных систем, а при детальном изучении сезонных изменений влажности грунтовых слоев может помочь установить причины наблюдаемых расстройств пути и дать необходимую информацию по составу и объемам ремонтных работ.

11. Разработаны методы определения плотности грунта земляного полотна по изменению диэлектрической проницаемости и амплитуды отраженного сигнала с относительной погрешностью определения этого параметра не более 2%, а абсолютной – 0,04 г/см³.

12. Применение метода георадиолокации позволяет оценить равномерность плотности грунта вдоль обследуемого участка в различных слоях по глубине, выявлять участки локальных разуплотнений, качественно и количественно оценивать степень уплотнения грунта в комплексе с методами, установленными нормативными документами.

13. Разработаны методы обработки георадиолокационной информации, используемые для определения влажности грунтового материала, подготовленного к уплотнению при ремонте и строительстве земляного полотна железных дорог со средней величиной абсолютной погрешности 1,5%.

14. Разработана методика, позволяющая определить численные значения влажности грунта в процессе мониторинга, что может являться основой для создания подходов по определению оптимальных межпоездных интервалов с целью обеспечения релаксации грунтов с учетом их влажности.

15. Разработана технология, позволяющая восстановить на плоскости положение армирующих элементов в железобетоне, в том числе в безбалластных конструкциях пути.

16. Разработанные методики и алгоритмы нашли свое отражение в утвержденных нормативных документах по обследованию элементов железнодорожной инфраструктуры, в том числе и в скоростном режиме.

17. Разработаны технологии георадиолокационного обследования железнодорожного пути и комплексирования метода георадиолокации с другими диагностическими методами.

18. Разработан многоцелевой многоканальный диагностический программно-аппаратный комплекс для контроля параметров балластного слоя и основной площадки земляного полотна железнодорожного пути с автоматической обработкой и интерпретацией полученных данных. Комплекс совместим с георадиолокационной аппаратурой различных (отечественных и зарубежных) производителей и внедрен в практику работы диагностических комплексов «Интеграл» и «Декарт».

19. Для планирования ремонтных работ по фактическому состоянию пути выработаны критерии качества балластного слоя и земляного полотна при георадиолокационной диагностике железнодорожного пути.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

1. Расширение возможностей современных диагностических комплексов разработанными алгоритмами и методиками, связанными с автоматическим получением количественных данных о состоянии балластного слоя и земляного полотна при скоростном георадиолокационном обследовании.

2. Внедрение методик по оценке плотности и влажности грунта при строительстве земляного полотна и контроле качества его ремонтов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. **Шаповалов, В. Л.** Оценка равномерности уплотнения грунтов земляного полотна при строительстве методом георадиолокации / В. Л. Шаповалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 157–170.

2. **Шаповалов, В. Л.** Применение метода георадиолокации при обследовании тоннелей / В. Л. Шаповалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 132–143.

3. Каспржицкий, А. С. Динамические характеристики и устойчивость земляного полотна в условиях тяжеловесного движения / А. С. Каспржицкий, Г. И. Лазоренко, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, А. В. Морозов, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2(74). – С. 104–123.

4. **Шаповалов, В. Л.** Георадиолокационный метод диагностики грунтов при строительстве земляного полотна / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, А. А. Васильченко, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4(72). – С. 120–127.

5. **Шаповалов, В. Л.** Подходы к определению плотности грунтов земляного полотна георадиолокационным методом при его строительстве / В. Л. Шаповалов, В. А. Явна, М. В. Окост, З. Б. Хакиев, А. В. Морозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 100–110.

6. **Шаповалов, В. Л.** Контроль плотности грунтов земляного полотна методом георадиолокации / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, В. А. Явна, А. В. Морозов, А. А. Васильченко // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 7–13.

7. **Шаповалов, В. Л.** Инженерные решения по повышению устойчивости верхнего строения железнодорожного пути / В. Л. Шаповалов, В. А. Явна, К. М. Ермолов, А. А. Кругликов, М. В. Окост, З. Б. Хакиев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4(68). – С. 119–135.

8. Явна, В.А. Определение засоренности балластного материала железнодорожного пути методом георадиолокации / В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, А. В. Морозов, К. М. Ермолов // Инженерные изыскания. – 2015. – № 10–11. – С. 60–65.

9. **Шаповалов, В. Л.** Оптимизация ремонтов пути с глубокой очисткой балласта / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, К. М. Ермолов, В. А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 25–30.

10. Явна, В. А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты железнодорожной инфраструктуры / В. А. Явна, А. А. Кругликов, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, А. В. Морозов // Вестник Института

проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2014. – № 2(26). – С. 33–35.

11. Кругликов, А. А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на высокие насыпи / А. А. Кругликов, Г. И. Лазоренко, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов**, А. В. Морозов, В. А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 19–23.

12. Явна, В. А. Этапы проектирования интеллектуальной системы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры / В. А. Явна, А. С. Каспржицкий, А. А. Кругликов, Г. И. Лазоренко, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов** // Управление большими системами: сборник трудов. – 2012. – № 38. – С. 105–120.

13. Кругликов, А. А. Диагностика объектов транспортной инфраструктуры методом георадиолокации / А. А. Кругликов, К. Ю. Кислица, **В. Л. Шаповалов**, А. В. Морозов, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 4(44). – С. 148–154.

14. Воробьев, В. Б. Диагностика балластного слоя георадиолокационным методом / В. Б. Воробьев, В. И. Колесников, А. В. Морозов, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 8. – С. 2–8.

15. Морозов, А. В. Количественная обработка георадиолокационных данных / А. В. Морозов, А. А. Кругликов, К. Ю. Кислица, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3(43). – С. 98–107.

16. Колесников, В. И. Георадиолокационные признаки областей с аномальными физическими свойствами / В. И. Колесников, В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, З. Б. Хакиев, В. В. Ковдус // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2005. – № 3. – С. 124–128.

17. Грицык, В. И. Георадиолокационная диагностика на железнодорожном пути / В. И. Грицык, В. В. Ковдус, М. В. Окост, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 10. – С. 32.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

18. **Shapovalov, V.** GPR method for continuous monitoring of compaction during the construction of railways subgrade / Shapovalov, V., Vasilchenko, A., Yavna, V., Kochur, A. // Journal of Applied Geophysics, 2022, 199, 104608.

19. **Shapovalov, V.** Application of GPR for determining electrophysical properties of structural layers and materials / V. Shapovalov, V. Yavna, A. Kochur, Z. Khakiev, S. Sulavko, Ph. Daniel, A. Kruglikov // Journal of Applied Geophysics 172 (2020) 103913.

20. **Shapovalov, V. L.** GPR calibration for determining the electrophysical properties of soil structural layers [Тарировка георадаров для определения электрофизических свойств грунтовых конструктивных слоев] / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, A. A. Vasilchenko, M. V. Okost, V. A. Yavna // Engineering and Mining Geophysics. – 2020.

21. **Shapovalov, V. L.** GPR method for studying the drainage properties of sand layers [Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев] / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, A. A. Vasilchenko, M. V. Okost, V. A. Yavna // Engineering and Mining Geophysics. – 2020.

22. **Shapovalov, V. L.** GPR-based moisture content determination in the ground construction layers during the construction of subgrades / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. A. Vasilchenko, V. A. Yavna // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics-2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 124–130.

23. **Shapovalov, V. L.** GPR evaluation of homogeneity of soil properties in linear objects / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, V. A. Yavna, A. A. Vasilchenko // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics – 2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 582–592.

24. Khakiev, Z. B. GPR tracing of engineering communications / Z. B. Khakiev, **V. L. Shapovalov**, V. A. Yavna, K. M. Ermolov // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 116–123.

25. Khakiev, Z. Application of GPR for mapping of underground utilities : A review / Z. Khakiev, G. Lazorenko, **V. Shapovalov**, V. Yavna // 15th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics – 2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 610–620.

26. Khakiev, Z. B. Methods for estimating the damping of an electromagnetic wave from the GPR data / Z. B. Khakiev, **V. L. Shapovalov**, V. A. Yavna, M. V. Okost, A. A. Kruglikov // Engineering and Mining Geophysics – 2018 : 14th Conference and Exhibition. – 14. – 2018.

27. **Shapovalov, V. L.** GPR method for determining the density of soils during the construction of a roadbed / V. L. Shapovalov, Z. B. Khakiev, V. A. Yavna, A. V. Morozov // Engineering and Mining Geophysics – 2018 : 14th Conference and Exhibition. – 14. – 2018.

28. Yavna, V. A. GPR survey of structural layers of a road tunnel carriageway / V. A. Yavna, K. M. Ermolov, **V. L. Shapovalov**, M. V. Okost, A. V. Morozov // Engineering Geophysics – 2017. – 13. – 2017.

29. Yavna, V. A. GPR monitoring of the process of strengthening the railway track ballast with a polymer binder / V. A. Yavna, A. A. Kruglikov, Y. M. Ermolov, **V. L. Shapovalov** // Engineering Geophysics – 2017. – 13. – 2017.

30. **Shapovalov, V. L.** The amplitude-frequency analysis of radarograms at layer-by-layer scanning of subsurface spaces / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. V. Morozov // 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics – 2016. – 2016. – P. 211–218.

31. Kruglikov, A. A. Study of the application of binders on the railway ballast in the organization of the route section with variable rigidity / A. A. Kruglikov, Y. M. Ermolov, **V. L. Shapovalov**, V. A. Yavna // 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics. – 2016. – P. 497–507.

32. Khakiev, Z. B. Restoration of the spatial structure of engineering objects by GPR / Z. B. Khakiev, **V. L. Shapovalov**, A. N. Sukhomlinov, A. A. Agapov // Geophysics-2015 : 11th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics 11. – 2015. – C. 42DUMMY.

33. Yavna, V. A. Application of microwave methods for the determination of ballast material clogging / V. A. Yavna, **V. L. Shapovalov**, A. V. Morozov, K. M. Ermolov // Geophysics-2015 : 11th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics – 11. – 2015. – P. 33DUMMY.

34. Khakiev, Z. Investigation of long term moisture changes in trackbeds using GPR / Z. Khakiev, **V. Shapovalov**, A. Kruglikov, A. Morozov, V. Yavna // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – T. 110. – C. 1–4.

35. **Shapovalov, V. L.** GPR method for determining the physical parameters of the construction layers of roads and railways / V. Shapovalov, V. Vostrov, A. Kasprzhitsky, V. Yavna // Geophysics-2013 : 9th EAGE International Scientific and

Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics. – 9. – 2013

36. Khakiev, Z. GPR determination of physical parameters of railway structural layers / Z. Khakiev, **V. Shapovalov**, A. Kruglikov, V. Yavna // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – Т. 106. – С. 139–145.

37. Khakiev, Z. B. GPR method for determining the electrical properties of soils / Z. B. Khakiev, A. V. Morozov, **V. L. Shapovalov**, V. A. Yavna // Near Surface Geoscience. – 2012.

Патенты и свидетельства:

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665157, 21.09.2021. «Программа для контроля уплотнения грунтов при строительстве земляного полотна по данным георадиолокационного обследования».

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666996, 18.12.2020. «Программа обработки георадиолокационного разреза увлажненного конструкционного слоя из дренирующих грунтов».

40. Патент на полезную модель № RU 2013134273, 13.01.2014, «Комплекс автоматизированного контроля положения контактного провода СВЧ-методом».

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2012618628, 21.09.2012, «Многоканальное профилирование конструктивных слоев автомобильных и железных дорог в режиме реального времени».

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2011613071, 18.04.2011, «Скоростная георадиолокационная диагностика земляного полотна».

43. Патент на полезную модель № RU88152U1, 08.06.2009, «Программно-технический комплекс для определения загрязненности балластного слоя железнодорожного пути».

44. Патент на изобретение № RU 395638C1, 21.05.2009, «Способ определения загрязнённости балластного слоя железнодорожного пути».

Публикация материалов национальных конференций и конференций с международным участием:

45. **Шаповалов, В.Л.** Оценка качества возведения земляного полотна на обходе краснодарского железнодорожного узла / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, К. М. Ермолов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 208–211.

46. **Шаповалов, В. Л.** Использование георадиолокационной информации для обоснования объемов ремонтов балластного слоя и земляного полотна / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : труды XIV Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г. М. Шахунянца. – Москва, 2017. – С. 214–216.

47. **Шаповалов, В.Л.** Применение георадиолокационной информации при проектировании ремонтов балластного слоя и земляного полотна / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, А. В. Морозов, Я. М. Ермолов // Современное развитие науки и техники : сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 186–188.

48. Морозов, А. А. Обзор методик наблюдения за деформациями при инструментальном обследовании зданий и сооружений / А. А. Морозов, Л. А. Грибова, **В. Л. Шаповалов** // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. – 2016. – № 8. – С. 64–74.

49. **Шаповалов, В. Л.** Опыт применения наземного лазерного сканирования на железных дорогах / В. Л. Шаповалов // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» : в 4 ч. – Ростов-на-Дону, 2014. – С. 213–214.

50. Явна, В. А. Инженерная защита земляного полотна железных дорог в прибрежных и горных районах / В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, Г. И. Лазоренко, З. В. Холодный // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2013. – № 3. – С. 37–45.

51. Кругликов, А. А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты транспортной инфраструктуры / А. А. Кругликов, В. А. Явна, А. С. Каспржицкий, Г. И. Лазоренко, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, А. В. Морозов // Интеллектуальные системы на транспорте : сборник материалов Третьей международной научно-практической конференции / редактор А. А. Корниенко. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 266–270.

52. Кругликов, А. А. Мониторинг объектов железнодорожной инфраструктуры методом упругих волн / А. А. Кругликов, **В. Л. Шаповалов**, А. В. Морозов // Транспорт-2013 : труды Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2013. – С. 29–31.

53. Востров, В. А. Георадиолокационный метод определения физических параметров конструктивных слоев автомобильных и железных дорог / В. А. Востров, **В. Л. Шаповалов**, А. С. Каспржицкий, В. А. Явна // Инженерная геофизика – 2013 : материалы 9-й Международной конференции и выставки. – Москва, 2013.

54. Явна, В. А. Определение физических параметров конструктивных слоев автомобильных и железных дорог георадиолокационным методом / В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, А. В. Морозов // Транспорт-2013 : труды Международной научно-практической конференции / ФГБОУ ВПО РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2013. – С. 71–73.

55. Явна, В. А. Обработка георадиолокационных данных в режиме реального времени / В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, Г. И. Лазоренко, В. А. Востров // Инженерная геофизика – 2012 : тезисы конференции. – Москва, 2012.

56. **Шаповалов, В. Л.** Обработка георадиолокационных данных в режиме реального времени / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, Г. И. Лазоренко, В. А. Явна // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : сборник трудов конференции. – Москва, 2012. – С. 87–89.

57. Явна, В. А. Автоматизированная обработка георадиолокационных данных / В. А. Явна, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост, Г. И. Лазоренко, В. А. Востров // Транспорт-2012 : труды Всероссийской научно-практической конференции : в 3 ч. – Ростов-на-Дону : РГУПС. 2012. – С. 226–228.

58. Явна, В. А. Компьютерное моделирование процессов взаимодействия подвижного состава и объектов путевой инфраструктуры / В. А. Явна, А. С. Каспржицкий, А. А. Кругликов, Г. И. Лазоренко, И. В. Мартынюк, О. Н. Попов, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов** // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ 12) : труды Третьей российской конференции с международным участием. – Москва, 2012.

59. Каспржицкий, А. С. Исследование процессов взаимодействия подвижного состава и объектов инженерной инфраструктуры / А. С. Каспржицкий, А. А. Кругликов, Г. И. Лазоренко, З. Б. Хакиев, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Интеллектуальные системы на транспорте. ИнтеллектТранс-2012 : сборник материалов II Международной научно-практической конференции / Федеральное агентство железнодорожного транспорта ; ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» ; редактор А. А. Корниенко. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 337–346.

60. Кругликов, А. А. Особенности взаимодействия упругих волн с грунтами земляного полотна с учетом сезонных погодных условий / А. А. Кругликов, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – Москва, 2012. – С. 90–94.

61. Кругликов, А. А. Комплекс геофизических методов для оценки технического состояния железнодорожной инфраструктуры / А. А. Кругликов, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост // Транспорт-2011 : труды Всероссийской научно-практической конференции : в 3 ч. / редактор А. Н. Гуда ; Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Южный научный центр РАН, Российский национальный комитет по трибологии, Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская академия транспорта. – Ростов-на-Дону, 2011. – С. 233–235.

62. Кругликов, А. А. Вибродинамическая диагностика пути, как метод функциональной диагностики / А. А. Кругликов, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Транспорт-2010 : труды Всероссийской научно-практической конференции : в 3 ч. / Министерство транспорта РФ, Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Южный научный центр РАН, Российский национальный комитет по трибологии, Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская академия транспорта. – Ростов-на-Дону, 2010. – С. 146–148.

63. Грицык, В. И. Математическая формализация задачи интерпретаций георадиолокационного обследования объектов железнодорожного пути / В. И. Грицык, В. Б. Воробьев, В. И. Колесников, М. В. Окост, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Современные проблемы путевого комплекса, повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований : труды Международной научно-технической конференции. – Москва, 2004. – С. 43–44.

64. Морозов, А. В. Георадиолокационный способ определения электрофизических свойств грунтов / А. В. Морозов, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна // Инженерная геофизика – 2012 : тезисы конференции. – Москва, 2012.

65. Грицык, В. И. Проведение измерений и интерпретация георадиолокационной съемки земляного полотна с выдачей рекомендаций для проектов его усиления / В. И. Грицык, В. В. Ковдус, М. В. Окост, **В. Л. Шаповалов**, В. А. Явна. – Ростов-на-Дону, 2004.

66. Грицык, В. И. Диагностирование путевой структуры / В. И. Грицык, М. В. Окост, **В. Л. Шаповалов** // Актуальные проблемы развития транспорта России: стратегические, региональные, технические : труды Международной научной конференции, посвященной 75-летию РГУПС / МПС РФ, РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2004. – С. 258–259.

67. Грицык, В. И. Оценка состояния подбалластной зоны методом георадиолокации / В. И. Грицык, **В. Л. Шаповалов**, М. В. Окост // Транспорт-2004 :

труды Всероссийской научно-практической конференции : в 3 ч. / редактор А. Н. Гуда ; Министерство путей сообщения РФ, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский национальный комитет по трибологии, Российская академия транспорта. – Ростов-на-Дону, 2004. – С. 180.

Соответствие основных результатов работы паспорту специальности

Положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 2.9.2 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог, в части пунктов:

3. Закономерности изменения технического состояния пути и его элементов. Диагностика железнодорожного пути. Критерии оценки его технического состояния. Мониторинг состояния пути. Аппаратура и системы контроля.

5. Методы исследования, испытаний и моделирования железнодорожного пути и процессов его взаимодействия с подвижным составом.

11. Методы и средства изысканий и проектирования железных дорог. Оценка проектных решений по комплексному и частным критериям эффективности.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве

Теоретические результаты автор получил совместно с научным консультантом. Результаты лабораторных и натурных экспериментов получены совместно с соавторами публикаций.

В перечисленных ниже работах автору принадлежат следующие результаты: в работах [1, 4, 5] автор осуществил планирование эксперимента по проведению натурных измерений при строительстве земляного полотна, выполнил обработку и анализ георадиолокационной информации и получил зависимости диэлектрической проницаемости и отражательной способности от плотности для песчано-гравийной смеси, используемой в процессе строительства. В работах [8, 41, 56, 57] автор принимал участие в проведении лабораторных и полевых исследований методом георадиолокации и прямыми методами на действующих участках Северо-Кавказской и Приволжской железных дорог; автором выполнены анализ и систематизация полученных данных, а также получены зависимости, связывающие амплитудные характеристики сигналов, сформированных в балласте, с его засоренностью. Дополнительно в работе [6] автор оценил экономию средств при использовании георадиолокационной методики определения засоренности балласта. В работе [15] автором выполнены лабораторные исследования песчаного грунта методом георадиолокации и последующая предварительная обработка полученных данных для дальнейшего выявления зависимостей электрических характеристик грунтов от влажности. В работе [9] автор принимал участие в натурных экспериментах в железнодорожном тоннеле и далее в специализированных программах обрабатывал полученную информацию, результаты которой позволили получить связи амплитудных, частотных и фазовых характеристик радарограмм со свойствами исследованных конструкций. В работах [11, 13, 14, 39, 40, 42] автор участвовал в разработке алгоритмов автоматической обработки георадиолокационной информации. В работах [14, 35] автор проанализировал и систематизировал методики, используемые при обследовании элементов конструкций тоннеля. В работах [2, 10, 7, 26, 43, 47-52, 58, 59, 66] выполнял анализ литературы в области статических и динамических воздействий на объекты земляного полотна, в том числе и при тяжеловесном движении, и методов, используемых при оценке состояния грунтовых объектов, принимал участие в исследованиях, связанных с изучением вибрационного воздействия на

земляное полотно железных дорог. В работе [3, 21] автором выполнено георадиолокационное обследование омоноличенной балластной призмы и оценена глубина проникновения вяжущего материала вглубь балластной призмы. В работах [12, 44, 55, 60, 63] автор принимал участие в георадиолокационной диагностике земляного полотна железных дорог и последующей обработке полученных данных. В работах [16-20, 22-25, 27, 29 31, 32, 34, 35, 37, 54, 61, 62, 67] автор на основании лабораторных и полевых исследований получил зависимости электрофизических характеристик от свойств исследуемых грунтов как в однослойных, так и в многослойных средах. В работе [36, 64, 65] автор принимал участие в разработке алгоритмов и частей программ для автоматической обработки георадиолокационной информации при скоростной диагностике. В работах [30, 33, 45, 46] автором выполнен анализ методов, используемых при обследовании объектов транспортной инфраструктуры.

Шаповалов Владимир Леонидович

**ДИАГНОСТИКА БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ И ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ**

Подписано в печать 12.09.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,56. Тираж 100 экз. Заказ 11142.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru