

**ОПЫТ КОМПЛЕКСНЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД ГЕОРАДАРАМИ И
УСТАНОВКАМИ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Канд. техн. наук **Р.А. Ерёмин**,
д-р техн. наук, профессор **А.М. Кулижников**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
Конт. информация: EreminRA@rosdornii.ru;
KulizhnikovAM@rosdornii.ru

Рассмотрен опыт совместного применения георадаров и установок ударного нагружения при обследовании автомобильных дорог с целью определения прочностных свойств дорожных одежд. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт комплексных обследований за период с 1998 г. Приведены основные параметры, получаемые по результатам ударного нагружения и георадарных обследований и используемые в настоящее время в расчетах прочности дорожных одежд. Предложены пути совершенствования методики комплексного расчета дорожных конструкций по прочности.

Ключевые слова: *дорожная одежда, прочность, георадар, динамическая нагрузка, установка динамического нагружения, ударное нагружение, напряжения, деформации, толщина слоев, атрибутивный анализ, скорость, электромагнитные волны, диэлектрическая проницаемость.*

В рамках реализации национального проекта «Безопасные качественные дороги» перед работниками дорожного хозяйства поставлена задача создания в регионах Российской Федерации качественной и совершенной транспортной инфраструктуры, решение которой требует и современных подходов.

Одной из важнейших задач в развитии и поддержании нормативного состояния сети автомобильных дорог Российской Федерации является объективная и своевременная оценка фактического состояния дорожных одежд как одного из наиболее дорогих и быстро изнашиваемых конструктивных элементов сооружений. По результатам такой оценки должны приниматься эффективные управленческие решения, планироваться строительные и эксплуатационные расходы [1-3]. Необъективная оценка состояния дорожной одежды может приводить к ее преждевременному износу даже после проведенных ремонтных мероприятий.

В настоящее время в сфере дорожного хозяйства как на этапе проектно-изыскательских работ, так и на этапах строительства и эксплуатации все чаще используются современные и производительные неразрушающие методы георадиолокации в комплексе с динамическим нагружением. Как показывает мировой и отечественный опыт, симбиоз методов позволяет наиболее полно и всесторонне изучать строение, а также состояние дорожных одежд. При этом обеспечивается возможность количественной оценки прочностных характеристик дорожных конструкций с последующим обоснованием необходимости проектных решений по назначению дорожных работ [1, 2].

Цель представленного в данной статье исследования заключалась в изучении опыта совместного применения георадаров и установок ударного нагружения при обследовании автомобильных дорог для количественной оценки прочности дорожных одежд.

Задачи исследования были следующие:

1. Изучить опыт совместного применения георадаров и установок ударного нагружения при обследовании автомобильных дорог.
2. Определить перечень количественных параметров, используемых в настоящее время в расчетах прочностных характеристик дорожных одежд.
3. Выявить ограничения принятых на сегодняшний день методик и предложить пути совершенствования совместного применения георадаров и установок ударного нагружения для определения прочности дорожных конструкций, внутреннего строения и состояния слоев дорожных одежд автомобильных дорог.

Вопросы совместного применения георадаров и установок ударного/динамического нагружения при обследовании автомобильных дорог исследовались отечественными и зарубежными специалистами, в том числе С. Йоханссоном (S. Johansson), Т. Сааренкетто (T. Saarenketo), Л. Перссоном (L. Persson), П. Кристоферсоном (P. Christopherson), К. А. Леннгреном (C.A. Lenngren), А.М. Кулижниковым, С.П. Лукьяновым, В.Н. Бойковым, И.А. Черным, А.Г. Батраковой, Р.А. Ерёминим, А.О. Кузнецовым, Л.Г. Шамраевым и др. [1-9].

ФАУ «РОСДОРНИИ» активно занимается вопросами оценки фактического состояния автомобильных дорог по данным комплексных обследований дорожных одежд георадарами и установками ударного нагружения с 2018 г. [6-8]. Вместе с тем в мировой практике изучение данного вопроса имеет более долгую историю.

Например, идея об использовании результатов георадарного обследования с целью оценки напряженно-деформированного состояния

дорожных одежд автомобильных дорог описана в работе К.А. Леннгрена (С.А. Lenngren) [4]. Автором было отмечено, что простое понимание отраженной на георадарном профиле картины недостаточно для широкого практического применения георадаров в дорожной отрасли. Поэтому автор предложил использовать результаты непрерывной оценки толщины слоев дорожной одежды по данным георадара в расчетах модулей упругости на основе информации, полученной при помощи установок ударного нагружения типа FWD. Такой подход позволит снизить погрешность расчета модулей упругости в отличие от подхода с использованием только сведений о толщине по данным точечного бурения.

Похожие выводы делает С.П. Лукьянов с соавторами [5], что свидетельствует о необходимости количественной оценки состояния дорожных одежд автомобильных дорог по результатам георадарных обследований. Но при этом были проанализированы изменения амплитуды, центральной частоты и коэффициента передачи электромагнитного сигнала георадара в зависимости от типа материалов слоев и состояния покрытия дорожной одежды. По результатам исследования была отмечена значительная разница между электрофизическими параметрами для дорог, находящихся в нормативном и ненормативном состоянии, в том числе о вариации центральной частоты спектра сигнала. Кроме того, было установлено, что указанные параметры имеют хорошую корреляцию с изменением модуля упругости, количеством трещин покрытия, сроком службы и состоянием материалов слоев дорожных одежд.

Развернутый опыт регионального центра Шведской национальной дорожной администрации (Swedish National Road Administration (SNRA)) по комплексированию георадаров и установок ударного нагружения за период 1998–2002 гг. для исследований несущей способности автомобильных дорог отражен в [1]. Необходимо обратить внимание на терминологию, используемую в данной статье, а именно на термин «несущая способность». В РФ отсутствует методика расчета данного показателя, его величина не имеет количественного значения, в то время как в других странах могут применяться вполне конкретные количественные показатели его оценки.

В рамках научных работ осуществляли следующее: цифровую видеосъемку, георадарное обследование; определение индекса несущей способности на базе измерений прогиба установкой ударного нагружения (FWD), отбор проб и лабораторные исследования, визуальный осмотр системы поверхностного водоотвода, визуальный осмотр состояния дорожного покрытия с оценкой наличия дефектов, сканирование дорожного покрытия с помощью лазерного профилометра.

При георадарном обследовании применяли наземную антенну с центральной частотой сканирования 400 МГц для исследования нижних слоев дорожной конструкции и оценки вида грунтов земляного полотна, а также бесконтактную антенну с центральной частотой сканирования 1 ГГц для исследования дорожного покрытия и подстилающих его верхних слоев основания (рис. 1).



Рис. 1. Передвижная дорожная лаборатория с антеннами георадара 1,0 ГГц и 400 МГц

Индекс несущей способности определялся по результатам измерения прогиба дорожного покрытия от воздействия ударной нагрузки установкой динамического нагружения типа FWD. На дорогах с твердым покрытием измерения проводились через 100 м, а с гравийным покрытием – через 200 м по обоим направлениям движения.

В Швеции индекс несущей способности (BI) – это параметр, рассчитываемый по формуле (1), согласно стандартному методу испытаний VVMB 114 SNRA [1]:

$$BI = 1000/\dot{\epsilon}_u, \quad (1)$$

где

$\dot{\epsilon}_u$ – деформация асфальтобетона, рассчитанная на основе результатов измерения прогиба установкой ударного нагружения FWD с поправкой на его температуру. Чем меньше значение BI , тем хуже несущая способность.

Отбор образцов материала дорожной конструкции выполнялся в 1 точке на 1 км автомобильной дороги. В местах отбора образцов определялись толщины конструктивных слоев. Решение о местах отбора проб принималось по данным георадара.

Цель визуального осмотра заключалась в определении местоположения и классификации дефектов дорожного покрытия, а также оценке эффективности работы поверхностного водоотвода.

Также анализировалась информация о результатах мониторинга продольной ровности и колеяности из баз данных Шведской дорожной администрации. В Швеции измерение коэффициента IRI^1 и колеяности выполняется обычно на участках дорог протяженностью от 20 до 400 м. Примечательно, что для дорог без твердого покрытия с целью определения продольной ровности используются показания георадара с бесконтактной антенной взамен лазерного регистратора продольной ровности. Поскольку скорость распространения электромагнитной волны в воздухе постоянна, с помощью георадара можно выполнять измерения ординат текущего положения антенны георадара относительно поверхности сканирования при раскачивании движущегося автомобиля по неровной дороге.

Кроме того, авторами сообщается об опыте прогнозирования остаточного ресурса автомобильных дорог по изменению показателей ровности участка. В рамках работ были выполнены расчеты с использованием результатов измерения колеяности и продольной ровности по показателю IRI . Расчеты проводились с использованием средних значений для участков автомобильной дороги длиной по 500 м. Тренд линии регрессии для колеяности и индекса IRI строился по результатам не менее трех измерений, полученных в разные годы. Для каждого 500-метрового участка автомобильной дороги при принятом на тот момент критическом пределе

¹ Международный показатель ровности IRI (International Roughness Index).

среднего значения, определенного опытным путем, и, например, составившим для колеяности 12 мм, был спрогнозирован остаточный срок службы дорожной одежды. Когда линия регрессии достигала предельного значения по величине ровности, была необходима «реабилитация» дорожной одежды (**рис. 2**).

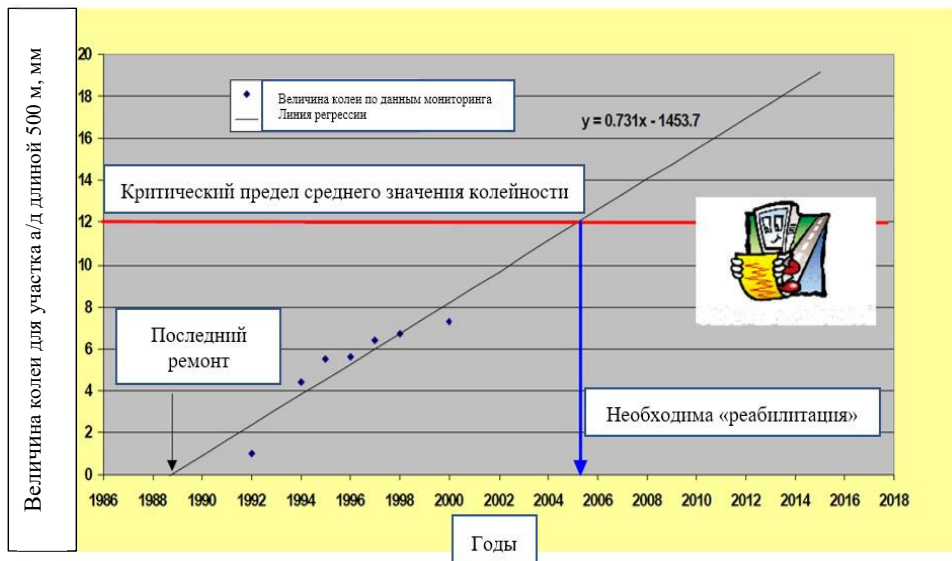


Рис. 2. Принцип расчета остаточного ресурса по колеяности

Стандартный вид представления результатов комплексной оценки состояния автомобильной дороги показан в интерфейсе программного обеспечения Road Doctor (**рис. 3**). Поскольку все данные между собой связаны, можно совершить «виртуальную поездку» по автомобильной дороге, чтобы увидеть, как дорожные условия меняются на протяжении всей этой поездки.

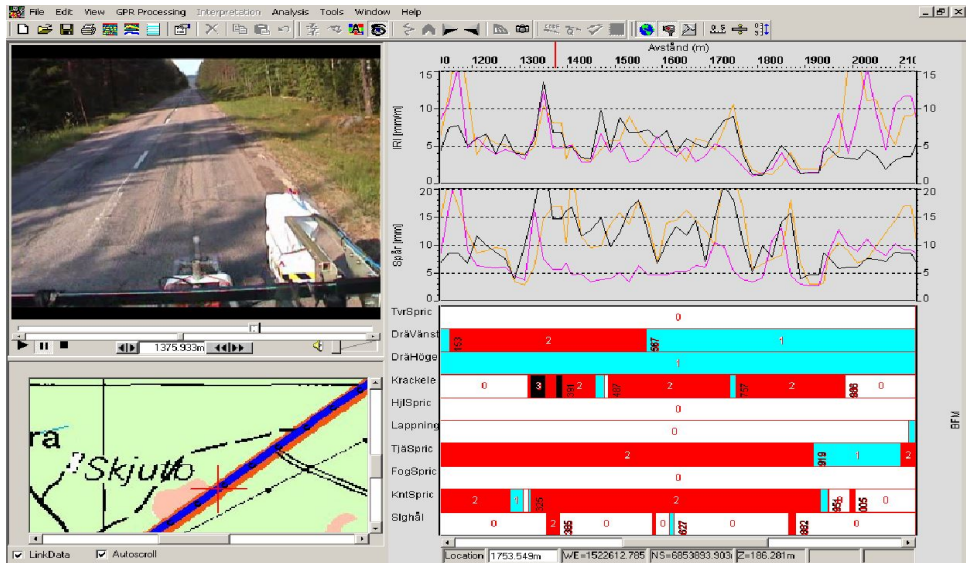


Рис. 3. Результат комплексной оценки состояния автомобильной дороги:

левое верхнее окно – состояние дорожного покрытия и водоотвода на основе видеосъемки; левое нижнее окно – траектория движения дорожной лаборатории; правое верхнее окно (1-я секция сверху) – результат интерпретации георадарного профиля; правое верхнее окно (2-я – 4-я секции сверху) – результат измерения продольной и поперечной ровности, а также чаши прогибов соответственно; правое нижнее окно (5-я секция сверху) – результат классификации состояния поверхностного водоотвода и дефектов дорожного покрытия соответственно; правое нижнее окно (6-я секция сверху) – результат классификации по индексу несущей способности, а также усредненной несущей способности для участка автомобильной дороги (а/д) длиной 500 м соответственно

Как видно из **рис. 3**, итоговой оценкой состояния автомобильной дороги на основании комплексных обследований является усредненная несущая способность (Bearing Capacity value, BC) каждого 500-метрового участка, которая, например, для дорог с гравийным покрытием рассчитывается по формуле (2):

$$BC = (0,25*dewatering + 0,33*SCI + 0,27*BCI + 0,45*structural\ GPR) * 10 \quad (2)$$

где

dewatering – характеристика эффективности работы поверхностного водоотвода, оценивая по 3-х бальной системе в зависимости от выявленных внешних признаков;

SCI – мера жесткости в верхней части дорожной конструкции, которая определяется по результатам измерения прогиба в центре приложения нагрузки и в 200 мм от него (геофоны D0-D200);

BCI – мера жесткости в нижней части дорожной конструкции, которая определяется по результатам измерения прогиба в 900-1200 мм от центра приложения нагрузки (геофоны D900-D1200);

structural GPR – оценка результатов георадарного обследования, учитывающая толщину определенных с его помощью конструктивных слоев и вид грунта подстилающего дорожную одежду основания.

Результаты оценки состояния участка автомобильной дороги по индексу BC приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Результаты оценки состояния участка автомобильной дороги по индексу BC

<i>Класс</i>	<i>Описание</i>	<i>Величина индекса</i>
<i>1</i>	без недостатков или незначительных недостатков	от 0 до 19
<i>2</i>	очевидные недостатки	от 20 до 29
<i>3</i>	основные недостатки	от 30 до 39

На основании анализа статьи [1] можно заключить, что показатели усредненной несущей способности автомобильных дорог рассчитывались по данным георадара, измерениям прогиба дорожного покрытия установкой ударного нагружения, визуальной оценке состояния дорожного покрытия и поверхностного водоотвода. Прогнозирование остаточного ресурса по показателям ровности автомобильных дорог выполнялось на основании анализа результатов мониторинга продольной и поперечной ровности участка автомобильной дороги за последние три года на момент опубликования статьи.

Внимания также заслуживает скандинавско-ирландский опыт обследования и ремонта дорог с малой интенсивностью движения, полученный в рамках проекта сотрудничества ЕС ROADEX за период 1998-2013 гг. [2].

Согласно материалам исследования, в рамках реализации проекта финская компания Roadscanners провела комплексные обследования, которые впоследствии позволили подготовить проектные решения по восстановлению автомобильных дорог, в частности было выполнено следующее: георадарное обследование; обследование с помощью геопривязанной видеосъемки для определения дефектов дорожного покрытия, состояния водопропускных труб и боковых канав; измерение несущей способности дорожной одежды с помощью установки ударного нагружения (FWD); отбор проб для определения толщины слоев дорожной одежды и гранулометрического состава материалов.

Георадарное обследование совместно с отбором проб осуществлялось для определения толщины каждого слоя и общей толщины конструкции дорожной одежды. Измерения прогибов установкой ударного нагружения проводились с шагом вдоль дороги, равным 40 м.

При выполнении работ использовались георадары с центральными частотами 400 и 1000 МГц.

Авторы отмечают, что на основании результатов измерений с помощью оборудования FWD и георадара может быть также дана оценка типа грунтов земляного полотна. Для такой оценки как минимум необходимо отметить участки залегания торфа или скального грунта.

Все данные, полученные при полевом обследовании, были занесены в специализированное программное обеспечение Road Doctor. Интерфейс окна указанного программного обеспечения представлен на рис. 4.

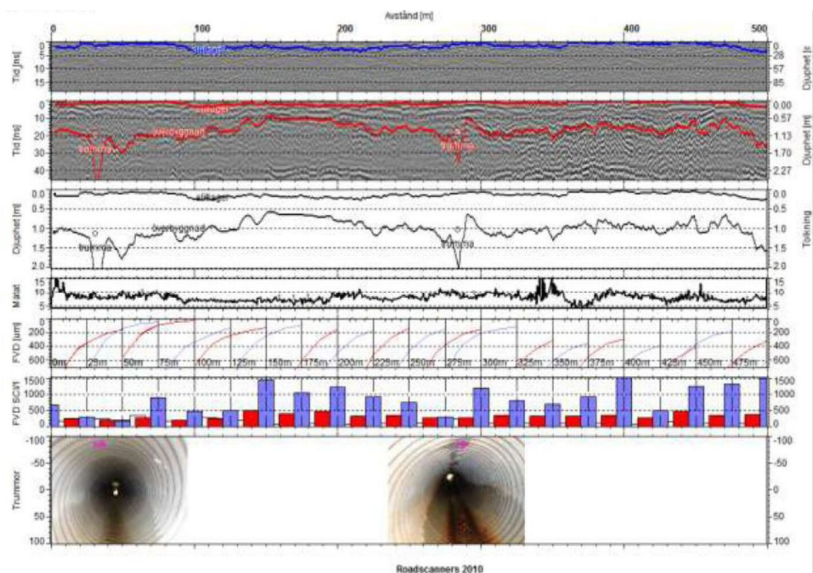


Рис. 4. Интерфейс окна программного обеспечения Road Doctor:
в верхнем окне синяя линия показывает подошву слоя износа; в следующем окне красными линиями представлены кровля и подошва дорожной одежды; в окне ниже указаны отдельно границы слоев дорожной одежды без подложки в виде георадарного профиля; в четвертом сверху окне отображается содержание влаги в верхнем слое асфальтобетона; на пятом сверху графике представлены чаши прогиба, полученные при измерении установкой ударного нагружения FWD; на шестом – результаты измерений чаш прогиба, и, наконец, на нижних рисунках – фотографии внутреннего пространства водопропускных труб, иллюстрирующие их состояние; (все данные в окне предоставлены с линейной привязкой)

Поскольку измерения установкой ударного нагружения FWD малопродуктивны, определение несущей способности между точками их измерения дополняются непрерывным определением толщины слоев дорожной одежды георадарами.

В расчетах несущей способности дорожных одежд использовались значения толщины слоев и измеренные величины прогибов дорожного покрытия. Как указывают авторы исследования [2], анализ несущей способности может быть использован для расчета шведских показателей и классов несущей способности дорожных одежд, а также для расчета модулей упругости грунта земляного полотна. После определения толщины слоев с помощью георадара характеристики материалов дорожной одежды определялись расчетом, который был основан на алгоритмах,

опубликованных Федеральной дорожной администрацией США (Federal Highway Administration (FHWA)) [2]. Другим способом расчета несущей способности авторы называют метод обратного расчета (Elmod back calculation) датской компании Dynatest. Как отмечают авторы, в большинстве случаев комбинация обратного и прямого расчетов модулей упругости слоев дорожной одежды и результатов расчета несущей способности земляного полотна обеспечивает вполне надежные и достоверные результаты.

Пример результатов отображения выполненного расчета несущей способности дорожной конструкции показан на **рис. 5**. Как видно из **рис. 5**, весь участок дороги был разбит на отдельные фрагменты, длина которых зависит от структуры дорожной конструкции наблюдаемой на радарограммах. Таким образом выделяются участки однотипной волновой картины, к которым и применяют результаты расчетов несущей способности. Также из **рис. 5** видно, что состояние дорожной конструкции оценивается послойно, а разными цветами выделяют как участки в нормативном состоянии, так и требующие ремонта. К сожалению, пояснений о соответствии цвета, которым выделен участок его характеристикам, не приводится.

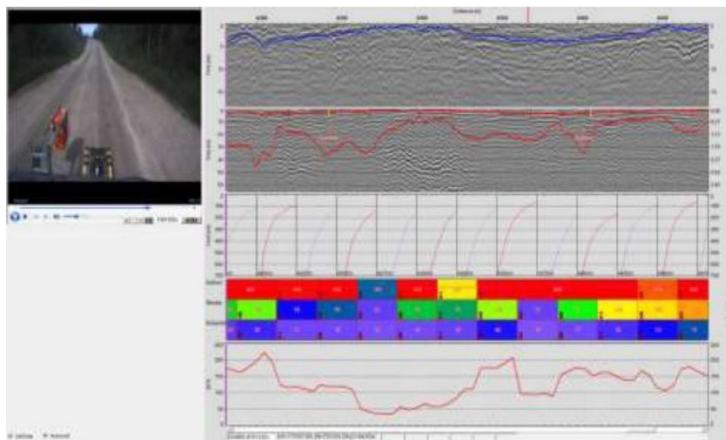


Рис. 5. Пример результатов отображения выполненного расчета несущей способности дорожной конструкции

На основании результатов такой оценки фактического состояния дорожных одежд назначаются адресные ремонтные работы. Данный подход, согласно материалам исследований, позволил сэкономить до 15 % средств на содержание дорог с низкой интенсивностью движения.

Очевидно, что представленный опыт работ в Скандинавских странах основан на оценке технического состояния автомобильных дорог с обязательным использованием георадаров и установок ударного нагружения, а также оценке состояния системы поверхностного водоотвода. При этом имеются конкретные математические зависимости, позволяющие выполнить итоговую количественную оценку несущей способности дорожных одежд.

Что касается отечественного опыта [6], на основании исследований, проведенных ФАУ «РОСДОРНИИ» совместно с ГК «АВТОДОР» на опытно-экспериментальном полигоне, можно отметить успешное применение георадара с целью определения толщины слоев дорожной одежды. В рамках экспериментальных работ при использовании различного георадарного оборудования определяли толщину слоев дорожной одежды с дальнейшим путем отбора кернов и проходки шурфов. Таким образом, можно отметить целесообразность применения георадара для целей определения толщины слоев дорожной одежды и последующего расчета ее прочностных характеристик.

Вместе с тем по результатам работ [6], [7] и [10], осуществленных ФАУ «РОСДОРНИИ», можно заключить, что в рамках углубленных исследований на участках автомобильных дорог возможно комплексное применение методов для объяснения причин изменения прочностных свойств дорожной одежды. В этом случае с помощью георадара выявляются участки, требующие проверки путем ударного нагружения. В местах аномалий, обнаруженных с помощью георадара на радарограммах, ударной нагрузкой определяют наличие ослабленных зон. Или, наоборот, в местах увеличения прогиба дорожного покрытия по данным ударного нагружения с помощью георадара можно определить, чем это обусловлено и какое распространение в пространстве имеет локальное ослабление.

Так, на **рис. 6** представлены графики изменения толщины слоев дорожной одежды (отмечено синим и оранжевым цветами), совмещенные с графиком изменения динамического модуля упругости на поверхности (показано серым цветом), определенного по методу Elmod back-calculation с использованием установки ударного нагружения (FWD) производства Dynatest [7]. Подошва дополнительного слоя основания дорожной одежды из песка не обнаруживается по причине отсыпки земляного полотна из того же материала. Несмотря на сравнительную однородность толщины верхних слоев дорожной одежды (с заполнителем из каменных материалов), можно отметить значительное изменение динамического модуля упругости на поверхности дорожной одежды.

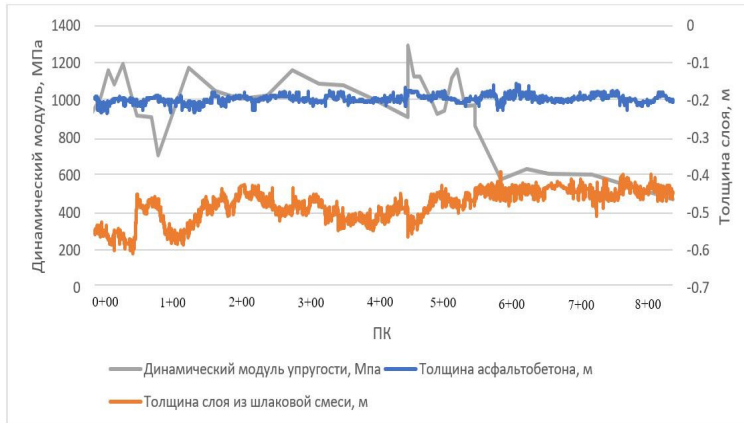


Рис. 6. Зависимость изменения динамического модуля от толщины слоев дорожной одежды

На **рис. 7** показан георадарный профиль, в составе которого имеется участок, результаты измерений на котором отображены на **рис. 6**. Георадарные данные представлены для антенного блока с центральной частотой зондирования 250 МГц (**рис. 7**), в то время как толщина конструктивных слоев определялась антенной 700 МГц (результаты отрисовки границ приведены на **рис. 6**).

Из **рис.7** видно, что участок автомобильной дороги, на котором происходит снижение динамического модуля, проходит в низкой насыпи (до 1 м). При этом высота насыпи на прилегающих участках местами превышает 5 м. В основании дорожной одежды на участке снижения динамического модуля наблюдаются так называемые переотражения электромагнитного сигнала георадара, что является признаком повышенной влажности грунтов. Малая высота насыпи вместе с необеспеченным осушением грунтов земляного полотна будет негативным образом влиять на результаты определения прочностных характеристик дорожных одежд. К сожалению, в рамках выполненных работ амплитудно-частотные характеристики участка не анализировались, но при этом наличие переотражения на волновой картине свидетельствует об отличии электрофизических свойств грунтов земляного полотна на участке снижения прочностных характеристик.

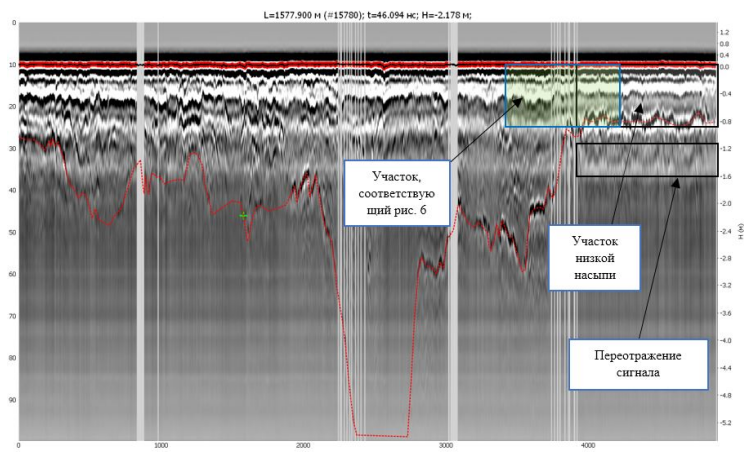


Рис. 7. Радарограмма (250 МГц):
красная линия – подошва земляного полотна

В развитие этой темы обратимся к исследованию профессора А.М. Кулижникова [8] в части анализа зависимостей амплитудно-частотных характеристик отражения электромагнитного сигнала на границах контакта слоев дорожной конструкции. Причиной изменения прочности дорожной одежды может являться необеспеченное сцепление между асфальтобетонными слоями, взаимопроникновение частиц на границе слоев из каменного и мелкодисперсного материала, заиливание дренирующего грунта, разрыв армирующего геосинтетического материала и т.п. [8]. Как правило, отсутствие или плохое прослеживание отражающих границ (снижение интенсивности отражающих границ) на радарограммах является признаком вышеуказанных нарушений. В рамках исследования [8] была предпринята попытка количественно оценить зависимости между амплитудой и частотой отражения сигнала георадара в дорожной конструкции, поведением осей синфазности и признаками волновой картины на границах контакта слоев дорожной одежды, а в конечном счете и относительным изменением динамического модуля на поверхности дорожного покрытия по результатам ударного нагружения. Изображения радарограмм с отмеченными зонами 1-4, в которых проводился анализ амплитуды сигнала, показаны на **рис. 8**. Радарограммы представлены для частот антенных блоков 700 и 1000 МГц совместно с графиком изменения общего модуля упругости по данным ударного нагружения. Значения измеренных амплитуд отраженного сигнала в зонах 1 и 4, а также до и после них на той же глубине приведены в **табл. 2**. Амплитудно-частотные характеристики зон 1-4 указаны в соответствующих

столбцах с обозначением «1» – «4», области на той же глубине непосредственно до или после анализируемой зоны указаны в столбцах «-1» – «-4» и «+1» – «+4» соответственно.

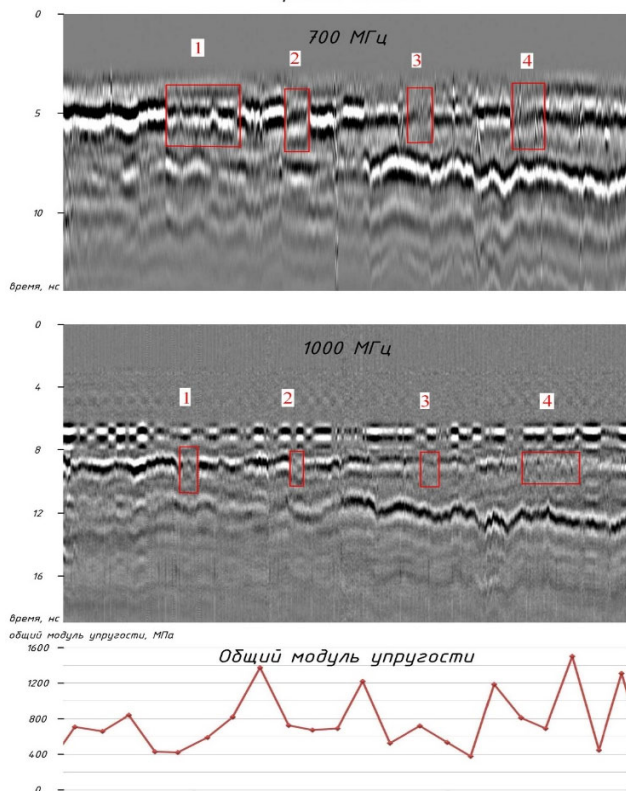


Рис. 8. Пример георадарного профиля протяженностью 220 м с выделенными местами снижения интенсивности отражающих границ

Как известно увеличение амплитуды отраженного сигнала, в частности свидетельствует о наличии разуплотнения или воздушной полости в исследуемых грунтах; двукратное и более снижение частоты сигнала указывает на увеличение влажности или разуплотнение грунта, а снижение амплитуды сигнала может указывать на взаимопроникновение частиц материала на границе контакта или заливании слоев дорожной одежды.

Таблица 2

*Амплитудно-частотные характеристики анализируемых
фрагментов радарограммы*

<i>Характеристика</i>	<i>Номер зоны</i>											
	<i>1</i>			<i>2</i>			<i>3</i>			<i>4</i>		
	-1	1	+1	-2	2	+2	-3	3	+3	-4	4	+4
<i>Частота, ГГц</i>	1,01	1,02	1,11	0,93	0,77	1,18	1,05	0,93	1,23	1,53	1,19	1,49
<i>Амплитуда в точке в центре зоны</i>	2800	720	3100	1200	400	1500	652	934	746	-206	509	102

Как видно из **табл. 2**, в 2-х из 4-х случаев амплитуда отраженного сигнала либо увеличивается, либо снижается в центре зоны снижения интенсивности отраженного сигнала по сравнению с участками уверенного прослеживания границы. Вместе с тем наблюдаются и снижения частоты в этих зонах по сравнению с прилегающими участками. В рамках исследования точно установлено, что количественные параметры амплитуды и частоты сигнала значительно изменяются в местах снижения интенсивности отражающих границ, но поскольку полученные предварительные результаты не во всех случаях были одинаковы, экспериментальные работы и их анализ было предложено продолжить. Вероятно, амплитуда и частота сигнала в чистом виде не являются единственным количественным атрибутом, характеризующим состояние границ контакта слоев дорожной одежды, поскольку на ее величину может влиять большое количество факторов и нелинейных зависимостей. Поэтому целесообразно выполнить количественный анализ и других атрибутов сигнала (например, смена фаз, огибающая сигнала, максимальное абсолютное значение амплитуды, интервал дискретизации, спектр Фурье для каждой трассы, средневзвешенная частота и т.п.), в том или ином виде связанных с амплитудой и частотой отражения, или же атрибутов цвета на изображениях радарограмм (когда оттенки серого на изображениях коррелируют с амплитудой отраженного сигнала). Вместе с тем из **рис. 8** видно, что участки снижения модуля упругости действительно приходятся на местоположение выделенных экспертом зон 1 – 4, что указывает на хорошую сходимость в результатах георадарного обследования и ударного нагружения при определении ослабленных мест.

Отдельное внимание следует обратить на технологии сбора и обработки георадарных данных. За последнее десятилетие отмечается значительное продвижение в области неразрушающего контроля, с использованием многоканальных антенных блоков, при повышении производительности и надежности георадаров. За одну рабочую смену появилась возможность сбора данных на участках протяженностью несколько сотен километров, равномерно распределенных по ширине проезжей части георадарных профилей, наряду с точной геодезической привязкой георадарных данных оборудованием спутникового позиционирования, при увеличении производительности камеральных работ. По заказу ФАУ «РОСДОРНИИ» в 2020 г. созданы совершенно новые типы передвижных дорожных лабораторий (**рис. 9**), оснащенные высокоточными навигационными приборами для определения траектории движения, системами мобильного лазерного сканирования и многоканальными георадарами. Развиваются возможности программных продуктов для обработки георадарных данных.

В мировой практике имеются примеры совместного использования георадаров с установками непрерывного измерения прогиба в движении (рис. 10, 11) [9].



Рис. 9. Передвижная дорожная лаборатория ФАУ «РОСДОРНИИ»

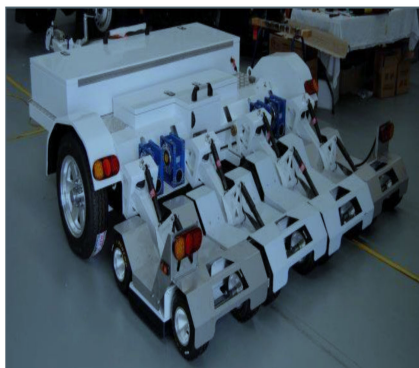


Рис. 10. Георадар и установка движущегося дефлектометра для комплексного обследования автомобильных дорог

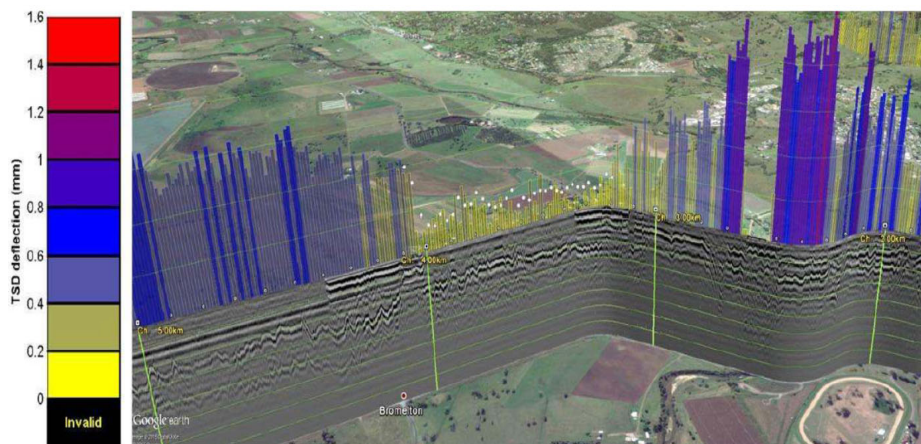


Рис. 11. Пример совмещения геопривязанного георадарного профиля с результатами измерения прогиба дорожного покрытия установкой движущегося дефлектометра

Подытоживая изложенное выше, можно сделать следующее предварительное заключение:

1. Для оценки прочностных свойств дорожной одежды могут использоваться 2 подхода совместного использования результатов георадарного обследования и ударного нагружения.
2. При первом подходе расчет прочности выполняется посредством учета толщины слоев дорожной одежды, определенных с помощью георадара, а также величины чаши прогиба по результатам ударного нагружения.
3. При втором подходе анализируются кинематические и динамические признаки на радарограммах, такие как поведение осей синфазности на границах контакта слоев дорожной конструкции, изменения амплитудно-частотных и фазовых характеристик отраженного сигнала, а также изменения в однородности структуры изображений георадарных профилей. Любые отклонения от среднестатистической картины волнового профиля на радарограммах являются аномалиями, которые могут свидетельствовать об изменении прочностных свойств материалов. Сопоставление местоположения ано-

малый на георадарных профилях с результатами ударного нагружения позволяет объяснить причины снижения прочности дорожных одежд и локализовать область выявленных ослаблений.

4. Как показывает опыт совместного применения георадаров и установок ударного нагружения, при обследовании автомобильных дорог первый подход показывает свою эффективность на протяжении многих лет. Однако результаты могут быть достоверны только в тех случаях, когда обеспечены необходимые модули упругости на поверхности слоев основания дорожных конструкций. Возможно, для территорий с прочными скальными породами в основании автомобильных дорог является допустимым осуществлять расчеты прочности, используя результаты определения чаш прогибов по данным ударного нагружения и толщины слоев по данным георадара. Однако для оснований из связных и специфических грунтов, и в том числе в сложных грунтово-гидрогеологических условиях, подобная методология расчета может иметь ограничения. На основании приведенного в статье анализа помимо такого параметра как толщина слоев дорожной одежды в расчетах прочности дополнительно должны определяться такие значимые параметры как относительная влажность и плотность дорожно-строительных материалов и грунтов. Для этого целесообразно использовать метод общей средней точки [11] на базе многоканального георадарного оборудования, а также учитывать скорости распространения электромагнитных волн в среде или ее диэлектрическую проницаемость в различных точках сканирования, амплитудно-частотные характеристики сигнала георадара и полученные на их основе производные параметры от амплитуды и частоты.

Вместе с тем в Российской Федерации уже осуществляется разработка нормативного документа, позволяющего выполнить расчет прочности дорожной одежды с использованием первого подхода, когда учитывается толщина слоев дорожной одежды. Для определения толщины слоев дорожной одежды с помощью георадара используют требования ГОСТ Р 58349-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды» [12].

Толщина слоев дорожной одежды, согласно 6.2.1 ГОСТ Р 58349-2019 [12], определяется посредством косвенных измерений по формуле (3):

$$h = \frac{c \cdot \Delta t}{\sqrt{\epsilon}}, \quad (3)$$

где

c – скорость света в вакууме (30 см/нс);

Δt – время пробега электромагнитного сигнала от верхней границы слоя к нижней и в обратном направлении, определяемое с помощью георадиолокационного оборудования, нс;

ϵ – диэлектрическая проницаемость, определяемая по таблице А.1 (приложение А) или опытным путем (калибровка по данным бурения, или применение приборов для измерения диэлектрической проницаемости).

ВЫВОДЫ

1. В Российской Федерации в настоящее время складывается ситуация, при которой имеется возможность выполнять расчеты прочности дорожных одежд по результатам комплексных обследований георадарами и установками ударного нагружения. Для этого накоплен необходимый положительный опыт, и в том числе других стран, а также разработаны нормативно-технические документы.
2. На основании изучения опыта совместного применения георадаров и установок ударного нагружения при обследовании автомобильных дорог определен перечень количественных параметров, используемых на современном этапе в расчетах прочностных характеристик дорожных одежд, к которым относится толщина слоев дорожной одежды и результаты измерения чаши прогиба.
3. Основной принцип таких расчетов заключается в решении прямой задачи, когда, зная толщины слоев дорожной одежды по результатам георадарных работ, выполняется расчет модуля упругости на поверхности покрытия снизу вверх, который сравнивается с модулем упругости, определенным установкой динамического нагружения. При низкой сходимости результата решается обратная задача, при известном модуле упругости на поверхности покрытия путем пересчета сверху вниз определяются фактические модули упругости.
4. Ввиду того, что методика расчета не может учитывать изменение свойств материалов слоев основания дорожных одежд и грунтов земляного полотна внутри расчетного участка, является актуаль-

ной возможность учета в расчетах прочности относительной влажности и плотности дорожно-строительных материалов и грунтов на основании определения электрофизических свойств этих материалов и грунтов. Для этого целесообразно использовать метод общей средней точки на базе многоканального георадарного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Johansson S. Network and Project Bearing Capacity Surveys and Analyses Using Modern Techniques / S. Johansson, T. Saarenketo, L. Persson. [Электронный ресурс]. // NTNU.no – Режим доступа: <https://www.ntnu.no/ojs/index.php/BCRRA/article/view/3221/3105>.*
2. *Кристофферсон П. Восстановление лесной дороги – проектные предложения / П. Кристофферсон, С. Йоханссон // Демонстрационный проект ROADDEX / Перевод на русский язык для Проекта KOLARCTIC ENPI CBC «Управление дорогами с низкой интенсивностью движения в Баренц регионе», НП «Зеленая Волна», г. Архангельск, 2012. – 42 с.*
3. *Батракова А.Г. Динамические и эконометрические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог. / А.Г. Батракова, С.М. Урдзик, Д.О. Батраков // Вісник ХНАДУ. –2019. – Вип. 85.– С. 59-65.*
4. *Lenngren С.А. Pavement thickness and ground penetrating radar / Георадары, дороги – 2000: материалы Междунар. науч. - техн. семинара, Архангельск, 2000. – Архангельск: АГТУ, 2002.*
5. *Лукьянов С.П. Проблемы и пути совершенствования георадарных методов контроля и диагностики состояния дорожной одежды автомобильных дорог / С.П. Лукьянов, В.Н. Бойков, И.А. Черный // Георадары, дороги – 2002: материалы Междунар. науч. - практ. конф., Архангельск, 26-28 нояб. 2002. – Архангельск: АГТУ, 2002. – С. 50-55.*
6. *Кулижников А.М. Отчёт о научно-исследовательской работе на тему «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» / А.М. Кулижников, Р.А. Еремин, А.О. Кузнецов. – Москва, 2019.*
7. *Кулижников А.М. Отчет о выполнении работ по осуществлению георадарного обследования в рамках НИОКР по разработке ГОСТ*

- Р «Дороги автомобильные общего пользования. Методика оценки прочности нежестких дорожных одежд» // А.М. Кулижников, Р.А. Еремин. – Москва, 2020.*
8. *Кулижников А.М. Влияние характеристик границ контакта слоев на прочность дорожной конструкции / А.М. Кулижников, Р.А. Еремин, А.О. Кузнецов // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2019. – № 42/2. – С. 90-103.*
 9. *Muller W.B. A comparison of TSD, FWD and GPR field measurements // International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, September 15 - 17, 2015. – 10 pp.*
 10. *Еремин Р.А. Проверка на прочность / Р.А. Еремин, А.М. Кулижников, А.О. Кузнецов // Автомобильные дороги. – 2021. – № 5 (1074). – С. 141-144.*
 11. *Еремин Р.А. О перспективах измерения толщины монолитных слоев дорожной одежды неразрушающим способом // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2017. – № 37/1. – С. 95-108.*
 12. *ГОСТ Р 58349-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Методы измерения толщины слоев дорожной одежды. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.*

L I T E R A T U R A

1. *Johansson S. Network and Project Bearing Capacity Surveys and Analyses Using Modern Techniques / S. Johansson, T. Saarenketo, L. Persson. [Elektronnyj resurs]. // NTNU. no – Rezhim dostupa: <https://www.ntnu.no/ojs/index.php/BCRRA/article/view/3221/3105>*
2. *Kristofferson P. Vosstanovlenie lesnoj dorogi – proektnye predlozheniya / P. Kristofferson, S. Johansson // Demonstracionnyj projekt ROADEX / Perevod na russkij yazyk dlya Proekta KOLARCTIC ENPI CBC «Upravlenie dorogami s nizkoj intensivnost'yu dvizheniya v Barenc regione», NP «Zelenaya Volna», g. Arhangel'sk, 2012. – 42 s.*
3. *Batrakova A.G. Dinamicheskie i ekonometricheskie modeli prognozirovaniya sostoyaniya avtomobil'nyh dorog. / A.G. Batrakova, S.M. Urdzik, D.O. Batrakov // Visnik HNADU. –2019. – Vip. 85. – S. 59-65.*
4. *Lenngren C.A. Pavement thickness and ground penetrating radar / Georadary, dorogi – 2000: materialy Mezhdunar. nauch. - tekhn. seminar, Arhangel'sk, 2000. – Arhangel'sk: AGTU, 2002.*
5. *Luk'yanov S.P. Problemy i puti sovershenstvovaniya georadarnyh metodov kontrolya i diagnostiki sostoyaniya dorozhnoj odezhdy avto-*

- mobil'nyh dorog / S.P. Luk'yanov, V.N. Bojkov, I.A. Chernyj // Georadary, dorogi – 2002: materialy Mezhdunar. nauch. - prakt. konf., Arhangel'sk, 26-28 noyab. 2002. – Arhangel'sk: AGTU, 2002. – S.50-55.*
6. *Kulizhnikov A.M. Otchyot o nauchno-issledovatel'skoj rabote na temu «Rezultaty rabot na ob"ekte «Avtomobil'naya doroga A-107 «Moskovskoe Maloe Kol'co mezhdru Kievskim i Minskim shosse, ryadom s derevnej Kobyakovo i pos. NII Radio» ustanovkami udarnogo nagruzheniya (FWD) i georadarami» / A.M. Kulizhnikov, R.A. Eremin, A.O. Kuznecov. – Moskva, 2019.*
 7. *Kulizhnikov A.M. Otchet o vypolnenii rabot po osushchestvleniyu georadarnogo obsledovaniya v ramkah NIOKR po razrabotke GOST R «Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Metodika ocenki prochnosti nezhestkih dorozhnyh odezhd» // A.M. Kulizhnikov, R.A. Eremin. – Moskva, 2020.*
 8. *Kulizhnikov A.M. Vliyanie harakteristik granic kontakta sloev na prochnost' dorozhnoj konstrukcii / A.M. Kulizhnikov, R.A. Eryomin, A.O. Kuznecov // DOROGI I MOSTY. – 2019. – № 42/2. – S. 90-103.*
 9. *Muller W.B. A comparison of TSD, FWD and GPR field measurements // International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, September 15 - 17, 2015. – 10 pp.*
 10. *Eremin R.A. Proverka na prochnost' / R.A. Eremin, A.M. Kulizhnikov, A.O. Kuznecov // Avtomobil'nye dorogi. – 2021. – № 5 (1074). – C. 141-144.*
 11. *Eremin R.A. O perspektivah izmereniya tolshchiny monolitnyh sloev dorozhnoj odezhdy nerazrushayushchim sposobom // DOROGI I MOSTY. – 2017. – № 37/1. – S. 95-108.*
 12. *GOST R 58349-2019. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Dorozhnaya odezhd. Metody izmereniya tolshchiny sloev dorozhnoj odezhdy. – M.: Standartinform, 2019. –16 s.*

.....
**EXPERIENCE OF COMPLEX ROAD PAVEMENTS SURVEYS WITH
THE USE OF GROUND PENETRATING RADARS AND
IMPACT LOADING UNITS**

*Ph. D. (Tech.) R.A. Eremin,
Doctor of Engineering, Professor A.M. Kulizhnikov
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information: EreminRA@rosdornii.ru;
KulizhnikovAM@rosdornii.ru*

The experience of joint use of Ground Penetrating Radars (GPR) and impact loading units (Falling Weight Deflectometer (FWD)) during roads survey with the purpose of determining the strength properties of road pavements is considered. Domestic and foreign experience of complex surveys since 1998 has been analyzed. The main parameters obtained from the results of impact loading and GPR investigations, used nowadays in calculating the strength of road pavements are presented. The ways of improving the methodology of complex calculation of the strength of road pavements are proposed.

Key words: *road pavement, strength, ground-penetrating radar (GPR), dynamic load, dynamic loading unit (Falling Weight Deflectometer (FWD)), impact loading, stresses, deformations, layers thickness, attribute analysis, speed, electromagnetic waves, dielectric permittivity.*

Рецензент: канд. техн. наук М.Л. Ермаков (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 29.10.2021 г.