

Министерство транспорта Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «РОССИЙСКИЙ ДОРОЖНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»  
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)

УДК  
№ госрегистрации  
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ФАУ «РОСДОРНИИ»  
  
\_\_\_\_\_ А.П. Варятченко  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ


Результаты работ на объекте «Автомобильная дорога А-107 «Московское Малое Кольцо  
между Киевским и Минским шоссе, рядом с деревней Кобяково и пос. НИИ Радио»  
установками ударного нагружения (FWD) и георадарами

Книга 1

Руководитель НИР,  
начальник управления методов  
проектирования автомобильных дорог,  
д. т. н., профессор

  
\_\_\_\_\_ А.М. Кулижников

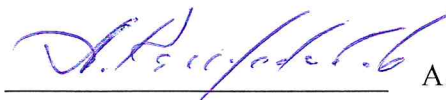
Ответственный исполнитель,  
начальник отдела инновационных технологий  
в инженерных изысканиях, к. т. н.

  
\_\_\_\_\_ Р.А. Еремин

Москва 2019

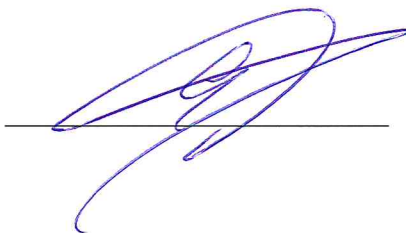
## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,  
Начальник управления методов  
проектирования  
автомобильных дорог,  
д. т. н., профессор



А.М. Кулижников  
(общее руководство,  
редактирование текста,  
заключение)

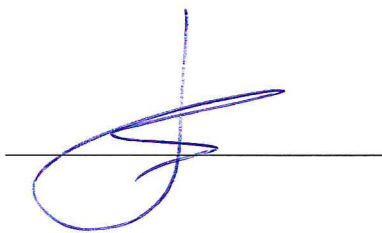
Ответственный исполнитель  
Начальник отдела  
инновационных технологий в  
инженерных изысканиях,  
к. т. н.



Р.А. Еремин  
(введение, разделы 1-5,  
заключение,  
приложения)

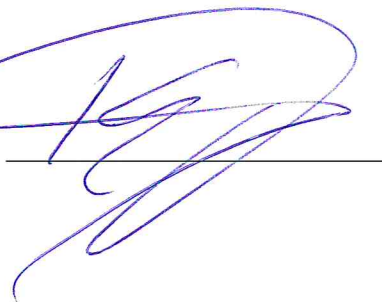
Исполнители:

Главный специалист отдела  
инновационных технологий в  
инженерных изысканиях



А.О. Кузнецов  
(разделы 1-3,  
подраздел 5.4)

Ведущий инженер отдела  
инновационных технологий в  
инженерных изысканиях



М.А. Милавкин  
(раздел 4,  
приложение А)

## РЕФЕРАТ

Отчёт 448 с., 2 кн., 37 рис., 18 табл., 4 источн., 9 прил.

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ, ГЕОРАДАР, УСТАНОВКА УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ, ПРОЧНОСТЬ, МОДУЛЬ УПРУГОСТИ, ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕОРАДАР, ОСЛАБЛЕННЫЕ ЗОНЫ, ТОЛЩИНА СЛОЕВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ, СТУПЕНЧАТОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ, ЛИНЕЙНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ

Цели исследования:

1) оценка возможности определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции с выявлением местоположения областей ослабления в слоях дорожной конструкции,

2) оценка корреляции результатов георадарного обследования с результатами определения упругого прогиба, влагонасыщения и расчета общего модуля упругости дорожной конструкции по данным измерений установками ударного нагружения (FWD).

Задачами исследования являются:

1) сбор данных установкой ударного нагружения (FWD) на экспериментальном участке и маркирование точек измерения упругого прогиба,

2) сбор данных георадарами различных производителей, на различных частотах сканирования в створе профилей прохода установкой ударного нагружения (FWD),

3) контрольное бурение, определение типа материала и толщины слоев дорожной конструкции, физико-механических свойств образцов (при наличии технической возможности),

4) интерпретация радарограмм с учетом результатов контрольного бурения,

5) анализ результатов измерений установками ударного нагружения (FWD),

6) совместный анализ результатов интерпретации радарограмм и результатов измерения упругого прогиба (расчета общего модуля упругости) дорожной конструкции,

7) подготовка отчетных материалов.

Результаты работы и их новизна — сопоставлены возможностей различных модификаций георадаров и исследованы возможности определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции, а также выполнена оценка корреляции результатов георадарного обследования с результатами определения упругого прогиба установками ударного нагружения (FWD).

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: получены расчётные значения коэффициентов вариации и корреляции, характеризующих сходимость результатов георадарного обследования и с результатами определения упругого прогиба установками ударного нагружения.

Оценка успешности выполнения работы — полученный на основании проведенных исследований опыт свидетельствует о возможности решения задач по определению с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции. Дополнительно требуется решить задачу по выявлению местоположения областей ослабления в слоях дорожной конструкции, совершенствования оценки общего модуля упругости дорожной конструкции по данным измерений установками ударного нагружения с применением георадаров.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Книга 1

Введение .....	6
Термины и определения.....	7
1 Описание участка работ и история его наблюдения .....	8
2 Методика подготовки участка работ.....	14
3 Методика сбора полевых данных для оценки прочности .....	17
4 Методика георадарных работ.....	21
4.1 ФАУ «РОСДОРНИИ» .....	21
4.2 Группа компаний «Логис-Геотех» .....	29
4.3 Компания «Геоэксперт» .....	31
4.4 Компания «Радарные и Сейсмические Системы» .....	34
4.5 Компания Geoscanners AB RUSSIA .....	35
4.6 Компания «ЭКОИНСТРУМЕНТ» .....	37
4.7 НПО «Терразонд» .....	38
4.8 ООО «Таймер» .....	40
4.9 ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ.....	42
5 Анализ результатов .....	42
5.1 Наблюдения ФАУ «РОСДОРНИИ» .....	43
5.2 Определение толщины слоев.....	47
5.3 Оценка корреляции результатов георадарного обследования с результатами измерений установками ударного нагружения.....	52
5.4 Контрольная проверка результатов георадарного обследования .....	59
Заключение.....	63
Список использованных источников.....	65

### Книга 2

Приложение А Программа работ .....	4
Приложение Б Обосновывающие материалы ФАУ «РОСДОРНИИ».....	12
Приложение В Обосновывающие материалы группы компаний «Логис-Геотех».....	18
Приложение Г Обосновывающие материалы компании «Геоэксперт».....	76
Приложение Д Обосновывающие материалы компании Geoscanners AB RUSSIA ....	125
Приложение Е Дополнительные материалы компании «ЭКОИНСТРУМЕНТ» .....	181
Приложение Ж Обосновывающие материалы НПО «Терразонд» .....	190
Приложение И Обосновывающие материалы ООО «Таймер» .....	231
Приложение К Обосновывающие материалы ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ.....	258

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящий научно-исследовательский отчет подготовлен на основании результатов совместных работ ГК «АВТОДОР» и ФАУ «РОСДОРНИИ» на опытно-экспериментальном полигоне испытания геосинтетических материалов: «Автомобильная дорога А-107 «Московское Малое Кольцо между Киевским и Минским шоссе, рядом с деревней Кобяково и пос. НИИ Радио» в соответствии с программой работ (приложение А).

В настоящее время в Российской Федерации отсутствует методика совместного применения георадаров и установок ударного нагружения, в то время как обособленно применение обоих методов регламентируется рядом нормативно-технических документов. Установка ударного нагружения применялась для оценки изменения динамического прогиба на поверхности дорожной конструкции с последующими перерасчетами модуля упругости. Георадары различных производителей применялись для сравнения эффективности технологии импульсного зондирования на разных частотах с технологиями линейного и ступенчатого изменения частоты. С помощью георадаров решались задачи: определение толщины слоев дорожной конструкции с калибровкой по данным бурения, неразрушающее определение толщины асфальтобетона, выявление ослабленных зон по данным атрибутного анализа или экспертной оценки оператора.

В ходе исследования было установлено, что существуют общие закономерности в результатах обследования автомобильных дорог методом георадиолокации и ударного нагружения, а именно в части неразрушающего определения участков с разными типами дорожных конструкций (с геотекстилем и без него). Не выявлено строгой зависимости положения дефектов на дорожном покрытии, состояния системы поверхностного водоотвода, результатов георадарного обследования и измерений установкой ударного нагружения. Результаты обследования георадарами и установкой ударного нагружения должны использоваться совместно, дополняя друг друга. Установка ударного нагружения по изменению динамического прогиба указывает на ослабленные зоны, а георадары обнаруживают аномалии, необязательно свидетельствующие об ослаблении. По результатам работ сделан вывод, что совместное использование георадаров и установок ударного нагружения целесообразно, однако для получения дополнительных зависимостей необходимо продолжить исследования на большем количестве объектов в т. ч. специально подготовленных экспериментальных полигонах.

**ФАУ «РОСДОРНИИ» выражает благодарность ГК «Автодор» за организацию совместных исследований.**

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- атрибутный анализ — способ оценки изменения свойств георадарного профиля на основе анализа динамических характеристик электромагнитного сигнала и его производных, а также атрибутов, полученных в результате различных преобразований, расчета геометрических параметров, работы методов цифровой обработки изображений и нейронных сетей
- георадар — геофизический прибор, предназначенный для георадиолокационных исследований любой среды, кроме металла (грунты, материалы, горные породы, акватории, строительные конструкции и т. д.), и применяемый для оценки однородности уложенных дорожно-строительных материалов и грунтов
- метод амплитуд — способ определения толщины асфальтобетона, основанный на расчетах скорости распространения электромагнитных волн в слое посредством сравнения амплитуды отражения электромагнитного сигнала от металлического листа и поверхности асфальтобетонного покрытия

## 1 Описание участка работ и история его наблюдения

Опытно-экспериментальный полигон (далее – полигон) был создан в 2016 г. для испытания геосинтетических материалов для армирования слоев оснований дорожных одежд. Его протяженность составляет 720 м.

Полигон расположен на участке временной дороги на ПК 196 объекта «Строительство Центральной кольцевой автомобильной дороги Московской области, Пусковой комплекс (этап строительства) № 5» в районе деревни Раздолье (Московская область, Одинцовский район) (рисунок 1).



Рисунок 1 — Расположение опытно-экспериментального полигона

На полигоне применены следующие армирующие материалы (рисунок 2): геотекстиль тканый, геосетки, георешетки, геокомпозиты и геосотовый материал в конструктиве с геоматом, которые выполняют функции армирования, разделения, дренирования, что должно повлиять на повышение несущей способности и долговечности дорожной конструкции.





Рисунок 2 — Виды материалов, уложенных на опытно-экспериментальном полигоне

Всего в составе полигона расположены 22 двадцатиметровые секции с армированием. Кроме того, имеется контрольная двадцатиметровая секция без геосинтетических материалов, а также участок, протяженностью 220 м без геосинтетических материалов, который впоследствии будет использоваться в составе разворотной петли под строящимся путепроводом.

Схема расположения секций представлена на рисунке 3. Вид используемого геосинтетического материала представлен в таблице 1.

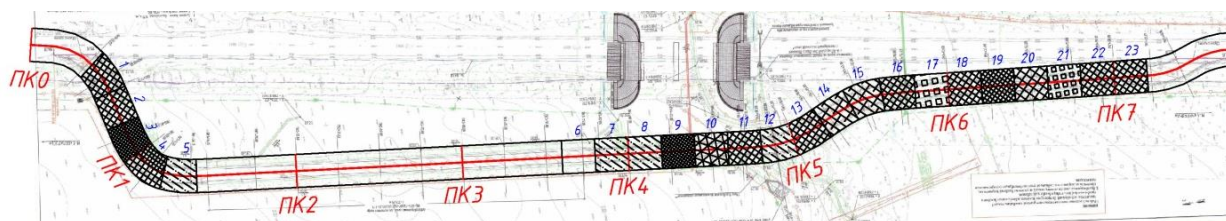


Рисунок 3 — Схема расположения секций на полигоне

Таблица 1 — Вид используемого геосинтетического материала

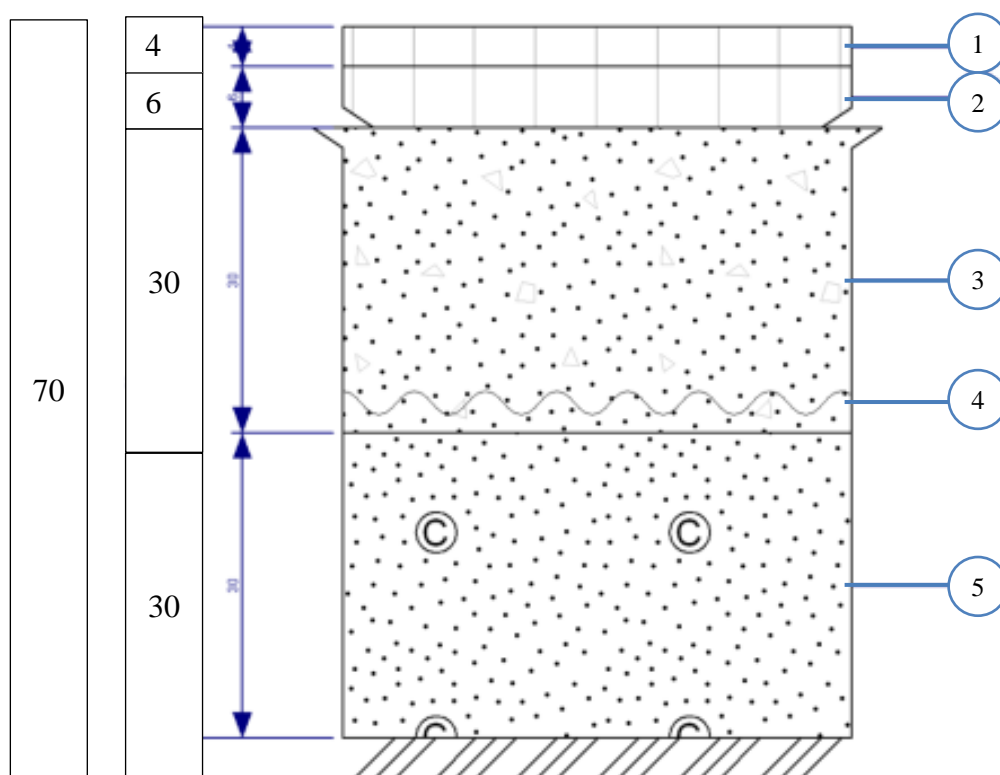
№ секции	ПК	Вид геосинтетического материала
1	0+40 – 0+60	Двухосная сетка 40/40
2	0+60 – 0+80	Двухосная сетка 40/40
3	0+80 – 1+00	Двухосная сетка 20/20
4	1+00 – 1+20	Двухосная сетка 40/40 (прямое направление) Двухосная сетка 25/25 (обратное направление)
5	1+20 – 1+40	Геополотно тканое
–	1+40 – 3+60	Участок без геосинтетических материалов, который впоследствии будет использоваться в составе разворотной петли
6	3+60 – 3+80	Контрольный участок без геосинтетических материалов
7	3+80 – 4+00	Геополотно тканое
8	4+00 – 4+20	Геополотно тканое
9	4+20 – 4+40	Двухосная сетка 20/20
10	4+40 – 4+60	Геоккомпозит: двухосная сетка 50/50 + геополотно нетканое
11	4+60 – 4+80	Двухосная сетка 40/40
12	4+80 – 5+00	Геополотно тканое
13	5+00 – 5+20	Двухосная сетка 40/40
14	5+20 – 5+40	Трехосная сетка 46/46/46
15	5+40 – 5+60	Трехосная сетка 46/46/46
16	5+60 – 5+80	Двухосная сетка 40/40
17	5+80 – 6+00	Геосотовый материал тканый 200/200/150 + геополотно нетканое
18	6+00 – 6+20	Двухосная сетка 40/40
19	6+20 – 6+40	Двухосная сетка 25/25
20	6+40 – 6+60	Двухосная сетка 50/50
21	6+60 – 6+80	Геосотовый материал пластмассовый скрепленный 150/150/150 + дренажный мат двухсторонний
22	6+80 – 7+00	Двухосная сетка 40/40
23	7+00 – 7+20	Двухосная сетка 40/40

Контрольная секция была построена для того, чтобы оценить эффективность применения геосинтетических материалов в дорожных одеждах. В процессе строительства на каждой опытной секции осуществлялась послойная оценка качества строительства с использованием динамического и статического штампа (рисунок 4), а также с применением установки ударного нагружения.



Рисунок 4 — Статические испытания

Конструкция дорожной одежды на опытно-экспериментальном полигоне представлена на рисунке 5.



1 — асфальтобетон горячей укладки плотный I марки, из щебеночной (гравийной) смеси типа А, марка битума БНД/БН-60/90; 2 — асфальтобетон горячей укладки пористый II марки из крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси марка битума БНД/БН 60-90; 3 — смеси щебеночные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований); 4 — геосинтетический материал; 5 — песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 0 %

Рисунок 5 — Конструкция дорожной одежды на опытно-экспериментальном полигоне

Методика мониторинга полигона Государственной компанией «Автодор» предусматривает выполнение работ по определению установкой ударного нагружения Sweco (Grontmij) PRIMAX 1500 величины динамического прогиба и последующего расчета общего модуля упругости дорожной конструкции. Мониторинг выполнялся два раза в год в течение всего периода эксплуатации временной автомобильной дороги. Таким образом, накоплена информация об изменении модуля упругости в течение года, а также в течение всего срока эксплуатации.

После завершения исследования в 2019 году опытно-экспериментальный участок временной дороги должен быть разобран, а использованные при его строительстве геосинтетические материалы должны быть повторно изучены в лабораторных условиях [1].

Кроме того, в третьем квартале 2017 г. на опытно-экспериментальном полигоне выполнялись георадарные исследования компаниями Росдортех и Миаком с целью оценки однородности состояния земляного полотна и дорожной одежды опытно-экспериментального участка [1].

ФАУ «РОСДОРНИИ» приглашение поучаствовать в совместных исследованиях опытно-экспериментального полигона совместно с Государственной компанией «Автодор» было получено в ноябре 2018 года, когда сотрудники института выполнили обследование полигона георадаром ОКО-3 с бесконтактными антенными блоками 1000 и 2000 МГц, а также контактной двухчастотной антенной 250/700 МГц. Параллельно сотрудниками Государственной компании «Автодор» было выполнено обследование полигона георадаром NOGGIN® GPR [2] и установкой ударного нагружения Sweco (Grontmij) PRIMAX 1500. Пример радарограммы, полученной по результатам обследования в ноябре 2018 года, приведен на рисунке 6.

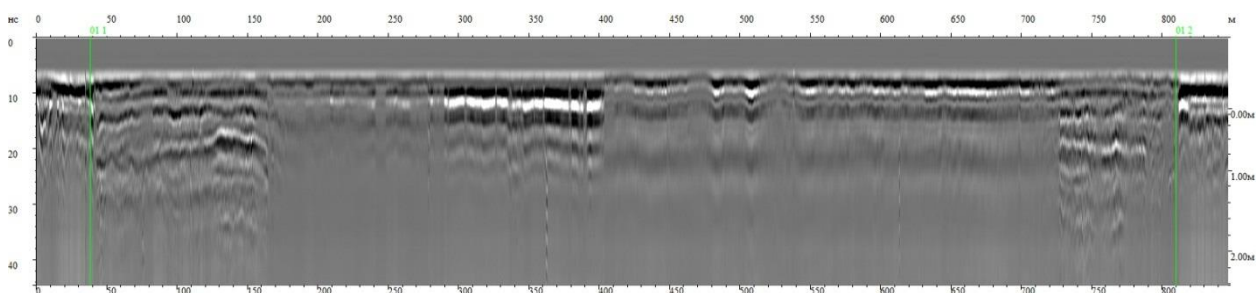


Рисунок 6 — Пример радарограммы, полученной по результатам обследования в ноябре 2018 года антенным блоком частотой 250 МГц

Графики измерения величины динамического прогиба и общего модуля упругости дорожной конструкции за 2018 г. приведены на рисунках 7 и 8.

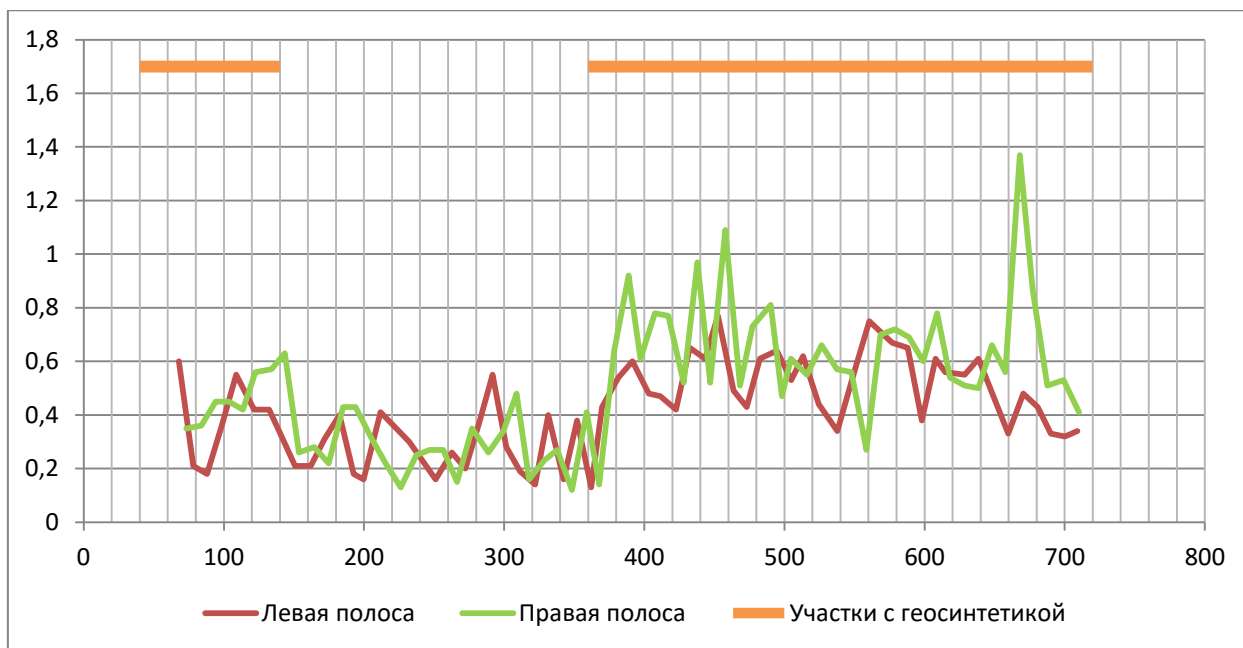


Рисунок 7 — Изменение величины упругого прогиба по результатам обследования в ноябре 2018 года



Рисунок 8 — Изменение величины модуля упругости по результатам обследования в ноябре 2018 года

Анализ полученных установкой ударного нагружения материалов показывает, что на величину динамического прогиба и, следовательно, на общий модуль упругости дорожной конструкции закономерно влияет изменение типа дорожной конструкции на ПК 0 + 40 – 1 + 40 и 3 + 80 – 7 + 20. На участках с геосинтетикой на поверхности покрытия модуль упругости меньше, чем в типовой конструкции. В рамках отдельных секций с различным армирующим материалом устойчивая зависимость изменения динамического прогиба от участка измерений не прослеживается. Вместе с тем, было



обращено внимание на весьма большой разброс значений общего модуля упругости дорожной конструкции на ПК 1 + 40 – 3 + 80, где тип конструкции дорожной одежды на участке не изменяется. Также по результатам обследования 2018 г. было замечено, что в пределах одних и тех же секций с одинаковым армирующим материалом не наблюдалась однородность значений динамического прогиба.

На основании выполненного ФАУ «РОСДОРНИИ» обследования 2018 г. были сделаны выводы, что корреляция показаний георадара и установки ударного нагружения прослеживается. С целью поиска дополнительных возможностей совместного использования георадаров и установок ударного нагружения, а также оценки возможности определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции с выявлением местоположения областей ослабления в слоях дорожной конструкции было принято решение провести дополнительные совместные испытания в 2019 г.

## **2 Методика подготовки участка работ**

Работы по оценке однородности дорожных одежд георадарными установками были проведены 29 июля 2019 года. В соответствии с программой работ для обеспечения единства записи георадарных данных и последующего сопоставительного анализа результатов были выполнены работы по разметке траекторий для движения (рисунок 9). Разметка выполнялась маркировкой точек краской с шагом пять метров для правой и левой полос движения по центру каждой из них.



Рисунок 9 — Процесс разметки траекторий для движения георадарных установок

Кроме того, силами подрядной организации, выполняющей строительные работы на объекте, были выполнены разбивка и закрепление пикетажного положения оси временной автомобильной дороги, а также вынесены на местности границы секций.

Для последующего анализа и совмещения различных материалов было выполнено координирование всех точек в режиме RTK с применением спутниковой геодезической аппаратуры. В качестве базовой станции использовалась станция ODIN (г. Одинцово) сети референционных базовых станций EFT-CORS. Для измерений использовалась проекция UTM 37N общемировой системы координат WGS 84.

После выполнения георадарного обследования и предварительной обработки результатов в полевых условиях, по согласованию с ГК «Автодор» сотрудниками МАДИ были пробурены пять выработок для определения толщины слоев дорожной конструкции. Места выработок также были закоординированы. Дополнительно были закоординированы участки покрытия, на которых имелись следы выполнения ремонтных работ, а также те, под которыми располагались металлические водопропускные трубы. Дополнительно была составлена дефектная ведомость (таблица 2) и ведомость застаивающихся поверхностных вод в боковых канавах (таблица 3).

Таблица 2 — Дефектная ведомость

Правая полоса (прямой ход)		Левая полоса (обратный ход)	
ПК	Дефект	ПК	Дефект
1+00 – 1+40	Продольные заплаты	2+55	Поперечная трещина
2+55	Поперечная трещина	2+90	Поперечная трещина
4+80 – 5+10	Колея, просадка, заплаты	4+00 – 4+40	Колея
5+60 – 6+00	Колея	5+20 – 5+80	Колея Заплаты на колее (по оси)
6+00 – 6+15	Заплаты	6+40	Поперечная трещина
6+55	Поперечная трещина	6+55	Поперечная трещина
6+90 – 7+00	Сетка трещин у кромки, продольные заплаты	6+85	Поперечная трещина с заплатой
7+10 – 7+20	Сетка трещин у кромки	7+10 – 7+20	Просадка, сетка трещин

Таблица 3 — Ведомость застаивающихся поверхностных вод в боковых канавах

ПК	Справа	Слева
2+20 – 3+80		+
5+00 – 5+40	+	
4+80 – 5+20		+
4+90	Двухочковая металлическая труба	
5+80 – конец трассы	+	

После демонтажа асфальтобетонного покрытия было выполнено шурфование щебеночного слоя в тех же местах, где отбирались керны. Вынос мест шурфования осуществлялся спутниковым оборудованием.

Также в процессе разборки временной дороги были пройдены три шурфа, в которых были определены толщины дополнительного слоя основания, а также отобраны пробы для последующего определения влажности в лабораторных условиях. Места устройства шурфов также были закоординированы. На рисунке 10 представлена схема расположения выработок, шурфов и дефектов на покрытии.

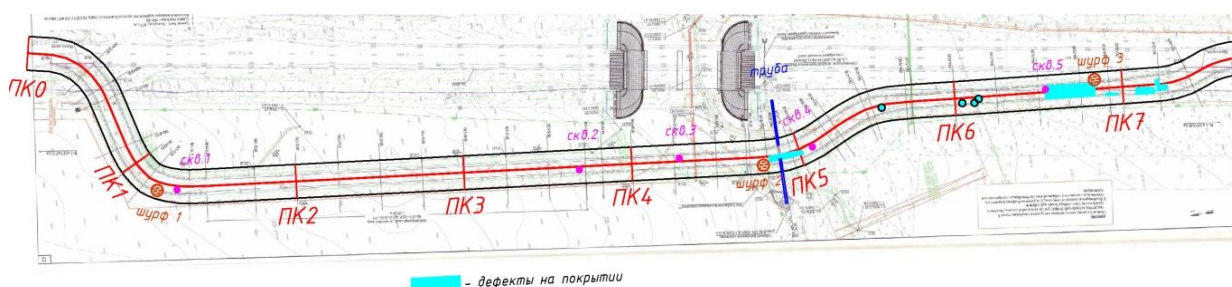


Рисунок 10 — Схема расположения выработок, шурфов и дефектов на покрытии

Результаты определения толщин конструктивных слоев приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты определения толщин конструктивных слоев

Наименование	ПК	Полоса	Материал слоя	Толщина, см
Шурф 1	1+18,0	Правая	Асфальтобетон	–
			ЩПС	–
			Песок	22
Скважина 1	1+28,6	Правая	Асфальтобетон	11,5
			ЩПС	34,5
			Песок	–
Скважина 2	3+68,4	Правая	Асфальтобетон	11
			ЩПС	18,5
			Песок	–
Скважина 3	4+28,2	Левая	Асфальтобетон	11
			ЩПС	26
			Песок	–



Продолжение таблицы 4

Наименование	ПК	Полоса	Материал слоя	Толщина, см
Шурф 2	4+77,0	Правая	Асфальтобетон	–
			ЩПС	
			Песок	33
Скважина 4	5+07,5	Правая	Асфальтобетон	13
			ЩПС	31,3
			Песок	–
Скважина 5	6+54,6	Левая	Асфальтобетон	11
			ЩПС	28
			Песок	–
Шурф 3	6+84,0	Левая	Асфальтобетон	–
			ЩПС	–
			Песок	35

Участникам были переданы указанные данные для калибровки георадарных профилей за исключением выработок на ПК 1 + 28,6 справа и ПК 6 + 54,6 слева – для контроля по ним отклонений толщины между результатами бурения и георадарной съемки.

### 3 Методика сбора полевых данных для оценки прочности

Для координирования мест определения динамического прогиба и расчета общего модуля упругости дорожной конструкции на установке ударного нагружения была установлена спутниковая геодезическая аппаратура (рисунок 11) и в режиме RTK выполнялось координирование мест определения динамического прогиба.



Рисунок 11 — Установка ударного нагружения Sweco (Grontmij) PRIMAX 1500 с установленной спутниковой аппаратурой

Определение динамического прогиба выполнялось с шагом 5 метров в количестве не менее трех измерений на каждой двадцатиметровой секции. Стоит отметить, что для правой полосы движения на участке без геосинтетических материалов, который впоследствии будет использоваться в составе разворотной петли, измерения не выполнялись.

Всего сотрудниками ГК «Автодор» было выполнено 177 измерений: 73 на правой полосе и 104 на левой. Графики измерения величины статического прогиба и общего модуля упругости дорожной конструкции, совмещенные с участками покрытия, на которых имелись следы выполнения ремонтных работ, приведены на рисунках 12 и 13.



Рисунок 12 — Изменение величины упругого прогиба

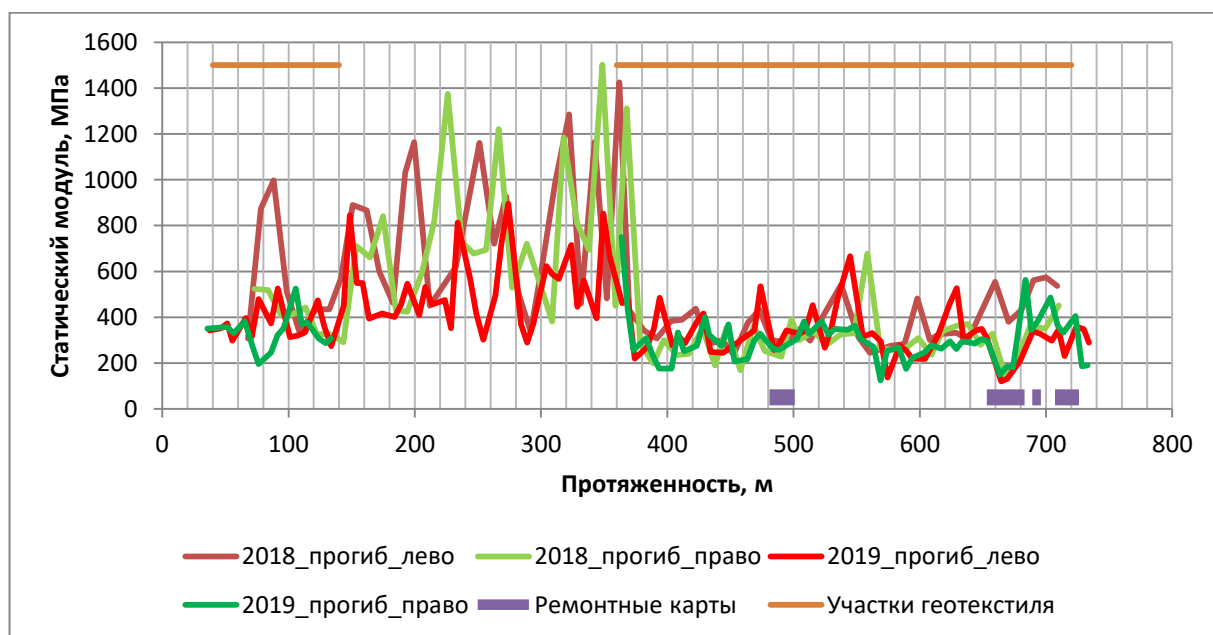


Рисунок 13 — Изменение величины модуля упругости

Анализ полученных материалов позволяет увидеть характерные признаки зависимости изменения типа конструкции от величины упругого прогиба и общего модуля упругости дорожной конструкции. Абсолютной зависимости положения локальных выбросов динамического прогиба от состояния покрытия не прослеживается. Однако, на участке 6 + 53 – 6 + 83, где имеются наиболее характерные следы выполнения ремонтных работ, значительно увеличивается динамический прогиб и снижается общий модуль упругости дорожной конструкции.

Модуль упругости на поверхности покрытия на участках с геосинтетикой был меньше, чем в конструкции без армирования.

Стоит отметить меньший разброс значений общего модуля упругости в 2019 г. по сравнению с 2018 г., что может быть обусловлено благоприятным летним периодом для выполнения измерений.

График зависимости изменения динамического прогиба (2019 г.) от типа геосинтетического материала представлен на рисунке 14.

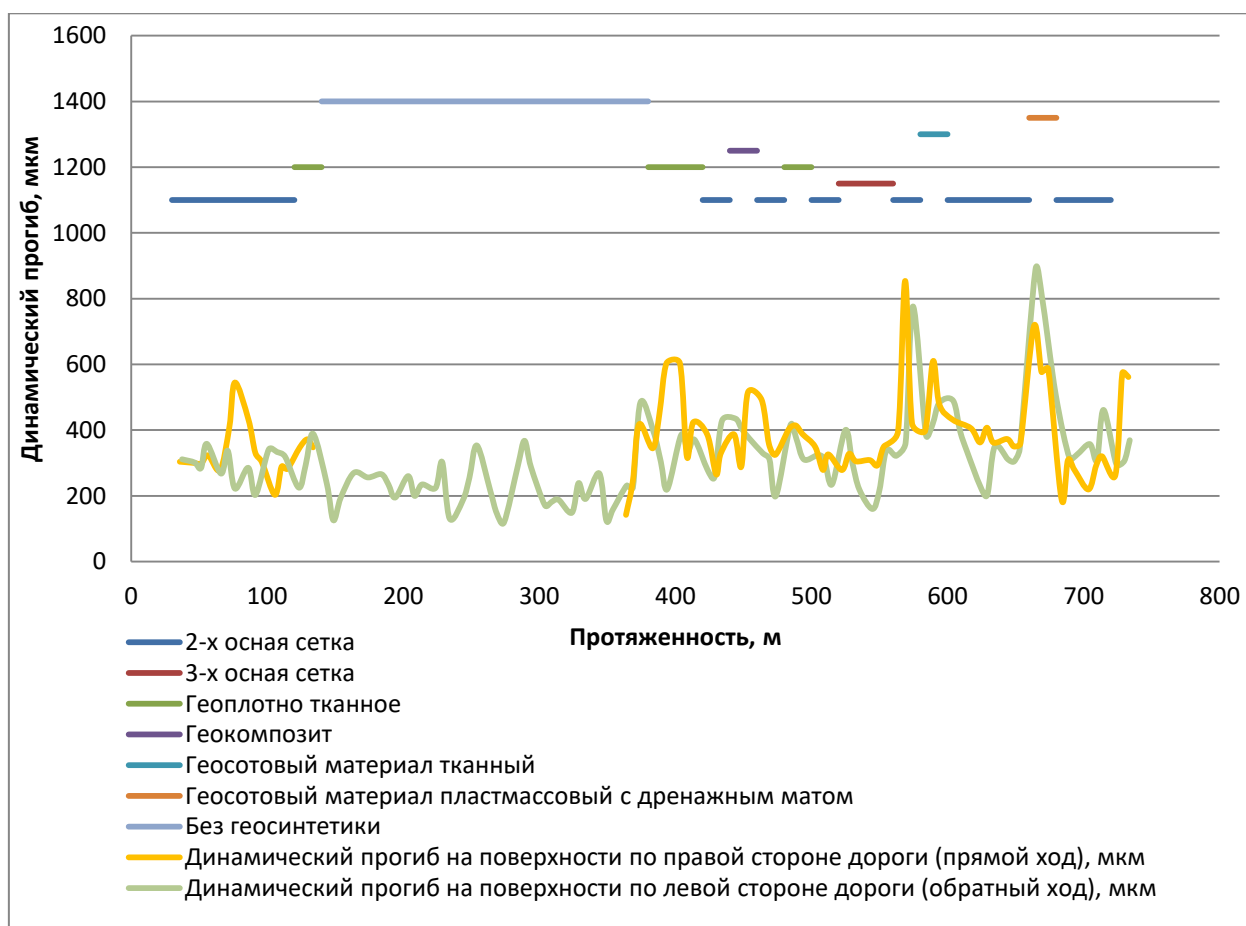


Рисунок 14 — График зависимости изменения динамического прогиба (2019 г.) от типа геосинтетического материала

Рисунок 14 демонстрирует, что строгой зависимости резких изменений динамического прогиба от вида геосинтетического материала не наблюдается.

График зависимости изменения динамического прогиба (2019 г.) от местоположения просадок по результатам георадарного обследования ФАУ «РОСДОРНИИ» представлен на рисунке 15.



Рисунок 15 — График зависимости изменения динамического прогиба (2019 г.) от местоположения просадок по результатам георадарного обследования

На рисунке 15 наблюдается частичная зависимость повышения динамического прогиба от местоположения просадок по результатам георадарного обследования по левой стороне дороги на ПК 3 + 86, ПК 5 + 74 и ПК 6 + 64, по правой стороне дороги на ПК 0 + 76, ПК 4 + 53 и ПК 6 + 64. Местоположение просадок дублируется по левой и правой стороне дороги на ПК 4 + 50 – ПК 4 + 70, а также ПК 6 + 60 – ПК 6 + 80.

График зависимости изменения динамического прогиба (2019 г.) от местоположения видимых дефектов дорожного покрытия и нарушений функционирования системы поверхностного водоотвода у основания земляного полотна представлен на рисунке 16.

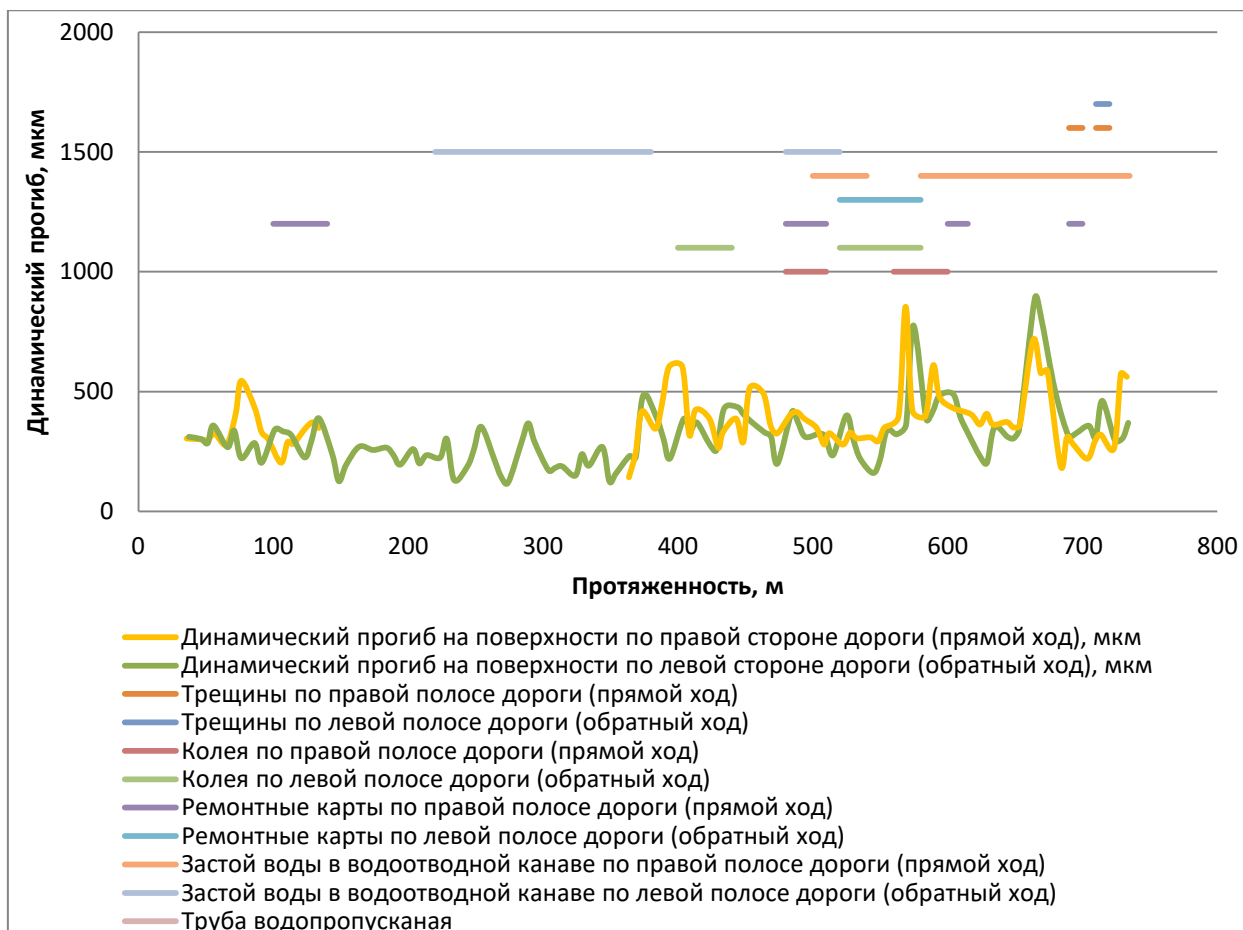


Рисунок 16 — График зависимости изменения динамического прогиба от местоположения видимых дефектов дорожного покрытия и нарушений функционирования системы поверхностного водоотвода

На рисунке 16 видно, что наибольшие значения динамического прогиба соответствуют участку с ПК 3 + 80 и до конца трассы, где уложен геосинтетический материал. Строгой зависимости между видами дефектов покрытия и показаниями установки ударного нагружения не наблюдается.

#### 4 Методика георадарных работ

##### 4.1 ФАУ «РОСДОРНИИ»

Во время георадарных исследований ФАУ «РОСДОРНИИ» использовался импульсный георадар серии ОКО-3 (рисунок 17) со сменными антенными блоками центральной частотой зондирования:

- 250 МГц (контактная антенна),
- 900 МГц (контактная антенна),
- 2000 МГц (бесконтактная антенна).

Съемка всеми антенными блоками осуществлялась в пешем режиме с целью соблюдения строгого соответствия маршрута перемещения антенны георадара по размеченным краской профилям. Запись данных осуществлялась двумя сотрудниками,



один из которых нес на себе блок управления георадара и персональный компьютер, а второй перемещал антенный блок. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса.



Рисунок 17 — Георадарная съемка ФАУ «РОСДОРНИИ»

Георадарные данные были записаны в программном обеспечении GeoScan32. Для всех антенных блоков использовался шаг сканирования 5 см. Датчики перемещения калибровались заранее до выезда из офиса. Исключением являлся датчик перемещения, установленный на специализированную тележку антенного блока 2000 МГц, принадлежавшую группе компаний ЛогиС-Геотех. Ранее специалисты ФАУ «РОСДОРНИИ» оценили высокое качество сигнала указанной антенны и воспользовались ей для сбора данных своим георадаром серии ОКО-3. В надежде обеспечить абсолютную точность привязки георадарных данных к местам отбора проб специалисты ФАУ «РОСДОРНИИ» устанавливали метки в местах расположения каждой из опознавательных точек створа прохода георадара на дорожном покрытии. При этом бурение выполнялось также в точках, размеченных на покрытии краской. В постобработке указанное решение позволило установить точное местоположение кернов. После корректировки протяженности профилей в постобработке дополнительным подтверждением истинного положения кернов на покрытии являлись характерные признаки на радарограммах (рисунок 18).

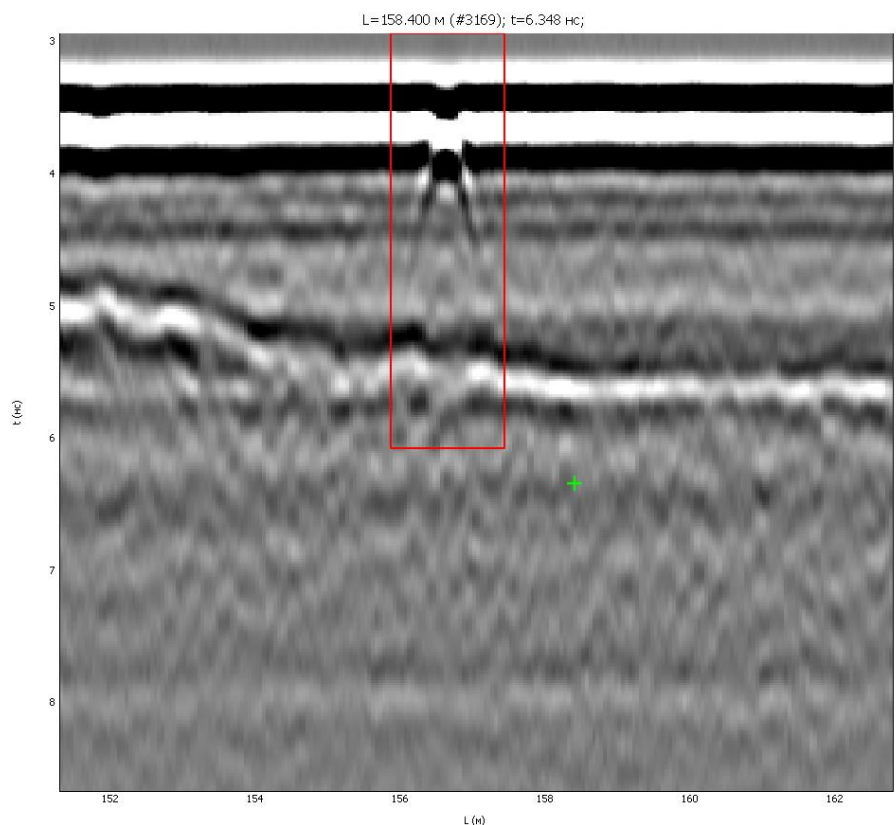


Рисунок 18 — Идентификация местоположения керна на радарограмме

Контактные антенные блоки 250 МГц и 900 МГц перемещались на монольже, что обеспечивало полный контакт со сканируемой поверхностью и исключало воздушный зазор между антенной и дорожным покрытием. Подобное решение является подходящим для обследования участков небольшой протяжённости.

Бесконтактный антенный блок с центральной частотой 2000 МГц перемещался по сканируемой поверхности с помощью специализированной тележки, разработанной группой компаний ЛогиС-Геотех для съёмки поперечных профилей дороги. Данное решение также вполне применимо для съёмки в продольном направлении на участках небольшой протяженности, в т. ч. может использоваться на участках строящихся автомобильных дорог при приемочном и операционном контроле. Преимуществом бесконтактных рупорных антенн является узкая диаграмма направленности, позволяющая снизить погрешность определения толщины конструктивных слоев дорожной одежды.

Для антенны 2000 МГц был дополнительно записан калибровочный файл (рисунок 19) над металлическим листом, что позволило выполнить автоматическую калибровку радарограмм для определения толщины асфальтобетонного слоя без бурения.

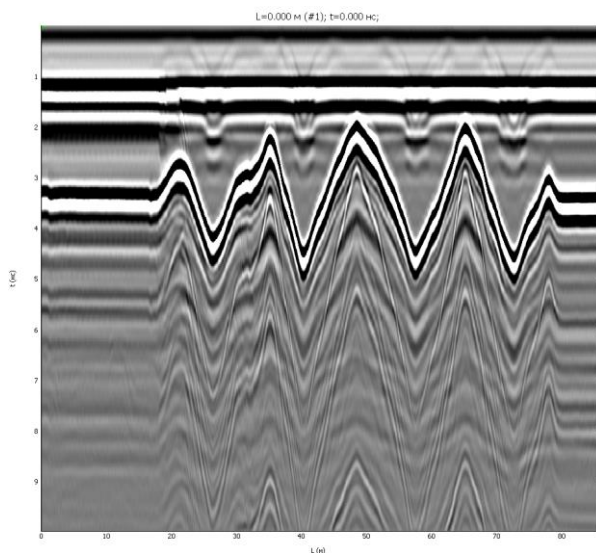


Рисунок 19 — Калибровка георадара над металлическим листом

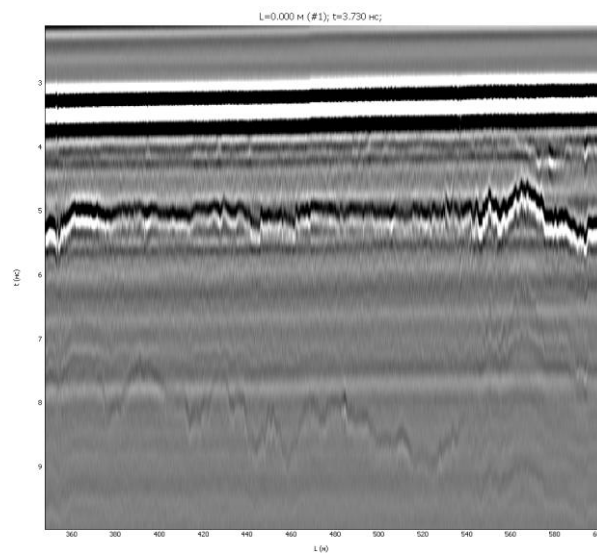
Обработка данных осуществлялась в программном комплексе GeoReader, в частности, был выполнен расчет толщины асфальтобетонного слоя без бурения методом амплитуд, расчет толщины слоев дорожной конструкции с калибровкой по данным бурения и шурфования, атрибутивный анализ георадарных профилей.

Методика расчета толщины асфальтобетонного слоя без бурения методом амплитуд включает анализ пар георадарных профилей, один из которых записан над металлическим листом, а второй – на поверхности сканируемого дорожного покрытия (рисунок 20). При сравнении амплитуд отражения от поверхностей с различной отражающей способностью выполнялся автоматический расчет скорости распространения электромагнитной волны в первом слое дорожной конструкции для каждой точки георадарного сканирования. Полученные значения скоростей позволяли автоматически определять глубину заложения подошвы пакета асфальтобетонных слоев без бурения. Данный метод применяется преимущественно для первого слоя, а именно асфальтобетонных слоев. При расчете использовался модуль амплитудного анализа.





Калибровочный файл  
над металлическим листом



Радарограмма дорожной конструкции

Рисунок 20 — Радарограммы для расчета толщины слоя методом амплитуд

Методика расчета толщины слоев дорожной конструкции с калибровкой по данным бурения или шурфования предусматривает корректировку шкалы глубин георадарного профиля по данным выработок. Сначала оператор отыскивал положение границы слоев. Затем намечал местоположение выработки. Результаты бурения заносились оператором в электронный журнал программы обработки георадарных данных и осуществлялась автоматическая корректировка шкалы глубин георадарного профиля. Результаты определения толщины слоев дорожной конструкции приведены в приложении Б.

Для более корректного определения толщины слоев там, где была возможность выполнить калибровку по двум выработкам, оператор задал слоям средние значения скорости распространения электромагнитных волн в них. На рисунке 21 приведен пример автоматизированного поиска подошвы границы слоя с назначенным оператором местоположением выработки и занесенными результатами бурения в электронный журнал.

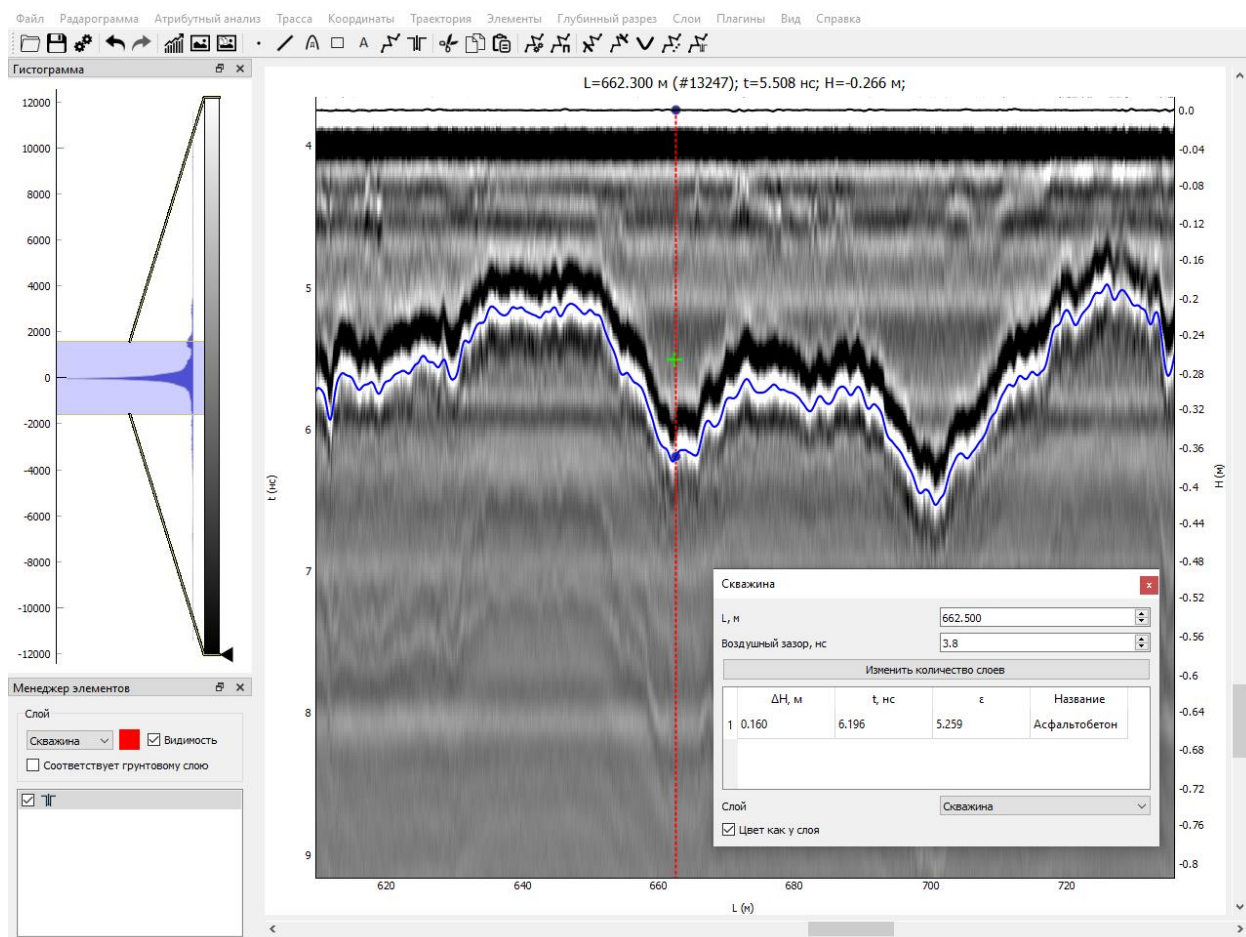


Рисунок 21 — Калибровка радарограммы по данным бурения

Для выявления ослабленных зон применялся атрибутный анализ в режиме автоматической обработки и без участия оператора. Использовались процедуры «автоматического поиска структурных аномалий» применяемого программного комплекса: преобразование Гильберта; энергетических, амплитудных, спектральных и корреляционных характеристик; анализа текстур и цифровой обработки изображений. Наиболее информативными результатами атрибутного анализа оказались процедуры анализа текстур и цифровой обработки изображений, они представлены в приложении Б. Для удобства совместного анализа результатов георадарного обследования и определения динамического прогиба были применены алгоритмы синхронного отображения радарограмм и графиков изменения прочностных свойств по данным установки ударного нагружения с линейной (в т. ч. пикетной) или координатной привязкой (рисунок 22).



Примечание — Аномалия выделена красным маркером

Рисунок 22 — Синхронное отображение радарограммы и графика измерения динамического прогиба установки ударного нагружения PRIMAX 1500

По результатам автоматического атрибутивного анализа поверх радарограмм отображаются цветовые схемы, визуально отделяющие области георадарного профиля с разными количественными параметрами атрибутов волнового поля. По изменению атрибутов в некоторых местах по сравнению с общей картиной можно делать вывод о наличии зон аномалий. Применялись алгоритмы на основе классической теории цифровой обработки сигналов, изображений и классической георадиолокации. Местоположение обнаруженной аномалии указано на рисунке 22 красным маркером.

Традиционно применялись алгоритмы преобразования Гильберта, предназначенные для преобразования каждой трассы в три функции: мгновенную амплитуду, мгновенную фазу и мгновенную частоту.

Энергетические и амплитудные атрибуты были рассчитаны в двух вариантах. Первый вариант — атрибут рассчитывается по всей трассе, каждой трассе ставится в соответствие одно число, а в целом по радарограмме — график. Вторым вариантом — по каждой трассе проходит скользящее окно заданной ширины, атрибут считается для фрагмента трассы, находящегося в текущем положении скользящего окна. В результате рассчитывается стандартная матрица атрибутивного анализа, которую можно наложить на исходную радарограмму.

Спектральные амплитуды были рассчитаны для каждой трассы с помощью преобразования Фурье.

Взаимно-корреляционные функции применялись для оценки степени корреляции двух последовательностей, в данном случае – двух сигналов.

Ввиду того, что все наиболее информативные и представленные в отчете примеры получены алгоритмами цифровой обработки изображений, далее будет приведено описание только по ним.

Текстурный анализ (текстурная сегментация) вычленяет текстуры, которые можно использовать для идентификации интересующих областей изображения. Один из способов описания текстуры основывается на использовании пространственного распределения и пространственной взаимозависимости значений яркости между соседними пикселями изображения (метод GLCM).

Матрица яркостной зависимости содержит уникальную для каждой текстуры информацию. Для того, чтобы разные текстуры можно было сравнивать между собой, по матрице яркостной зависимости рассчитываются текстурные признаки.

Наиболее используемые текстурные признаки — контрастность, энергия, энтропия, однородность, корреляция.

Энергия — это сумма квадратов элементов матрицы яркостной зависимости. Текстурный признак «энергия» отражает однородность распределения уровней серого на изображении и грубость текстуры. Чем более однородна структура, тем выше значение энергии.

Контраст представляет собой меры расхождения в интенсивности между соседними пикселями текстуры. Контраст отражает резкость текстуры и глубину борозд на ней. Более глубокие борозды на текстуре будут связаны с высокой контрастностью и большей резкостью; напротив, низкая контрастность связана с менее глубокими бороздами и размытостью текстуры.

Энтропия отражает неравномерность (хаотичность) и сложность текстуры изображения. Неоднородные текстуры будут иметь низкое значение признака энтропии, в то время как однородные текстуры — высокое.

Однородность представляет собой меру близости распределения элементов матрицы яркостной зависимости к диагонали этой же матрицы. Высокое значение признака означает отсутствие локальных изменений текстур и говорит об однородном распределении уровней серого. Соответственно, высокое значение обратного момента характерно для однородных текстур.

Другими примененными методами цифровой обработки изображений являются оператор Собеля, оператор Кэнни и Энтропия.

Оператор Собеля — дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенные значения производных разного порядка для функции яркости пикселей. Результат показывает, насколько «резко» или «плавно» меняется яркость изображения в каждой точке, а значит, вероятность нахождения точки на грани, а также ориентацию границы. Наиболее распространенным примером практического использования является определение границ (ребер) объектов на изображении, т. е. точек резкого изменения яркости.

Оператор Кэнни также предназначен для поиска границ на изображении. Границы — это линии на изображении, в которых происходит резкое изменение яркости.

Энтропия (не путать с методом текстурного анализа Энтропия) характеризует изменчивость яркости изображения. Она равна 0 для области с постоянной яркостью и максимальна в случае возрастания флуктуации яркости изображения.

#### 4.2 Группа компаний «Логис-Геотех»

Во время георадарных исследований группой компаний Логис-Геотех использовался импульсный георадар серии ОКО-3 со сменными антенными блоками центральной частотой зондирования (рисунок 23):

- 400 МГц (контактная антенна),
- 1000 МГц (бесконтактная антенна),
- 2000 МГц (бесконтактная антенна).

Антенные блоки с центральной частотой 400 МГц и 1000 МГц специально были подобраны отличными от антенных блоков ФАУ «РОСДОРНИИ» с целью всесторонней оценки возможной корреляции данных георадаров и установки ударного нагружения.



Рисунок 23 — Запись георадарных данных сотрудниками Логис-Геотех



Съемка всеми антенными блоками осуществлялась в пешем режиме с целью соблюдения маршрута перемещения антенны георадара по размеченным краской профилям. Запись данных осуществлялась двумя сотрудниками, один из которых нес на себе блок управления георадара и персональный компьютер, а второй перемещал антенный блок. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса и спутникового оборудования. Контактный антенный блок 400 МГц перемещался на монольже, что обеспечивало полный контакт со сканируемой поверхностью и исключало воздушный зазор между антенной и дорожным покрытием.

Бесконтактные антенные блоки с центральной частотой 1000 и 2000 МГц перемещались по сканируемой поверхности с помощью специализированной тележки на высоте около 20 см.

Обработка данных георадиолокации осуществлялась в программе «GeoScan-32» (ООО «Логис»). Задача интерпретации данных георадиолокационной съёмки заключалась в преобразовании исходных радарограмм в когерентный разрез, отражающий картину залегания основных структурных слоев и каких-либо локальных объектов. Выделение комплексов на георадиолокационных профилях проводилось практически без априорной геологической информации посредством анализа только физических взаимоотношений между осями синфазности отраженных волн и различий в волновой картине. *При интерпретации использовался в основном визуальный анализ*, при котором исследовались следующие параметры волновой картины:

- конфигурация осей синфазности отраженных волн (например, параллельные, волнистые, хаотические и т. д.),
- интенсивность осей синфазности (амплитуда отражений),
- частотный состав записи,
- протяженность осей синфазности,
- скорость распространения волны.

Для определения толщины слоев использовался подход, при котором производится сопоставление выделенных отражающих поверхностей со слоями, представленными в скважине. В каждой точке отбора кернов диэлектрическая проницаемость корректируется до совпадения глубин отражающих и реальных границ, на участках между скважинами  $\epsilon$  определяется на основе графиков изменения диэлектрической проницаемости вдоль профиля. На основании полученных данных отбора кернов асфальтобетонного покрытия и щебенисто-песчаной смеси была проведена привязка слоев по глубине и пересчет временного разреза в глубинный.

*В отчете отмечается, что подошва слоя щебня перекрывалась кратными отражениями от подошвы асфальтобетона, поэтому выделена неточно по отдельным фрагментам слабоамплитудной отраженной волны.*

Для выявления ослабленных зон группой компаний «Логис-Геотех» выделены участки низкочастотной высокоамплитудной записи на радарограммах, которые, по мнению участника работы, соответствуют переувлажнениям в насыпных грунтах (таблица 5).

Таблица 5 — Таблица выделенных аномальных участков записи

Направление движения	Метры	Глубина положения верха аномального участка, см
Левое	145-155	65
	300-360	53
	434-475	55
	600-638	40
Право	338-368	50
	442-453	43
	466-478	50
	590-600	40
	624-636	36
	683-705	50

Более подробно методика сбора полевых материалов, параметры записи данных, методика их обработки и характеристики оборудования представлены в отчете группы компаний Логис-Геотех (приложение В).

#### **4.3 Компания «Геоэксперт»**

Разработанная компанией ООО «Геоэксперт» георадарная система (в отличие от рыночного продукта) представляет собой экспериментальную установку (рисунок 24). Форматы файлов являются закрытыми, а обработка ведется с применением множества отдельных алгоритмов, скриптов и приложений, многие из которых находятся в процессе разработки.



Рисунок 24 — Георадар компании «Геоэксперт»

Во время георадарных исследований компанией «Геоэксперт» использовалось оборудование со ступенчатым изменением частоты в диапазоне от 1100 до 1800 МГц. Антенный блок георадарной установки представлен двумя рупорно-ригельными антеннами, одна из которых является приемной, а вторая передающей. Съемка осуществлялась с помощью автомобиля, георадарная установка была закреплена с помощью специального кронштейна на фаркопе транспортного средства. Максимальная скорость движения при съемке имеет ограничение в 20 км/ч, при этом обеспечивается шаг сканирования менее 1 см. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса и спутникового оборудования в дифференциальном режиме. За один проезд можно получить один георадарный профиль. Решение компании ООО «Геоэксперт» в части сбора данных оборудованием со ступенчатым изменением несущей частоты позволяет сократить время камеральной обработки за счет расшифровки одного георадарного профиля, эквивалентного серии георадарных профилей, полученных сменными антеннами.

Используемые алгоритмы расчета толщины слоев работают полностью в автоматическом режиме. Под ослабленными зонами участник понимает зоны уплотнения и разуплотнения. Местоположение аномалий представлено в таблицах 6 и 7.



Таблица 6 — Результаты выявленных ослаблений (профиль № 1 — правая полоса)

№ п/п	ПК	Координаты		Наличие ослаблений (в т. ч. критерий обнаружения)	Глубина кровли неоднородности, м	Примечание
		X, м	Y, м			
1	1+30	100		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,15-05	10
2	2+05	175		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,2-0,4	10
3	3+87	357		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,36-0,54	20 (в центральной части уплотнение меньше)
4	4+52	422		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,15-0,5	15-20
5	4+75	445		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,12-0,6	20-25
6	4+88	458		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,14-0,55	3-4
7	5+72	542		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,12-0,6	5-7
8	5+93	563		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,12-0,5	10
9	6+52	622		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,05-0,6	5
10	7+00	670		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,2-0,6	30

Таблица 7 — Результаты выявленных ослаблений (профиль № 2 — левая полоса)

№ п/п	ПК	Координаты		Наличие ослаблений (в т.ч. критерий обнаружения)	Глубина кровли неоднородности, м	Примечание
		X, м	Y, м			
1	0+65	35		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,05-0,6	Примерно 3
2	1+00	70		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,12-0,6	Примерно 8
3	1+85	155		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,12-0,6	7-8

Продолжение таблицы 7

№ п/п	ПК	Координаты		Наличие ослаблений (в т.ч. критерий обнаружения)	Глубина кровли неоднородности, м	Примечание
		X, м	Y, м			Протяженность зоны в горизонтальном направлении, м
4	2+20	190		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка (часть зоны не определяется)	0,12-0,55	6
5	3+45	315		Зоны чередующегося разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,1-0,55	29
6	4+74	444		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,15-0,55	10
7	4+85	455		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0,15-0,55	15
8	5+20	490		Зона уплотненного грунта в слое щебня и песка	0,15-0,55	12
9	5+32	512		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0.3	2
10	5+48	518		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0.3	2
11	5+52	522		Зона разуплотненного грунта в слое щебня и песка	0.3	2
12	6+13	583		Зона разуплотненного грунта в слое асфальтобетона	0.05	10
13	6+32	612		Зона уплотненного грунта в слое асфальтобетона	0.05	5
14	6+50	620		Зона уплотненного грунта в слое асфальтобетона	0.05	7
15	6+72	642		Зона уплотненного грунта в слое асфальтобетона	0.05	10
16	7+12	682		Зона уплотненного грунта в слое асфальтобетона	0.05	12

Более подробно методика сбора полевых материалов, параметры записи данных, методика их обработки и характеристики оборудования представлены в отчете компании ООО «Геоэксперт» (приложение Г).

#### 4.4 Компания «Радарные и Сейсмические Системы»

Компания приняла участие в записи георадарных данных (рисунок 25), однако материалы интерпретации радарограмм, к сожалению, представлены не были.



Рисунок 25 — Запись георадарных данных компанией «Радарные и Сейсмические Системы»

#### **4.5 Компания Geoscanners AB RUSSIA**

Во время георадарных исследований представителями компании Geoscanners AB (Швеция) использовались импульсные георадары серии Акула-9000С (Швеция) (рисунок 26) со сменными антенными блоками центральной частотой зондирования:

- 300 МГц (контактная антенна),
- 1000 МГц (контактная антенна).



Рисунок 26 — Запись георадарных данных представителями компании Geoscanners AB RUSSIA

Съемка всеми антенными блоками осуществлялась в пешем режиме с целью соблюдения маршрута перемещения антенны георадара по размеченным краской профилям, а также дублировалась съемкой с помощью автомобиля. Запись данных в пешем режиме осуществлялась одним сотрудником, который вез на специализированной тележке блок управления георадара, персональный компьютер и сменный антенный блок. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса и спутникового оборудования. Контактные антенные блоки 300 МГц и 1000 МГц были размещены на гибкой подвеске транспортной тележки, что обеспечивало полный контакт со сканируемой поверхностью и исключало воздушный зазор между антенной и дорожным покрытием, а также обеспечивало вертикальное перемещение антенны относительно тележки на неровностях.

К сожалению, на период георадарных исследований представители компании Geoscanners AB не располагали бесконтактными рупорными антеннами, что ограничивало возможности обеспечить сопоставимый уровень погрешности при определении толщины слоев дорожной одежды по сравнению с участниками, использующими такие решения.

Данные записаны в программном обеспечении GPRSoft-PRO. Интересной отличительной особенностью программы является возможность нормализации профилей



по географическим координатам, когда радарограммы записаны в непрерывном режиме с непостоянным шагом сканирования без датчика перемещения. Данные о местоположении ослабленных зон участником не были представлены.

Более подробно методика сбора полевых материалов, параметры записи данных, методика их обработки и характеристики оборудования представлены в отчете представителей компании Geoscanners AB (приложение Д).

#### **4.6 Компания «ЭКОИНСТРУМЕНТ»**

Во время георадарных исследований представителями компании Экоинструмент использовался импульсный георадар серии SIR (США) со сменным антенным блоком центральной частотой зондирования 400 МГц (рисунок 27).



Рисунок 27 — Запись георадарных данных представителями компании Экоинструмент

Съемка антенным блоком осуществлялась в пешем режиме с целью соблюдения маршрута перемещения антенны георадара по размеченным краской профилям, а также дублировалась съемкой с помощью автомобиля. Запись данных в пешем режиме осуществлялась одним сотрудником, который вез на специализированной тележке блок управления георадара, персональный компьютер и сменный антенный блок. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса и спутникового оборудования в дифференциальном режиме. Контактная антенна 400 МГц была размещена на гибкой подвеске транспортной тележки, что обеспечивало полный контакт со сканируемой

поверхностью и исключало воздушный зазор между антенной и дорожным покрытием, а также обеспечивало вертикальное перемещение антенны относительно тележки на неровностях. Транспортная тележка была оборудована колесами большого радиуса, что позволяет с большим удобством перемещать ее по неровным поверхностям.

Запись данных осуществлялась в программном обеспечении Radan.

К сожалению, на период георадарных исследований представители компании «ЭКОИНСТРУМЕНТ» не располагали бесконтактными рупорными антеннами, что ограничивало возможности обеспечить сопоставимый уровень погрешности при определении толщины слоев дорожной одежды по сравнению с участниками, использующими такие решения. Вместе с тем, представители компании «ЭКОИНСТРУМЕНТ» – единственные участники, представившие результаты автоматической обработки радарограмм для определения ослабленных зон с использованием технологий искусственного интеллекта. Однако представленные результаты не были привязаны к пикетажу, что не позволило оценить корреляцию с данными установки ударного нагружения.

Дополнительные материалы представителей компании «ЭКОИНСТРУМЕНТ» представлены в приложении Е.

#### **4.7 НПО «Терразонд»**

Во время георадарных исследований представителями НПО «Терразонд» использовалось оборудование серии ГРТ ХХ с бесконтактной антенной решеткой с распределенными приемными и передающими высокочастотными антеннами широкого диапазона (*линейное изменение частот 500–2000 МГц*), которая осуществляет зондирование среды с разных ракурсов (рисунок 28). Представленное многоканальное решение позволяет осуществлять сбор *7 точнопараллельных профилей* на ширину около 0,5 м с поперечным шагом между профилями 7,5 см. Антенная решетка имеет модульную структуру и обеспечивает возможность наращивания в ширину примерно до 2,2 м.



Рисунок 28 — Запись георадарных данных представителями НПО «Терразонд»

Съемка антенным блоком осуществлялась с помощью *гироскутера* со скоростью до 15 км/ч, обеспечивающей соблюдение маршрута перемещения антенны георадара по размеченным краской профилям. Максимальная скорость записи данных с помощью автомобиля ограничена скоростью до 100 км/ч. Запись данных осуществлялась одним сотрудником, который вез на специализированной тележке блок управления георадара, персональный компьютер и антенный блок. Привязка данных осуществлялась с помощью измерительного колеса и спутникового оборудования в дифференциальном режиме.

Сбор данных осуществлялся в программном обеспечении GeoLocator, обработка данных производилась в программном обеспечении GeoViewer и GeoReader. Для выявления ослаблений в процессе анализа данных использовались результаты расчета по толщинам асфальтобетонного покрытия с шагом 0,5 м в GeoReader. Для полученных значений толщин рассчитывалось среднее, а также определились максимальные и минимальные значения. Среднее значение толщины асфальтобетона равно 12 см, минимальная толщина равна 9 см, максимальная – 16 см. В качестве основного критерия определения участков ослабления дорожной конструкции рассматривалось наличие резких утолщений (просадок) верхнего слоя. Таким образом, были выделены участки со значением превышения толщины более 2 см. Далее были построены планы и трехмерные модели (.dxf) с выделением потенциально ослабленных участков различными цветами: желтый цвет соответствует толщине, равной 13 см, оранжевый – 14 см, красный – выше 15 см) (приложение Ж). Дополнительно в GeoViewer анализировались изменения

интенсивности в верхнем и нижнем слоях, временные интервалы для которых выбирались относительно среднего уровня нижней границы в окне выборки (приложение И).

Более подробно методика сбора полевых материалов, параметры записи данных, методика их обработки и характеристики оборудования представлены в отчете представителей НПО ТЕРРАЗОНД (приложение Ж).

#### **4.1 Компания ООО «ТАЙМЕР»**

Во время георадарных исследований группой компаний ООО «ТАЙМЕР» использовалось оборудование серии ГРОТ с антенным блоком центральной частотой зондирования 500 МГц и рабочей полосой частот 250–750 МГц (рисунок 29). Оборудование отличается высокой мощностью сигнала, что позволяет ему работать на глубинах, превышающих глубины инженерных изысканий.



Рисунок 29 — Запись георадарных данных представителями ООО «ТАЙМЕР»

Съемка осуществлялась в пешем режиме. Запись данных осуществлялась двумя сотрудниками, один из которых нес на себе персональный компьютер, а второй перемещал антенный блок георадара. Привязка данных осуществлялась с помощью спутникового оборудования. Контактный антенный блок 500 МГц перемещался на монольже, что обеспечивало полный контакт со сканируемой поверхностью и исключало воздушный зазор между антенной и дорожным покрытием.

Работа с георадаром и его данными осуществлялась в программном обеспечении GROT. Ослабленные зоны выделены в ручном режиме, местоположение и описание ослаблений указано в таблицах 8 и 9.



Таблица 8 – Результаты выявленных ослаблений для левой стороны дороги

ПК	Положение вдоль по профилю		Наличие ослаблений	Глубина кровли неоднородности, м	Примечание
	X1 начало	X2 конец			
	0	25	Ослабление в щебеночном слое	0,11-0,12	
	20	30	Ослабления в слое песка	0,38-0,42	
	80	90	Ослабления в слое песка	0,38-0,42	
	120	340	Ослабление, начиная с щебеночного слоя	0,12	Щебеночный слой и слой песка перемешан
	480	500	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	525	535	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	580	605	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	635	660	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности

Таблица 9 – Результаты выявленных ослаблений для правой стороны дороги

ПК	Положение вдоль по профилю		Наличие ослаблений	Глубина кровли неоднородности, м	Примечание
	X1 начало	X2 конец			
	10	19	Ослабление в щебеночном слое	0,11-0,12	
	20	30	Ослабления в слое песка	0,38-0,42	
	70	90	Ослабления в слое песка	0,38-0,42	
	110	320	Ослабление, начиная с щебеночного слоя	0,12	Щебеночный слой и слой песка перемешан
	340	420	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	480	530	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	580	605	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	635	660	Ослабления в слое песка	0,40	Возможно, связаны с изменением влажности
	625	630	Ослабление в щебеночном слое	0,12	
	670	720	Ослабление в щебеночном слое	0,12	

Более подробно методика сбора полевых материалов, параметры записи данных, методика их обработки и характеристики оборудования представлены в отчете компании ООО «ТАЙМЕР» (приложение И).

#### **4.2 ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ**

Разработчик программного обеспечения ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ представил результаты обработки и интерпретации радарограмм, записанных ФАУ «РОСДОРНИИ». Указанный программный комплекс имеет большие возможности автоматизации процесса обработки георадарных данных. Поддерживает возможности импорта данных различных георадаров. Ввиду того, что о проблемах привязки данных ФАУ «РОСДОРНИИ» с антенной 2000 МГц разработчику указанной программы было сообщено после подготовки им отчета, результаты определения толщины в программном обеспечении ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ не приводятся.

Определение ослабленных зон участник выполнял по нескольким параметрам. Участник представил три варианта отчета по результатам георадарного обследования:

- 1) Обследование рабочего слоя земляного полотна антенной 250 МГц,
- 2) Обследование дорожной одежды антенной 900 МГц,
- 3) Обследование дорожного покрытия антенной 2ГГц.

Ввиду того, что на показания установки ударного нагружения существенным образом влияет состояние грунтов рабочего слоя и основания дорожной конструкции, из указанных отчетов брались для оценки корреляции участки повышения влажности рабочего слоя земляного полотна и разуплотнений в основании дорожной одежды.

Подробные отчеты интерпретации радарограмм в программном обеспечении ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ представлены в приложении К.

#### **5 Анализ результатов**

Ввиду того, что показания установки ударного нагружения принимаются за эталон, с которым в рамках настоящих работ сравниваются результаты георадарного обследования, предъявляются высокие требования к качеству данных самой установки ударного нагружения.

Для подтверждения объективности результатов измерений установки ударного нагружения был выполнен расчет коэффициентов вариации общего модуля упругости дорожной конструкции за 2019 г.

В соответствии с ГОСТ 32729-2014 [3] коэффициент вариации измерения прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности не нормируется. В одной из работ [4], посвященной комплексной оценке надежности автомобильных дорог выделяется

четыре уровня дефектного состояния покрытий из асфальтобетонов по вероятности разрушения:

1) без колеи и износа на полосах наката, без выбоин и без трещин или с одиночными трещинами, ровное и шероховатое (площадь недопустимых неровностей менее 5 %),

2) асфальтобетонное покрытие с износом (истиранием) до 3 мм в виде колеи на полосах наката; площадь недопустимых неровностей на покрытии достигает 15 % от всей площади покрытия участка; имеются отдельные и редкие трещины; до 5 % площади покрытия занимает сетка трещин,

3) площадь неровностей на покрытии относительно всей площади участка находится в пределах от 15 % до 35 %; износ покрытия и колея наката превышают 3 мм; имеются редкие и отдельные трещины, сетка трещин занимает от 5 % до 10 % покрытия дорожной одежды, встречаются выбоины,

4) площадь неровностей на покрытии относительно всей площади участка находится в пределах от 35 % до 45 % и более; имеются частые трещины и сетка трещин; образуются выбоины.

Указанным уровням дефектного состояния соответствуют диапазоны коэффициентов вариации общего модуля упругости дорожной одежды в зависимости от срока службы с момента последнего ремонта или строительства [4]. Для дорог со сроком эксплуатации от трех до четырех лет при капитальном типе дорожных конструкций градация коэффициентов вариации следующая: уровень 1 — от 0,15 до 0,18; уровень 2 — от 0,2 до 0,25; уровень 3 — от 0,25 до 0,28; уровень 4 — от 0,3 до 0,33.

По результатам визуальной диагностики участка (дефектная ведомость в таблице 2) невозможно отнести его ни к третьему, ни к четвертому уровню дефектного состояния.

*На основании выполненных расчетов коэффициент вариации значений общего модуля упругости по прямому ходу автомобильной дороги за 2019 г. составил 0,32, а по обратному — 0,38. Видно, что указанные значения выходят за пределы значений, предусмотренных для 1, 2 и 3 уровней дефектного состояния [4] из чего можно сделать вывод, что вариативность значений общего модуля упругости на участке предельно высокая. В данной связи на корреляцию между показателями установки ударного нагружения и результатами георадарного обследования главным образом повлияет объективность и достоверность значений динамического прогиба.*

### **5.1 Наблюдения ФАУ «РОСДОРНИИ»**

Все участники исследования выполнили сбор полевых материалов в полном объеме. Наиболее технологично выглядели решения представителей компаний

«ЭКОИНСТРУМЕНТ», GeoScanners АВ и НПО «Терразонд». Это обусловлено эргономичностью процесса сбора данных, повышенным вниманием производителя оборудования к вопросам удобства и комфорта работы с прибором в полевых условиях. Аппаратура «ЭКОИНСТРУМЕНТ» и GeoScanners АВ поставляется совместно с транспортными тележками заводского исполнения, что обеспечивает быстрый монтаж и запуск оборудования в рабочий режим. Аппаратура НПО «Терразонд» обеспечивает возможность съемки при перемещении георадара электродвигателем гироскутера, на котором находился оператор. Данное решение повышает производительность обследования объектов, которые обычно сканируются в пешем режиме.

Технология сбора данных представителями ФАУ «РОСДОРНИИ», группы компаний ЛогиС-Геотех и «Радарные и сейсмические системы» является наиболее традиционной в условиях обследования естественного грунтового основания, но для обследования автомобильных дорог подобные решения применяются только при сканировании участков небольшой протяженности.

Технология сбора данных представителями компании ООО «ТАЙМЕР» наиболее продолжительна по времени, кроме того, отсутствие возможности выполнить линейную привязку по пройденному расстоянию вызвало сложности представления результатов определения толщины с пикетной привязкой. Для решения указанной сложности сотрудники ФАУ «РОСДОРНИИ» выполнили переход к пикетной привязке через координаты, полученные спутниковым оборудованием, однако представители компании ООО «ТАЙМЕР» не располагали возможностями дополнительной проверки корректности выполненных процедур.

Стоит отметить, что на результаты определения толщины слоев очень сильно влияет точность привязки данных. Сложности правильного позиционирования результатов обследования, с которыми пришлось столкнуться ФАУ «РОСДОРНИИ» показывают, что даже ошибка в 40 см при привязке результатов бурения к георадарному профилю с наклонной границей в месте бурения приводила к несоответствию абсолютных значений и относительного изменения толщины слоев для всего участка (вследствие усреднения скорости распространения электромагнитной волны для всего слоя). Датчики перемещения, используемые при линейной привязке результатов георадарного обследования, фактически должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к средствам измерения расстояний. Кроме того, траектория движения георадара должна быть зафиксирована на местности с целью возможности контроля результатов георадарного обследования. Очевидно, что при выполнении большого объема георадарных работ на автомобильных дорогах точная линейная привязка не удовлетворяет

требованиям производительности сбора данных. Позиционирование результатов георадарного обследования спутниковым оборудованием – наиболее перспективное направление развития в применении метода георадиолокации, однако, при определении траектории движения антенного блока георадара спутниковым оборудованием существует также множество факторов, оказывающих влияние на точность привязки. Большинству разработчиков георадарного оборудования следует предусматривать специально адаптированные и апробированные решения координатной привязки георадарных данных. Примером может служить технология мобильного лазерного сканирования.

По результатам анализа представленных участниками радарограмм, можно сделать вывод, что полученная информация принципиально не отличится для данных, записанных на сопоставимых частотах разным оборудованием. Видимость границ слоев, просадок, изменений дорожных конструкций, наличие переотражений сигнала примерно одинаково для всех представленных в ходе исследования приборов. В т. ч. у ФАУ «РОСДОРНИИ» имелся опыт двухлетнего мониторинга участка, который свидетельствует о повторяемости результатов георадарного обследования.

При определении толщины слоев полностью автоматические решения применены представителями компаний «ЭКОИНСТРУМЕНТ» и «Геоэксперт». Полуавтоматическое определение толщины слоев выполнено ФАУ «РОСДОРНИИ» и НПО «Терразонд».

При определении ослабленных зон автоматические решения использовались ФАУ «РОСДОРНИИ», НПО «Терразонд» и ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. Представители компании «ЭКОИНСТРУМЕНТ» подготовили дополнительные материалы (приложение Ж), из которых виден результат работы нейронных сетей по определению аномальных зон, однако представленные материалы не имели привязки и не учтены в подразделе 5.3 настоящего отчета. Ввиду того, что георадары могут использоваться для обнаружения аномалий различной природы, не обязательно связанных с ослаблениями дорожной конструкции, не во всех случаях местоположение выявленных изменений георадарного профиля будет совпадать с результатами изменения динамического прогиба.

Также стоит отметить, что используемое участниками оборудование не всегда было сопоставимо по техническим характеристикам. Типы георадаров, диапазоны частот сканирования и виды антенн указаны в таблице 10.

Таблица 10 — Параметры георадарного оборудования

Участник	Тип георадара	Частота антенных блоков, МГц	Тип антенны	Мультиканальная антенная решетка
ФАУ «РОСДОРНИИ»	Импульсный	250	Контактная	–
		900	Контактная	–
		2000	Бесконтактная	–
«ЛогиС-Геотех»	Импульсный	400	Контактная	–
		1000	Бесконтактная	–
		2000	Бесконтактная	–
ООО «ТАЙМЕР»	Моноимпульсный (видеоимпульсы)	500	Контактная	–
«Геоэксперт»	Ступенчато-частотная модуляция	1100-1800	Бесконтактная	–
Geoscanners AB RUSSIA	Импульсный	300	Контактная	–
		1000	Контактная	
«ЭКОИНСТРУМЕНТ»	Импульсный	400	Контактная	–
НПО «Терразонд»	Линейно-частотная модуляция	500-2000	Бесконтактная	+

Общие параметры применяемого программного обеспечения для обработки данных приведены в таблице 11.

Таблица 11 — Параметры программного обеспечения для обработки данных

Участник	Название ПО	Способ использования	Определение толщины слоев	Автоматический поиск аномалий	Способы привязки данных
ФАУ «РОСДОРНИИ»	GeoReader	Не зависимо от оборудования	+	+	Координатная, линейная
«ЛогиС-Геотех»	GeoScan 32	В составе оборудования	+	-	Координатная, линейная
ООО «Таймер»	GROT	В составе оборудования	+	-	Координатная
ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ	ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ	Не зависимо от оборудования	+	+	Линейная, нет данных о координатной привязке
«Геоэксперт»	Без названия	Специализированная разработка для внутреннего пользования	+	н\д	Координатная, линейная
Geoscanners AB RUSSIA	GPRSoft-PRO	В составе оборудования	+	-	Координатная, линейная
«ЭКОИНСТРУМЕНТ»	Radan	В составе оборудования	+	н\д	Координатная, линейная
	Обработка данных нейросетью	Специализированная разработка для внутреннего пользования	н\д	+	н\д
НПО «Терразонд»	GeoViewer	В составе оборудования	-	+	Координатная, линейная
	GeoReader	Не зависимо от оборудования	+	+	Координатная, линейная



## **5.2 Определение толщины слоев**

В данном разделе представлены результаты выгрузки таблиц (таблицы 12–15) из программного обеспечения для обработки георадарных данных различных производителей. Несмотря на известные результаты бурения по всем выработкам (кроме контрольных точек: ПК 1 + 28,6 и 6 + 54,6), участниками продемонстрированы расхождения результатов обследования с данными выработок из-за усреднённых свойств слоев.

Таблица 12 — Определение толщины слоев

ПК	Полоса	Значения толщины, см									
		По керна м	РОСДОРНИ И калибровка по кернам	РОСДОРНИ И метод амплитуд	ЛогиС- Геотех	ГЕОЭКСПЕР Т толщина по приложению к таблицам определения толщин	ГЕОЭКСПЕР Т толщина по таблицам определения толщин	ГЕОСКАННЕ РС	ТЕРРАЗОН Д	ЭКОИНСТРУМЕ НТ	ТАЙМЕ Р
Асфальтобетон											
1+28,6	правая	11,5	11,3	10,9	10,1	11,5	10,5	12,5	11,9	26,7	12
3+68,4	правая	11,0	11,6	10,7	11,2	11,0	10,5	12,8	10,5	32,6	10
4 +28,2	левая	11,0	11,1	10,5	10,9	11,0	10,3	15,9	11,3	15,0	12
5+07,5	правая	13,0	12,8	12,3	13,1	12,0	10,6	15,0	13,4	13,8	10
6+54,6	левая	11,0	12,4	12,1	11,3	11,5	10,5	18,8	11,5	14,4	12
ЩПС											
1+28,6	правая	34,5	26,7		30,2	35,5	21,4	25		27,2	21
3+68,4	правая	18,5	21,7		18,6	23,0	24	22		33,1	27
4 +28,2	левая	26,0	26,0		26,5	28,0	23,4	38		15,6	27
5+07,5	правая	31,3	30,0		29,2	33,0	25,8	21		14,4	27
6+54,6	левая	28,0	26,0		20,1	33,0	17,0	38		15	32
Песок											
1+18,0	правая	22,0	21,9		26,5		19,5				21
4+77,0	правая	33,0			36,9		23,4				27
6+84,0	левая	35			39,8		22,3				21

Таблица 13 — Расхождения при определении толщины слоев в см

ПК	Полоса	Расхождение, см								
		РОСДОРНИИ калибровка по кернам	РОСДОРНИИ метод амплитуд	ЛогиС- Геотех	ГЕОЭКСПЕРТ толщина по приложению к таблицам определения толщин	ГЕОЭКСПЕРТ толщина по таблицам определения толщин	ГЕОСКАННЕРС	ТЕРРАЗОНД	ЭКОИНСТРУМЕНТ	ТАЙМЕР
Асфальтобетон										
1+28,6	правая	0,2	0,6	1,4	0	1,0	-1,0	-0,4	-15,2	-0,5
3+68,4	правая	-0,6	0,3	-0,2	0	0,5	-1,8	0,5	-21,6	1,0
4 +28,2	левая	-0,1	0,5	0,1	0	0,7	-4,9	-0,3	-4,0	-1,0
5+07,5	правая	0,2	0,7	-0,1	1,0	2,4	-2,0	-0,4	-0,8	3,0
6+54,6	левая	-1,4	-1,1	-0,3	-0,5	0,5	-7,8	-0,5	-3,4	-1,0
ЩПС										
1+28,6	правая	7,8		4,3	-1,0	13,1	9,5		7,3	13,5
3+68,4	правая	-3,2		-0,1	-4,5	-5,5	-3,5		-14,6	-8,5
4 +28,2	левая	0		-0,5	-2,0	2,6	-12,0		10,4	-1,0
5+07,5	правая	1,3		2,1	-1,7	5,5	10,3		16,9	4,3
6+54,6	левая	2,0		7,9	-5,0	11	-10,0		13,0	-4,0
Песок										
1+18,0	правая	0,1		-4,5		2,5				1,0
4+77,0	правая			-3,9		9,6				6,0
6+84,0	левая			-4,8		12,7				14,0

Таблица 14 — Расхождения при определении толщины слоев

ПК	Полоса	Расхождение, %								
		РОСДОРНИИ калибровка по кернам	РОСДОРНИИ метод амплитуд	Логис- Геотех	ГЕОЭКСПЕРТ толщина по приложению к таблицам определения толщин	ГЕОЭКСПЕРТ толщина по таблицам определения толщин	ГЕОСКАННЕРС	ТЕРРАЗОНД	ЭКОИНСТРУМЕНТ	ТАЙМЕР
Асфальтобетон										
1+28,6	правая	1,74	5,22	12,17	0,00	8,70	-8,70	-3,48	-132,17	-4,35
3+68,4	правая	-5,45	2,73	-1,82	0,00	4,55	-16,36	4,55	-196,36	9,09
4 +28,2	левая	-0,91	4,55	0,91	0,00	6,36	-44,55	-2,73	-36,36	-9,09
5+07,5	правая	1,54	5,38	-0,77	7,69	18,46	-15,38	-3,08	-6,15	23,08
6+54,6	левая	-12,73	-10,00	-2,73	-4,55	4,55	-70,91	-4,55	-30,91	-9,09
ЩПС										
1+28,6	правая	22,61		12,46	-2,90	37,97	27,54		21,16	39,13
3+68,4	правая	-17,30		-0,54	-24,32	-29,73	-18,92		-78,92	-45,95
4 +28,2	левая	0,00		-1,92	-7,69	10,00	-46,15		40,00	-3,85
5+07,5	правая	4,15		6,71	-5,43	17,57	32,91		53,99	13,74
6+54,6	левая	7,14		28,21	-17,86	39,29	-35,71		46,43	-14,29
Песок										
1+18	правая	0,45		-20,45		11,36				4,55
4+77	правая			-11,82		29,09				18,18
6+84	левая			-13,71		36,29				40,00

Примечание – Красным цветом выделена погрешность по модулю более 10 %, зелёным – до 10 %.

Таблица 15 — Корреляция толщин слоев

Коэффициент корреляции								
РОСДОРНИ И калибровка по кернам	РОСДОРНИ И метод амплитуд	ЛогиС- Геотех	ГЕОЭКСПЕРТ толщина по приложению к таблицам определения толщин	ГЕОЭКСПЕ РТ толщина по таблицам определения толщин	ГЕОСКАНН ЕРС	ТЕРРАЗОНД	ЭКОИНСТР УМЕНТ	ТАЙМЕР
Асфальтобетон								
0,65	0,62	0,77	0,86	0,66	-0,14	0,93	-0,34	-0,53
ЩПС								
0,82		0,82	0,97	-0,15	-0,02		-0,41	-0,42
Песок								
		1,00		0,91				0,37

Примечание – Красным цветом выделен коэффициент корреляции по модулю менее 0,5, зелёным – более 0,5.



Выводы.

1) Лучший результат по корреляции толщины асфальтобетона между данными бурения и георадарной съемки принадлежит НПО «Терразонд». Наиболее точные абсолютные значения толщины асфальтобетона получены группой компаний ЛогиС-Геотех.

2) Лучший результат по корреляции толщины слоя из ЩПС между данными бурения и георадарной съемки принадлежит компании «Геоэксперт». Наиболее точные абсолютные значения толщины слоя из ЩПС получены группой компаний ЛогиС-Геотех.

3) Лучший результат по корреляции толщины песчаного слоя между данными бурения и георадарной съемки принадлежит группе компаний ЛОГИС-ГЕОТЕХ.

### 5.3 Оценка корреляции результатов георадарного обследования с результатами измерений установками ударного нагружения

Оценка корреляции результатов георадарного обследования с результатами измерений установки ударного нагружения выполнена посредством применения функций корреляционного и вариационного анализа (таблицы 16 и 17).

Таблица 16 — Представление результатов применения функции статистического анализа для правой полосы дороги

	ФАУ «РОСДОРНИИ»	ГЕОРАДАР- ЭКСПЕРТ (анализ влажности земполотна)	ГЕОРАДАР- ЭКСПЕРТ (анализ разуплотнений основания дорожной одежды)	Геоэксперт	Терразонд	ЛогиС- Геотех	Таймер
Коэффициент вариации	21%	29%	82%	47%	38%	59%	15%
Коэффициент корреляции	-17%	14%	-10%	11%	27%	-12%	-7%
<b>Примечания</b> 1 Коэффициент вариации. Совокупность считается однородной, если коэффициент вариации (V) не превышает 33 %. $V < 10\%$ вариация признака слабая; $10\% < V < 25\%$ – вариация средняя; $V > 25\%$ – вариация сильная. 2 Считается, что коэффициент корреляции менее 33 % говорит о слабой связи, от 33 % до 66 % – о средней связи, более 66 % – о сильной связи.							

Таблица 17 — Представление результатов применения функции статистического анализа для левой полосы дороги

	ФАУ «РОСДОРНИИ»	ГЕОРАДАР- ЭКСПЕРТ (анализ влажности земполотна)	ГЕОРАДАР- ЭКСПЕРТ (анализ разуплотнений основания дорожной одежды)	Геоэксперт	Терразонд	ЛогиС- Геотех	Таймер
Коэффициент вариации	36%	29%	99%	54%	40%	54%	26%
Коэффициент корреляции	-45%	19%	-27%	-1%	38%	-17%	-39%
<p>Примечания</p> <p>1 Коэффициент вариации. Совокупность считается однородной, если коэффициент вариации (V) не превышает 33 %. <math>V &lt; 10\%</math> вариация признака слабая; <math>10\% &lt; V &lt; 25\%</math> – вариация средняя; <math>V &gt; 25\%</math> – вариация сильная.</p> <p>2 Считается, что коэффициент корреляции менее 33 % говорит о слабой связи, от 33 % до 66 % – о средней связи, более 66 % – о сильной связи.</p>							

Высокое значение коэффициента вариации говорит о значительных отклонениях в однородности массива данных. Низкие значения коэффициента корреляции говорят об отсутствии в сходимости данных георадара и установки ударного нагружения.

Анализ данных по правой полосе свидетельствует о том, что:

- слабую вариацию не обеспечил ни один из участников, что может быть следствием высокой вариации модулей упругости, полученных установкой динамического нагружения,
- среднюю вариацию обеспечивают ООО «Таймер» и ФАУ «РОСДОРНИИ»,
- сильную вариацию имеет ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ (процедура атрибутивного анализа -анализ влажности земполотна) (таблицы 16 и 17),
- данные остальных участников указывают на их неоднородность,
- сильную и среднюю корреляцию не обеспечивает ни один из участников,
- слабую корреляцию показали все участники.

Анализ данных по левой полосе свидетельствует о том, что:

- слабую и среднюю вариацию не обеспечил ни один из участников,
- сильную вариацию имеет ООО «Таймер» и ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ (процедура атрибутивного анализа -анализ влажности земполотна) (таблицы 16 и 17),
- данные остальных участников указывают на их неоднородность,
- сильную корреляцию не обеспечивает ни один из участников,
- среднюю корреляцию обеспечивает ФАУ «РОСДОРНИИ», ООО «Таймер» и НПО «Терразонд»,
- слабую корреляцию показали все остальные участники.

*Отрицательный коэффициент корреляции свидетельствует, что участник определил зоны снижения динамического прогиба и, как следствие, повышения модуля упругости.*

Графики, наглядно демонстрирующие зависимость динамического прогиба от местоположения аномалий, выявленных участниками для правой (прямой ход) и левой (обратный ход) стороны дороги, представлены на рисунках 30 и 31.

Графики, демонстрирующие положение участков дороги, на которых обнаружены аномалии всеми участниками, представлены на рисунках 32 и 33.

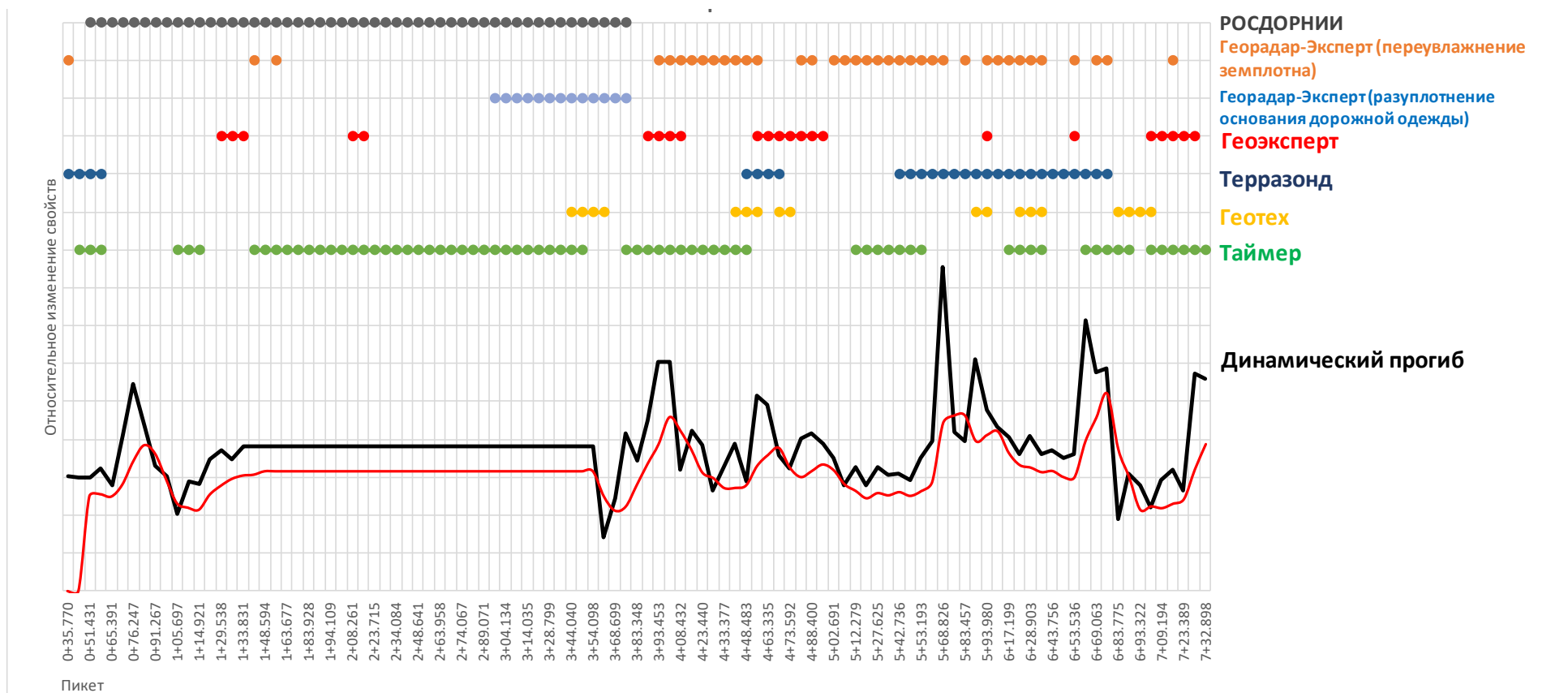


Рисунок 31 — Зависимость динамического прогиба от местоположения аномалий по правой стороне дороги (прямой ход)

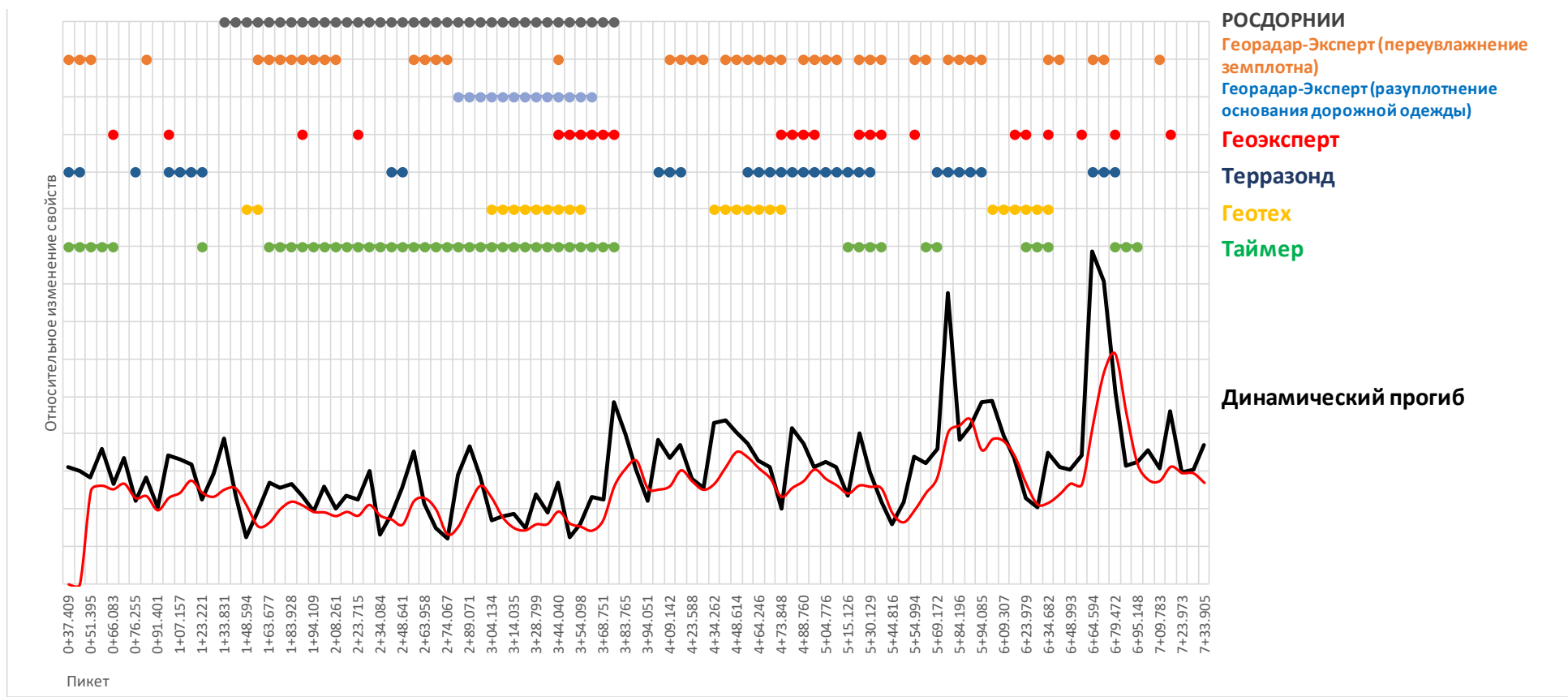


Рисунок 32 — Зависимость динамического прогиба от местоположения аномалий по левой стороне дороги (обратный ход)



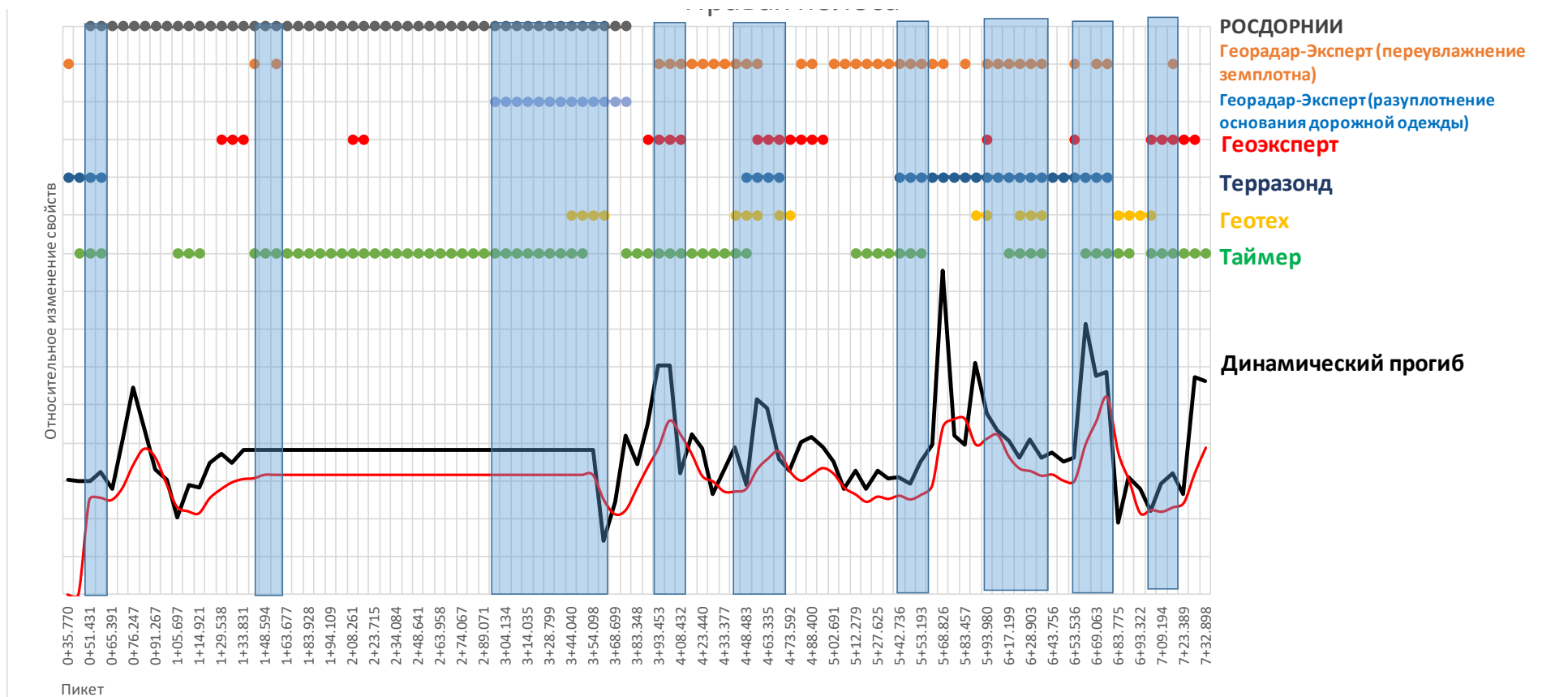


Рисунок 33 — Участки с найденными аномалиями всеми участниками по правой стороне дороги (прямой ход)

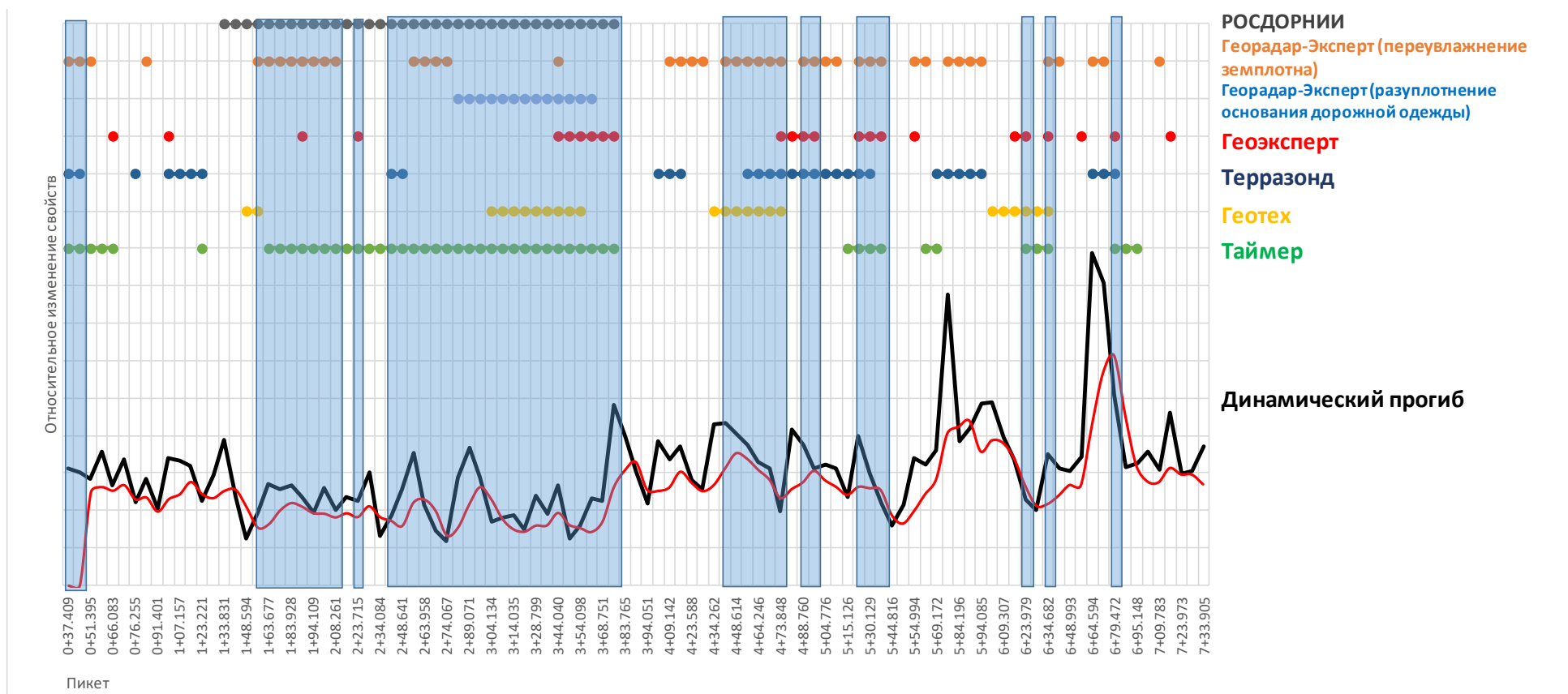


Рисунок 34 — Участки с найденными аномалиями всеми участниками по левой стороне дороги (обратный ход)

#### 5.4 Контрольная проверка результатов георадарного обследования

Бурение и отбор кернов выполнялись параллельно полевым георадарным работам. Проходка выработок в щебеночно-песчаном слое выполнена после демонтажа асфальтобетонных слоев. Шурфы прокопаны экскаватором после частичного демонтажа щебеночно-песчаного слоя.

ФАУ «РОСДОРНИИ» определение толщины слоев выполнялось двумя способами: методом амплитуд без калибровки по данным бурения (только для асфальтобетона), по результатам калибровки по данным бурения (для всех слоев дорожной одежды). Компаниями «Геоэксперт» и «ЭКОИНСТРУМЕНТ» толщина слоев определена автоматически. Компанией «Геоэксперт» представлены значения толщины дорожной одежды в двух разделах своего отчета, при этом значения на одних и тех же пикетах отличаются друг от друга.

Ранее отмечалось, что верификация правильности определения толщины асфальтобетона и щебеночного слоев дорожной конструкции выполнялась на контрольных точках. Всего было две контрольные точки на ПК 1 + 28,6 справа и ПК 6 + 54,6 слева. Данные о результатах бурения по трем оставшимся скважинам и трем шурфам были переданы участникам в полном объеме для выполнения ими калибровки георадарных профилей.

Определить толщину асфальтобетонного слоя на указанных двух контрольных точках с погрешностью до 10 % удалось (таблица 14): ФАУ «РОСДОРНИИ» методом амплитуд без учета результатов бурения (5,2 % и 10 % по модулю соответственно); «Геоэксперт» на основании представленных толщин по приложению к таблицам определения толщин (0 % и 4,5 % по модулю соответственно); «Геоэксперт» на основании представленных толщин по таблицам определения толщин (8,7 % и 4,6 % по модулю соответственно); «Терразонд» (3,5 % и 4,6 % по модулю соответственно); «ТАЙМЕР» (4,4 % и 9,1 % по модулю соответственно).

Коэффициенты корреляции определения толщины асфальтобетона сравнительно с результатами бурения по всем пяти выработкам распределились по степени снижения достоверности следующим образом: «Терразонд» (0,93), «Геоэксперт» на основании толщины по приложению к таблицам определения толщин (0,86), ЛогиС-Геотех (0,77), «Геоэксперт» на основании толщины по таблицам определения толщин (0,66), ФАУ «РОСДОРНИИ» калибровка по кернам (0,65), ФАУ «РОСДОРНИИ» методом амплитуд без учета результатов бурения (0,62), «ТАЙМЕР» (0,53) (таблица 15).

Определить толщину слоя из ЩПС на всех контрольных точках с погрешностью до 10 % не удалось ни одному из участников.

Подавляющее большинство участников сходилось во мнении, что на участках, где дорожная конструкция имеет геосинтетический материал (ПК 0 + 40 – 1 + 40, а также ПК 3 + 60 – 7 + 20), имеется накопление влаги на контакте слоя асфальтобетона и щебеночно-песчаной смеси, полученное в результате мокрой очистки поверхности асфальтобетонного покрытия перед выполнением сопоставительных работ. Обусловлено это было переотражением сигнала под слоем асфальтобетона (рисунок 35).

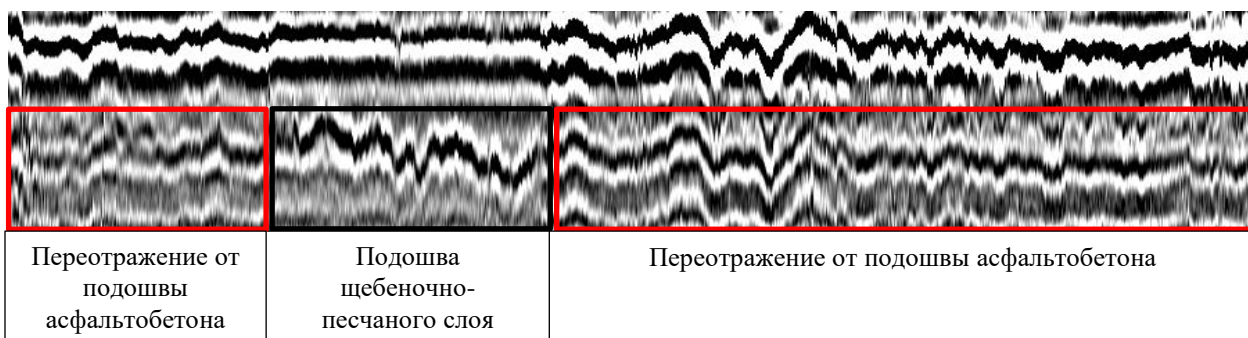


Рисунок 35 — Участок радарограммы с переотражением сигнала (данные группы компаний ЛогиС-Геотех, антенна 1000 МГц)

При послойном демонтаже дорожной конструкции шурфование в местах отбора асфальтобетонных кернов не показало наличие воды в слое из щебеночно-песчаной смеси (рисунок 36). Отбор проб из грунтов рабочего слоя дорожной конструкции в специально прокопанных экскаватором шурфах (рисунок 37) в лабораторных условиях показал степень влажности, близкую к оптимальной (таблица 18).

Таблица 18 — Протокол определения влажности песка

Описание проб	Образец № 1 ПК 1+18,0	Образец № 2 ПК 4+77,0	Образец № 3 ПК 6+84,0	Нормативная документация на метод испытания
Масса навески в состоянии естественной влажности, г	1497,80	1291,68	1368,56	ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний
Масса навески в сухом состоянии, г	1357,30	1242,08	1294,65	
Влажность песка, % (по массе)	10,35	3,99	5,71	

При этом в шурфе на ПК 1 + 18 заметно ниже рабочего слоя дорожной конструкции практически у подошвы шурфа в слое глины действительно наблюдался выход грунтовых вод, при этом влажность песка достигала 10,35 %.





Рисунок 36 — Места проходки шурфов в слое из щебеночно-песчаной смеси



Рисунок 37 — Места проходки шурфов в песчаном и рабочем слое дорожной конструкции

Сопоставление результатов георадарного обследования с измерениями упругого прогиба показывает коэффициент корреляции, не превышающий 0,5, что не является достаточно достоверным (сильным) показателем. Очевидно, что исследования должны быть продолжены на большей выборке экспериментальных объектов.

Ввиду того, что по правой полосе дороге измерение динамического прогиба не было выполнено на ПК 1 + 40 – ПК 3 + 60, результаты являются менее показательными.

По левой стороне дороги прослеживается корреляция между показаниями динамического прогиба и местоположением аномалий, обнаруженных участниками:



- на основании результатов атрибутивного анализа (автоматизировано):
  - 1) 45 % («РОСДОРНИИ»);
  - 2) 27 % (разуплотнение основания, ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ);
- на основании анализа просадок дорожной одежды (автоматизировано) – 38 % (Терразонд);
- по интерпретации эксперта компании – 0,39 % (Таймер).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании работ на объекте «Автомобильная дорога А-107 «Московское Малое Кольцо между Киевским и Минским шоссе, рядом с деревней Кобяково и пос. НИИ Радио» установками ударного нагружения (FWD) и георадарами можно сделать следующие выводы.

1) Георадарное оборудование позволяет решать задачу по определению толщины слоев дорожной конструкции. Указанная задача наилучшим образом была решена георадарами, работающими с отрывом от поверхности.

2) Местоположение аномальных зон также было выявлено всей линейкой используемых георадаров, при этом лучшие результаты были получены контактными антенными блоками.

3) Имеется сходимость результатов георадарного обследования в части местоположения аномальных зон и результатов измерения динамического прогиба установками ударного нагружения. Определенные участниками аномальные зоны имеют неполную корреляцию с данными установки ударного нагружения. Причиной тому может быть как большая вариация измерений динамического прогиба по данным установки ударного нагружения, так и тот факт, что георадар помимо местоположения ослаблений дополнительно указывает аномалии различной природы.

4) В части доработки технологий интерпретации георадарных данных целесообразно идти по пути повышения автоматизации и снижения экспертозависимости метода.

5) Георадары с линейным и ступенчатым изменением частоты позволили получить данные, не имеющие принципиальных отличий от данных импульсных георадаров. Тем не менее, применение подобных систем является наиболее перспективным развитием метода, поскольку позволяет оказаться от необходимости замены антенных блоков в ходе полевых работ.

6) С целью развития возможностей совместного применения георадаров и установок ударного нагружения необходимо выполнить комплекс дополнительных исследовательских работ, в том числе на специально подготовленных экспериментальных полигонах.

7) Целесообразно продолжать углубленно анализировать полученные результаты. Так, в ходе сопоставительных испытаний было использовано большое количество георадаров различных конструкций, сами работы были выполнены на участках с различными конструкциями дорожных одежд на достаточно большой протяженности,

получено огромное количество графиков и сопоставительных результатов. Представляется целесообразным получить обратную связь и мнения (предложения и замечания) от участников о представленных в отчете результатах при проведении сопоставительных испытаний. После чего дальнейший детальный анализ позволит сделать более углубленные выводы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ результатов мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния опытно-экспериментальных полигонов испытания геосинтетических материалов, построенных в рамках строительства временных автомобильных дорог пятого пускового комплекса Центральной кольцевой автомобильной дороги (А-113) [Текст]. – Москва, 2019.

2. A. Kulizhnikov, R. Eremin and A. Kuznetsov /Survey of Ground Penetrating Radar Methods of the Contact Boundaries of the Layers of the Road Construction/ Engineering and Mining Geophysics 2019 15th Conference and Exhibition. 16 April 2019.

3. ГОСТ 32729-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности

4. Кокодеева Н.Е. Методологические основы комплексной оценки надежности автомобильных дорог в системе технического регулирования дорожного хозяйства: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Санкт-Петербург, 2012.