ФЕДЕРАЛЬНОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
РОСДОРНИИ

Анализ применения георадарных технологий по результатам сопоставительных испытаний

Еремин Р.А., кандидат технических наук, заместитель начальника управления методов проектирования автомобильных дорог ФАУ «РОСДОРНИИ»

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель первого мероприятия, проведенного в 2019 г.

Обоснование требований к новейшей передвижной дорожной лаборатории, концепция которой прорабатывалась в ФАУ «РОСДОРНИИ» с 2018 г.

Задачи:

1) оценить погрешность определения толщины слоев дорожной одежды с калибровкой разрушающими методами и толщины асфальтобетона с калибровкой неразрушающим способом над металлическим листом;

2) установить возможность определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции с выявлением местоположения областей ослабления в слоях дорожной конструкции;

3) оценить корреляционную зависимость результатов георадарного обследования и динамического нагружения в определении ослабленных зон основания дорожных конструкций;

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Цель второго мероприятия, которое было проведено в 2022 г.

Повышение производительности, достоверности и технологичности существующих подходов, а также методик инженерных изысканий и обследований автомобильных дорог с выявлением лучших практик и программных решений скоростной и высокоавтоматизированной обработки и интерпретации георадарных данных

Задачи:

1) определение производительных и эффективных алгоритмов, методов и технологий оценки внутренней структуры и состояния дорожных конструкций;

2) выявление наиболее эффективного комплекса георадиолокационного оборудования и программного обеспечения для решения дорожных задач (определение толщины слоев дорожной одежды и местоположения ослабленных зон в дорожных конструкциях, а также их характеристик);

3) оценка возможности применения алгоритмов искусственного интеллекта в обработке результатов георадарного обследования автомобильных дорог.

ОТЛИЧИЕ ДОРОЖНЫХ И УНИВЕРСАЛЬНЫХ ГЕОРАДАРОВ

1. Требуемая разрешающая способность данных на глубину дорожной конструкции;
2. Высокая производительность сбора георадарных данных на участках большой протяженности и по ширине автомобильной дороги;
3. Возможность перемещения георадара в транспортном потоке;
4. Вспомогательное оборудование для привязки георадарных профилей должно обеспечивать точное плановое и высотное позиционирование георадара в пространстве в пределах проезжей части;
5. Программное обеспечение должно иметь возможность решать прикладные задачи, такие как определение толщины конструктивных слоев дорожной одежды и обнаружения областей неоднородности свойств в слоях основания, а также возможность встраивания результатов георадарного обследования в комплексные цифровые модели инженерных изысканий и обследований автомобильных дорог.

Дорожный георадар, как правило, закреплен на транспортном средстве, антенный модуль либо размещается на подвесном кронштейне, либо опирается на колеса, комплекс оснащен высокоточными системами позиционирования, например, ГНСС приёмником и инерциальным навигационным модулем с дублированием перемещения по одометру, сам антенный модуль обладает функцией многоканальности и мультичастотности.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАМКАХ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ 2019 Г.

В рамках исследования выполнены:

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, влажности образцов,

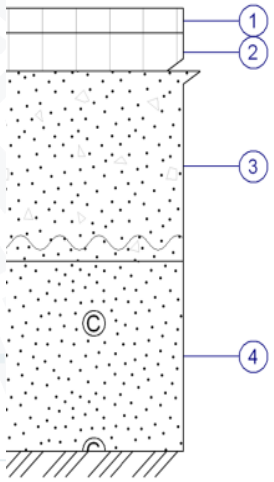
4) интерпретация радарограмм с учетом результатов контрольного бурения,

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 выводов о возможности определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости дорожной конструкции и оценка корреляционной зависимости методов.

ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОЛИГОН И МЕТОДИКА РАБОТ



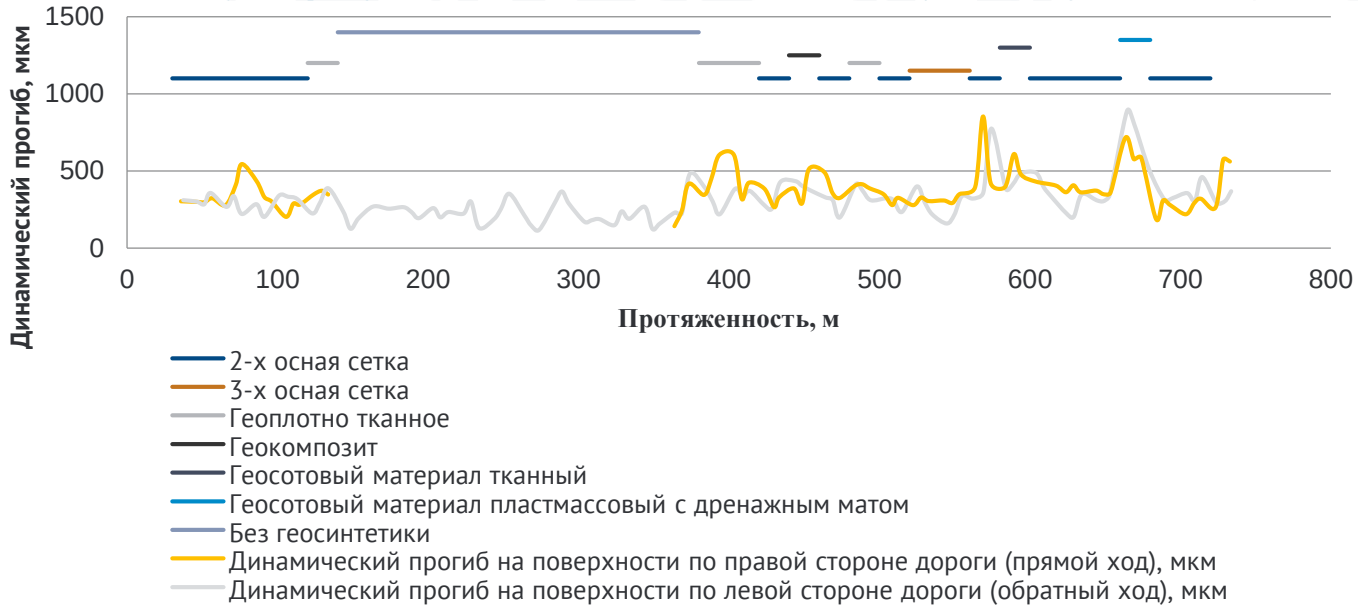
1 — асфальтобетон горячей укладки плотный I марки, из щебеночной (гравийной) смеси типа А, марка битума БНД/БН-60/90;

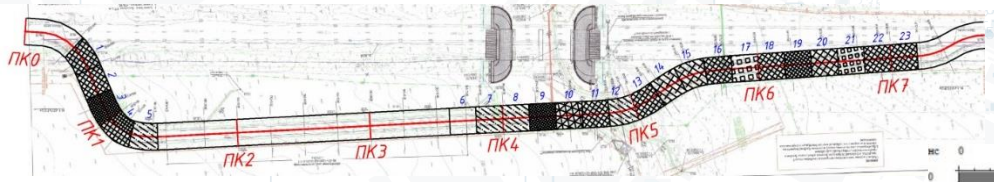
2 — асфальтобетон горячей укладки пористый II марки из крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси марка битума БНД/БН 60-90;

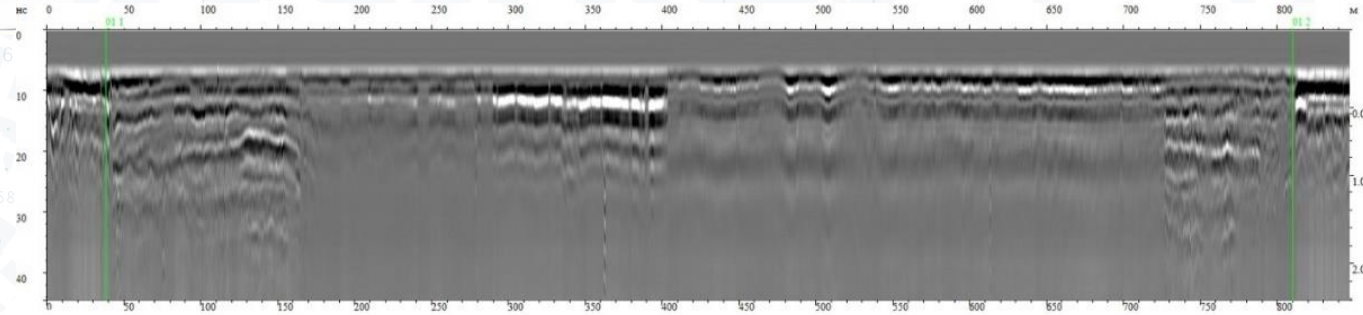
3 — смеси щебеночные с непрерывной гранулометрией С4 - 80 мм (для оснований);

геосинтетический материал (если устроен);

5 — песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 0 %.







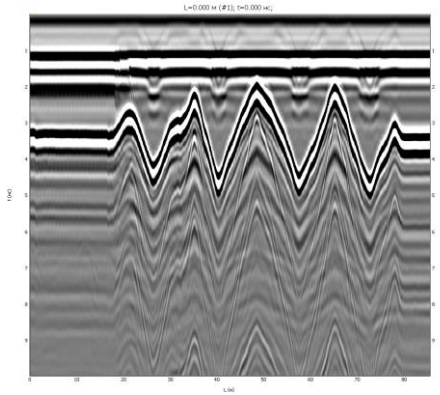
ГЕОРАДАРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

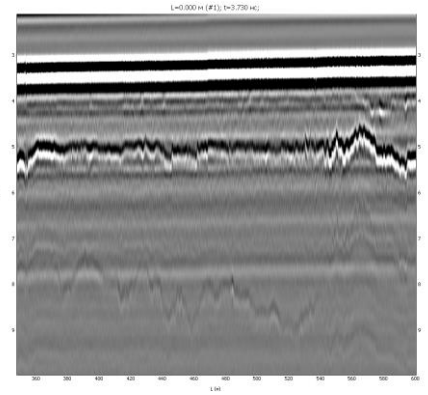
Георадар	Центральная частота или частотный диапазон, МГц	Технология	Тип антенны
ОКО-3	250 400 700 1000 2000	Импульсная	Контактная Контактная Контактная Бесконтактная Бесконтактная
ГРТ-3	500-2000	Линейное изменение частоты	Бесконтактная
ГРОТ	500	Моноимпульсная (видеоимпульсная)	Контактная
ГРОТ	500	Моноимпульсная (видеоимпульсная)	Контактная
Геоэксперт	1100-1800	Ступенчатое изменение частоты	Бесконтактная
Zond	300	Импульсная	Контактная
Акула-9000С	300 1000	Импульсная	Контактная Контактная
SIR	400	Импульсная	Контактная

1. ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

Калибровка разрушающими методами

Асфальтобетон	Несущий слой основания (Щебеночная смесь)	Дополнительный слой основания (Песок)
Минимальная погрешность – 0,4 см	Минимальная погрешность – 3,0 см	Минимальная погрешность – 0,1 см
Средняя погрешность – 1,2 см	Средняя погрешность – 5,9 см	Средняя погрешность – 4,9 см

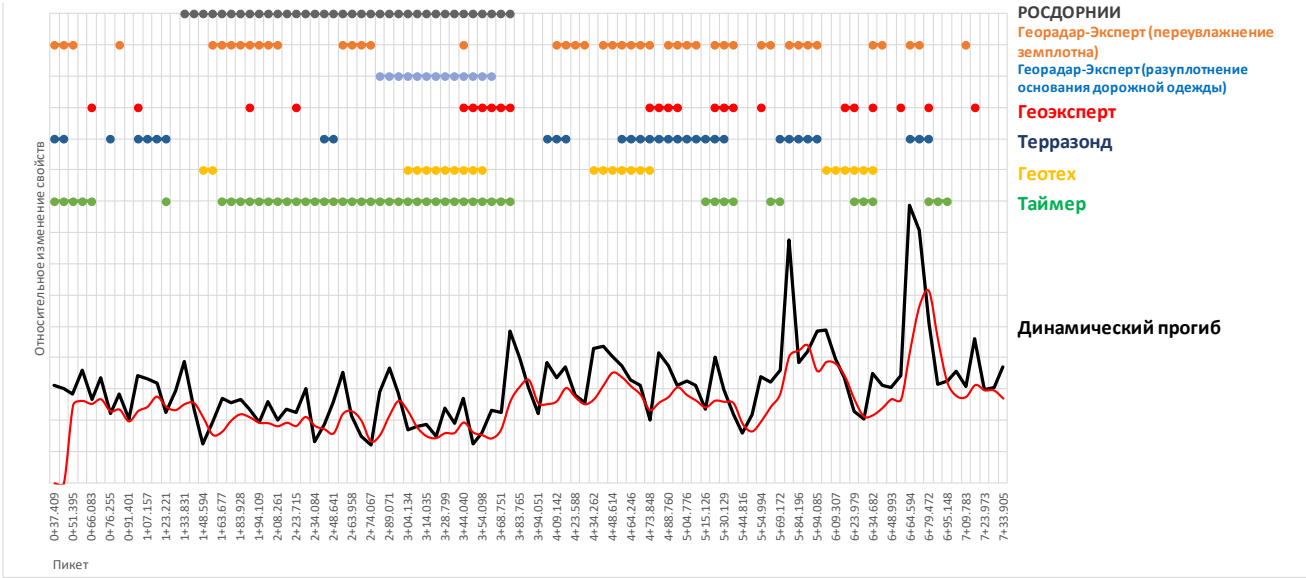


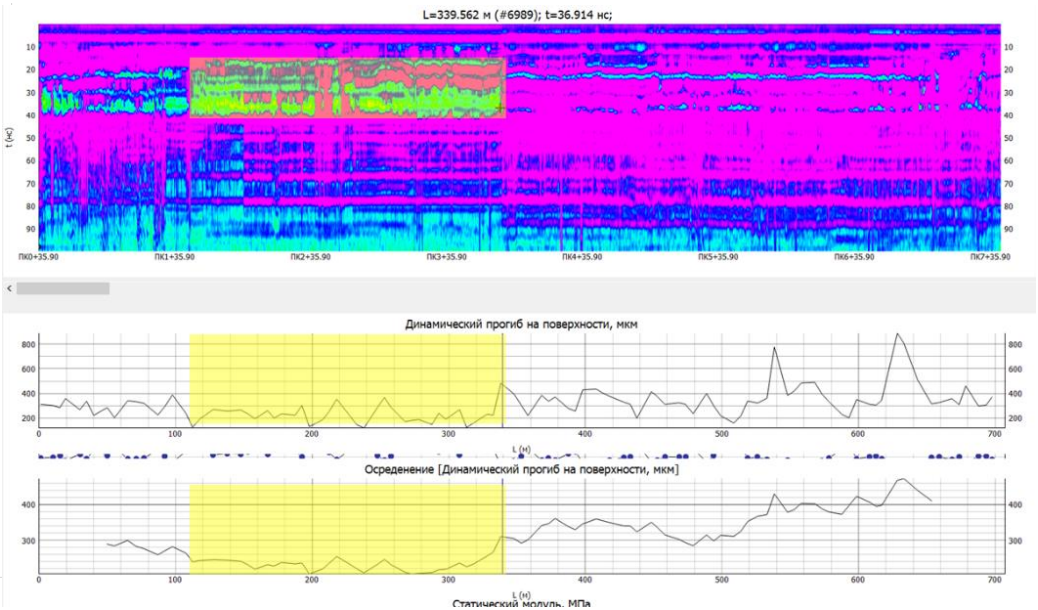


Калибровка неразрушающими методами

Средняя погрешность определения толщины асфальтобетона - 0,6 см

2. ОПРЕДЕЛЕНИЯ УЧАСТКОВ СНИЖЕНИЯ ОБЩЕГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ДОРОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ





Участник №	1	2	3	4	5
Коэффициент корреляции, %	-45	-27	38	-17	-39

Расчет коэффициента корреляции выполнялся по формуле (1).

$$Correl\ (X,Y) = \frac{\sum(x_i - x_{\text{средн.}})(y_i - y_{\text{средн.}})}{\sqrt{(x_i - x_{\text{средн.}})^2 * (y_i - y_{\text{средн.}})^2}} \quad (1)$$

где x_i – зависимая переменная (наличие ослабленной зоны), y_i - независимая переменная (прогиб дорожного покрытия).

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАМКАХ СОПОСТАВИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ 2022 Г.

В рамках исследования выполнены:

1) определение маршрута, подготовка и разметка 8 контрольных участков длиной по 1000 м каждый для проведения калибровки георадарной съемки и оценки результатов участников,

2) сбор георадарных данных участниками и собственным оборудованием ФАУ «РОСДОРНИИ» по крайней правой полосе каждого из направлений движения автомобильной дороги с заездом на укрепленную обочину на контрольных участках,

3) калибровочные измерения толщины слоев дорожной одежды методом зондирования на переменной базе взамен разрушающих методов,

4) измерение прогиба дорожного покрытия,

5) интерпретация радарограмм с учетом результатов калибровочного зондирования,

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

7) совместный анализ результатов интерпретации радарограмм и результатов измерения упругого прогиба дорожной конструкции,

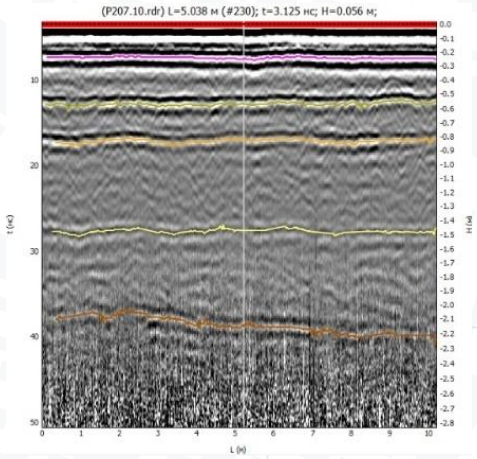
7) Подготовка и оценка результатов участников

ОБЪЕКТ ОБСЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА РАБОТ

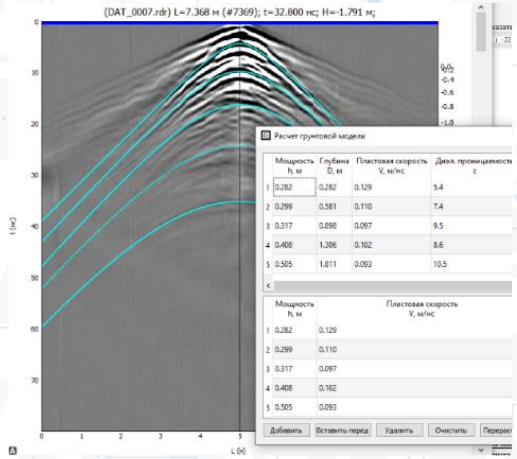
1 — Щебеночно-мастичный асфальтобетон SMA-16;
2 — Асфальтобетон SP-22Э;
3 — Асфальтобетон SP-32Э (слой отсутствует на обочине);
4 — Щебёночно-песчаная смесь С5; геосинтетический материал (если устроен);
5 — Песок с Кф не менее 1м/сут.

Протяженность участка – 22 км

а) полевые работы



б) профилирование



в) зондирование

ГЕОРАДАРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Георадар	Центральная частота или частотный диапазон, МГц	Технология	Тип антенны
ОКО-3	700 2000	Импульсная	Бесконтактная Бесконтактная
ГРТ-1	300-900	Линейное изменение частоты	Бесконтактная
ГРТ-3	500-3000		Бесконтактная
Zond	900 1500	Импульсная	Контактная Контактная

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ И ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ, МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ

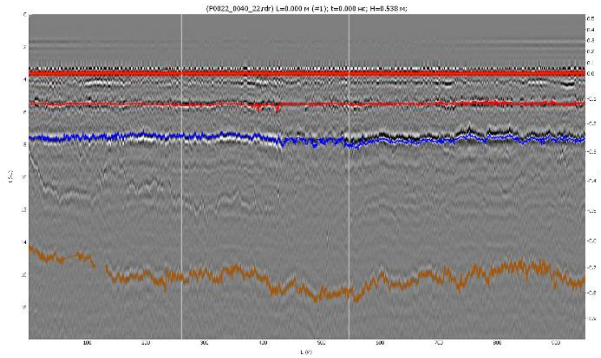
Оцениваемый вид работ	Участник					
	1	2	3	4	5	6
Поиск границ слоев дорожной одежды для определения толщин слоев						
Подход	Полуавтоматический поиск с участием оператора					1. Полуавтоматический поиск с участием оператора. 2. Нейросеть в облачном ресурсе.
Время обработки 1 пог. км георадарного профиля, мин	15	480	480	2	6	Полуавтоматический поиск - 6 Нейросеть - 0,6
Определение ослабленных зон в слоях основания дорожных конструкций						
Подход	Атрибутный анализ в выбранном диапазоне по глубине	-	Оценка амплитуды оси синфазности и изменение центральной частоты ниже границы (выделены зоны повышенного увлажнения)	-	Автоматическая обработка, атрибутный анализ: максимум амплитуды и средней частоты для каждого слоя дорожной одежды (критерии оценки по ОДМ 218.3.075-2016)	
Время обработки 1 пог. км георадарного профиля, мин	н/д				0,2	

2. ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОМПЛЕКСА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ЗАДАЧ

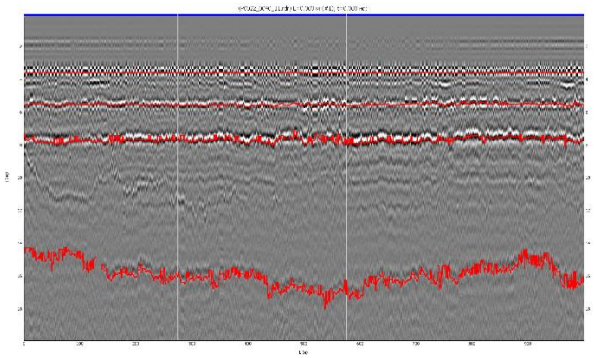
Критерий	Максимальная бальная оценка	Участник				
		1	2	3	4	5
Определение толщины слоев	15%	9%	0%	7%	8%	11%
Оценка местоположения ослабленных зон	60%	54%	57%	50%	59%	59%
Применение искусственного интеллекта	15%	0%	0%	0%	0%	15%
Решения отечественных производителей	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Общий результат	100%	68%	62%	62%	72%	90%

3. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

- Асфальтобетон
  - погрешность – 1,0 см
- Несущий слой основания (ЩПС)
  - погрешность – 8,0 см
- Дополнительный слой основания (Песок)
  - Не удалось решить задачу



а) средний канал 2000 МГц – обработка оператором



б) крайний левый канал 2000 МГц – обработка нейросетью

1. В рамках первого положительного опыта применения искусственного интеллекта для обработки георадарных данных задачу удалось эффективно решить в части поиска границ слоев дорожной одежды на георадарном профиле.
2. Нейросеть смогла эффективно определить местоположение подошвы асфальтобетонного слоя на георадарном профиле.
3. После калибровки георадарных данных средняя погрешность определения толщины асфальтобетона составляет 1 см, что сопоставимо с результатами экспертной обработки данных человеком.

СХОДИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДАРА И УСТАНОВКИ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

КМ	Расстояние, км	Прогиб, мм	Коэффициент вариации амплитуды сигнала		
			ЩПС	Песок	Рабочий слой
80,085	0	0,216	0,08	0,11	0
80,035	0,05	0,205	0	0	0
79,985	0,1	0,202	0,11	0,09	0,05
79,935	0,15	0,224	0,04	0,03	0
79,885	0,2	0,207	0,08	0,05	0,02
79,835	0,25	0,217	0,06	0	0
79,785	0,3	0,192	0,02	0,09	0
79,735	0,35	0,229	0	0,06	0
79,685	0,401	0,285	0	0,02	0
79,635	0,45	0,224	0,09	0	0,01
79,585	0,5	0,249	0,14	0,02	0,04
79,535	0,55	0,257	0	0,1	0
79,485	0,6	0,25	0	0	0
79,435	0,65	0,24	0,27	0	0
79,385	0,7	0,204	0,27	0	0
79,335	0,75	0,273	0	0	0
79,285	0,8	0,252	0,03	0,07	0,01
79,235	0,85	0,251	0	0	0
79,185	0,9	0,269	0	0	0
79,135	0,95	0,213	0,15	0	0
79,085	1	0,194	0,17	0	0,04
Коэффициент корреляции, %			42	18	30

ВЫВОДЫ

ФАУ «РОСДОРНИИ» за последние 5 лет разработаны новые методики комплексирования георадаров с другими методами исследования, такими как лазерное сканирование и динамическое нагружение

В рамках сопоставительных испытаний 2019 г. и 2022 г. преследовались цели обоснования требований к новейшей передвижной дорожной лаборатории ФАУ «РОСДОРНИИ», оценки возможности определения с помощью георадарного обследования участков снижения общего модуля упругости и выявление местоположения областей ослабления в слоях дорожной конструкции, а также выявление лучших решений скоростной и высокоавтоматизированной обработки георадарных данных для повышения достоверности и производительности результатов инженерных изысканий и обследований автомобильных дорог

В рамках сопоставительных испытаний была дана оценка погрешности определения толщины слоев дорожной одежды различным российским и зарубежным георадарным оборудованием. Лучшие результаты обеспечили минимальную погрешность определения толщины асфальтобетона – 0,4 см, щебеночного слоя основания – 3 см, дополнительного слоя основания – 0.1 см. Доказано, что георадарный профиль содержит динамические характеристики, позволяющие автоматизировано выделить участки с разными прочностными параметрами без необходимости экспертной оценки. Возможность определения ослабленных зон в слоях дорожной конструкции была подтверждена посредством применения методик анализа изменений амплитудно-частотных характеристик отраженного сигнала георадара внутри слоев дорожной конструкции и на границе раздела этих слоев

По результатам исследования 2022 г. были продемонстрированы компьютерные алгоритмы, у которых максимальная скорость поиска границ слоев дорожной одежды на георадарном профилей и определения ослабленных мест в слоях дорожной конструкции не ниже скорости сбора многоканальных георадарных данных

Спасибо за внимание