УДК 625.8:550.8.053

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБНАРУЖЕНИЮ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН В ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЕ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ И КИНЕМАТИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Д-р техн. наук **А.М. Кулижников**,
канд. техн. наук **Р.А. Еремин**,
инженер **Н.Г. Пудова**,
инженер **Е.О. Зверев**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
Конт. информация: kulizhnikov@rosdornii.ru;
r.eremin@rosdornii.ru;
pudova@rosdornii.ru;
zvereveo@rosdornii.ru

В статье представлено решение задачи выявления ослабленных зон (участки повышенного увлажнения, расслоения или разуплотнения материалов, просадки и др.) в конструктивных слоях дорожной одежды. Использование различных автоматизированных алгоритмов распознавания образов (методы атрибутного анализа совместно с инструментом компьютерного зрения) при обработке и интерпретации георадарных данных помогает достаточно быстро выделить неоднородные области на радарограммах, которые соответствуют ослабленным зонам в подстилающих слоях основания дорожной одежды.

***Ключевые слова**: дорожная одежда, радарограмма, атрибутный анализ, машинное обучение, ослабленная зона, амплитуда, частота.*

В соответствии с приложением 4 постановления Правительства Российской Федерации от 30 мая 2017 года № 658 об увеличении межремонтного срока эксплуатации автомобильных дорог до 12 лет, а по капитальному ремонту до 24 лет, а также из-за постоянно увеличивающейся нагрузки на покрытие, возрастают требования к качеству автомобильных дорог как вновь построенных, так и после капитального ремонта и реконструкции. Как показывает практика, в ряде случаев ремонт автомобильной дороги дает лишь временный эффект, так как очень часто причина возникновения поверхностных дефектов и просадок не выяснена, и вновь уложенное покрытие начинает разрушаться. Обычно при ремонте автомобильной дороги осуществляется просто замена асфальтобетонного покрытия для выравнивания продольного и поперечного профилей поверхности проезжей части. При этом причины возникновения ослабленных зон в

слоях основания и грунтах земляного полотна не устраняются, и разрушение продолжает прогрессировать.

Особую актуальность для выяснения причин возникновения дефектов дорожной одежды, состояния грунтов земляного полотна и подстилающего основания приобретают высокопроизводительные технологии, основанные на методах неразрушающего контроля. Георадиолокация является одним из самых производительных и информативных методов неразрушающего контроля с точки зрения подробного изучения верхней части разреза при обследовании автомобильных дорог. Согласно п. 7.3.1 ГОСТ 32868-2014 **[1]** и п. 4.5.4 ОДМ 218.4.039-2018 **[2]**, при обследовании дорожных конструкций, изучении состояния слоев основания и грунтов земляного полотна рекомендуется применять георадар.

Выявление ослабленных зон в конструктивных слоях дорожной одежды является одной из самых распространенных задач при обследовании автомобильных дорог. Как правило, к таким зонам относят участки повышенного увлажнения, расслоения или разуплотнения материалов, просадки в конструкции или участки несоответствия проектной документации **[3-5]**, которые характеризуются низкой частотой или повышенной амплитудой электромагнитного сигнала. При этом практически все ослабленные зоны будут отражаться на радарограммах как аномальные типы записи волновой картины (участки записи, отличающиеся при визуальном анализе кинематических характеристик).

Цель представленного в данной статье исследования, заключается в усовершенствовании существующих методик и алгоритмов выявления ослабленных зон в конструкции дорожной одежды. Для достижения данной цели требуется решение следующих задач:

1) выполнить георадиолокационное обследование на участке автомобильных дорог;
2) классифицировать выделенные ослабленные зоны;
3) выделить основные критерии, по которым определяется ослабленная зона;
4) разработать алгоритмы действий по идентификации ослабленных зон на радарограммах;
5) определить направление дальнейших исследований.

При георадарном обследовании автомобильных дорог регионального значения с целью выделения нарушенных зон в конструктивных слоях дорожной одежды используют антенные блоки с центральной частотой от 150 МГц до 700 МГц. Чаще всего при выделении аномальных участков записи на радарограммах выполняется визуальная оценка волновой картины (оцениваются кинематические

признаки): анализируются конфигурации и протяженность осей синфазности отраженных волн, интенсивность отражения, частотный состав записи **[6]**. По изменению конфигурации и протяженности осей синфазности можно судить о процессах деформации слоев основания дорожной одежды, нарушениях на контактах между слоями. Изменчивость амплитудно-частотных характеристик сигнала может указывать как на изменения в литологии использованных при отсыпке грунтов основания, так и на изменение естественной влажности в грунтах основания или наличия суффозионных процессов.

В последнее время для оценки изменения динамических параметров волновой картины выполняется атрибутный анализ волнового поля **[7**, **8]**. Различные виды атрибутов позволяют провести количественную оценку динамических особенностей поля, повысить эффективность интерпретации георадарных данных при решении задачи поиска нарушенных зон в основании дорожной одежды. При этом результат атрибутного анализа может быть представлен не только в виде графиков изменения какого-либо атрибута, но и как «маска» или изображение на исходной радарограмме. Для анализа подобных изображений можно применять методы искусственного интеллекта (машинное обучение), которым не требуется знание исходного электромагнитного сигнала. Методы машинного обучения преобразуют изображение, используя различные алгоритмы цифровой обработки, искусственные нейронные сети, для извлечения каких-либо объектов, либо областей на изображении.

Применение алгоритмов машинного обучения при интерпретации большого объема георадарных данных, получаемых при обследовании протяженных автомобильных дорог способствует автоматизации процесса поиска ослабленных зон в слоях дорожной одежды, максимальному снижению трудозатрат и экспертозависимости результата интерпретации от влияния человеческого фактора.

Тем не менее, нельзя утверждать, что методы искусственного интеллекта будут являться единственными при интерпретации радарограмм. Эти алгоритмы могут повысить наглядность и производительность, сократить время на обработку исходных георадарных данных. При этом выполнить детальную проверку выделенных аномальных участков, подтвердить наличие ослабленных зон в основании дорожной одежды возможно либо при помощи неинтеллектуальных алгоритмов обработки георадарных данных, а также путем заверки результатов бурением.

Для выделения аномальных участков записи на георадарных профилях чаще всего изучается изменение кинематических и динамических особенностей волнового поля. Анализ изменения

амплитуды отраженного сигнала, а также учет фазово-частотных параметров и параметров, обусловленных поглощением электромагнитного поля во временной и частотной областях, позволяют получить дополнительную информацию о состоянии слоев дорожной одежды, с выделением переувлажненных и разуплотненных участков земляного полотна.

Рассмотрим некоторые типы волновых картин на георадарных профилях, чаще регистрируемых при обследовании автомобильных дорог и соответствующих наиболее распространенным дефектам дорожной одежды.

– ***Полости.*** Полости чаще всего возникают на контакте цементобетонного покрытия и подстилающих слоев дорожной одежды, когда происходит вымывание грунтового массива под твердым покрытием. В этом случае на радарограмме наблюдается изменение коэффициента отражения на границе «*цементобетон-воздух*», отражение от которой будет иметь повышенные значения максимума амплитуды. Высокий контраст на границе дает характерные многократные переотражения, которые проявляются как «звучащий» тип записи волновой картины **(рис. 1) [9]**. При этом в прослое воздуха под цементобетонным покрытием происходит инверсия фазы отраженного сигнала за счет разных по знаку коэффициентов отражения на границе «*цементобетон-воздух*» и «*воздух-грунт*». Кроме того, здесь можно наблюдать изменение частотного состава записи, что проявляется в виде смещения максимума спектра в сторону высоких частот.

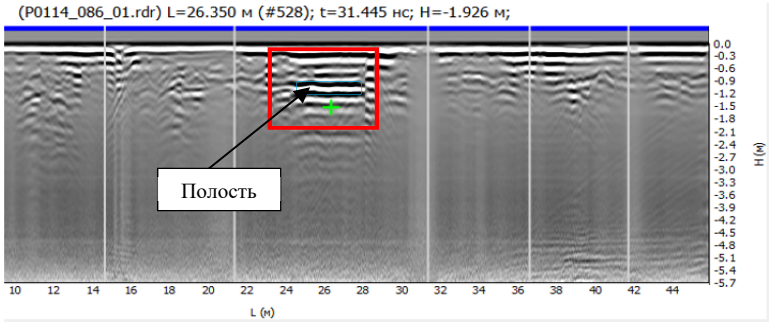


Рис. 1. Фрагмент георадарного профиля с выделенной пустотой под цементобетонным покрытием протяженностью около 4 м:
красным прямоугольником отмечено местоположение аномальной записи на радарограмме, в которой выделена конкретная полость

– ***Участок повышенной влажности.*** Повышение влажности в грунтах основания дорожной одежды приводит прежде всего к увеличению диэлектрической проницаемости **[10, 11]**. Значительное изменение влажности в грунтах основания по латерали проявляется как резкое изменение времени прихода отраженной волны, что сказывается на изменении конфигурации первоначально субгоризонтальных границ конструкции – оси синфазности отраженных волн от подошвы слоя искажаются, проседают **[6]**. При этом на радарограмме может наблюдаться просадка, либо структура, напоминающая «сброс». Также для переувлажненных грунтов характерно понижение частоты отраженного сигнала, что проявляется как увеличение значения атрибута «*энергия сигнала*», наличие протяженных интенсивных осей синфазности отраженного сигнала и кратных переотражений **(рис. 2)**.

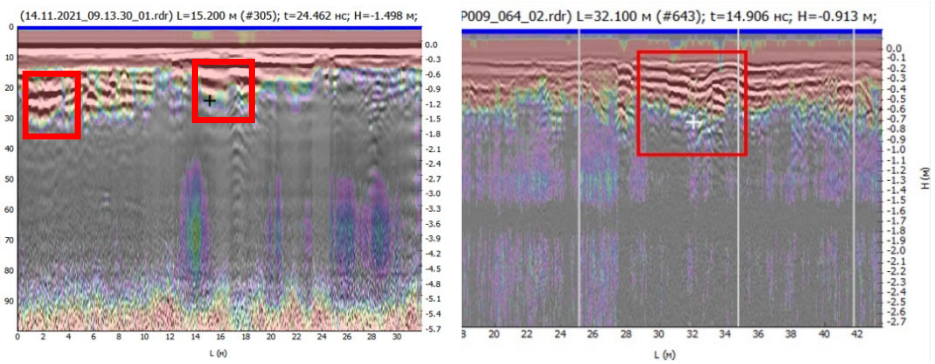


Рис. 2. Фрагменты радарограмм с атрибутом «энергия сигнала»: *выделены участки повышенной влажности в грунтах основания*

– ***Участки обводнения.*** При значительном локальном увеличении влажности грунтов основания (песчано-супесчаного состава), например, вследствие распространения протечек из водопропропускных труб, тип записи волновой картины на георадарном профиле отличается от вышеописанного. При таких процессах увеличивается проводимость грунтов основания и, как следствие, затухание электромагнитного сигнала. На георадарных профилях данный участок записи характеризуется низкоамплитудным «прозрачным» типом записи волновой картины и низкими значениями атрибута «*средневзвешенная частота*» **(рис. 3)**. Необходимо учитывать, что для разных типов грунта (связных, несвязных) в зависимости от степени

водонасыщенности волновая картина может быть различна. Для дальнейшей классификации планируется выполнить исследования в этом направлении: изучить кинематические характеристики различных типов грунтов в зависимости от степени водонасыщения.

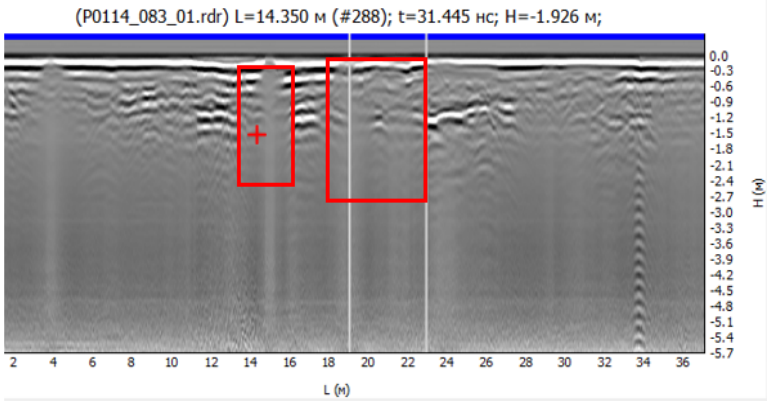


Рис. 3. Фрагмент радарограммы с выделенными участками обводнения в грунтах основания

– ***Разуплотненный грунт.*** Для участков разуплотненного грунта также характерно изменение диэлектрической проницаемости, так как она определяется соотношением трех компонент, слагающих среду (воздух, вода, минеральные зерна). На радарограмме в районе распространения разуплотненного грунта обычно преобладает «хаотический» тип записи волновой картины: выделено скопление гипербол дифракции, образованных от крупных фракций насыпного грунта **(рис. 4)**. Здесь также будет отмечаться увеличение максимальной амплитуды отраженного сигнала.

В дальнейшем данная классификация по кинематическим признакам может использоваться для формирования критериев интерпретации георадарных данных и для целевого подбора определенных атрибутов с целью выделения динамических параметров поля.

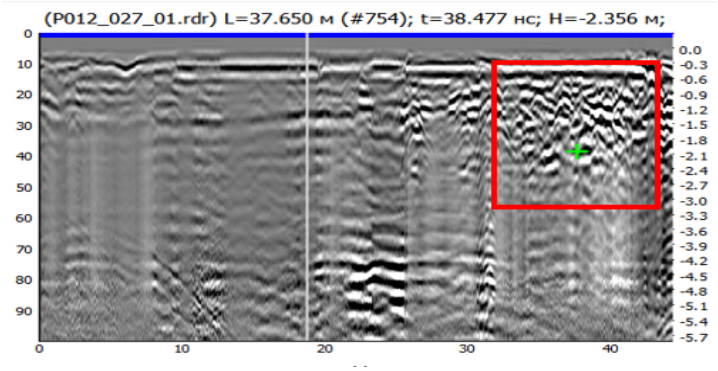
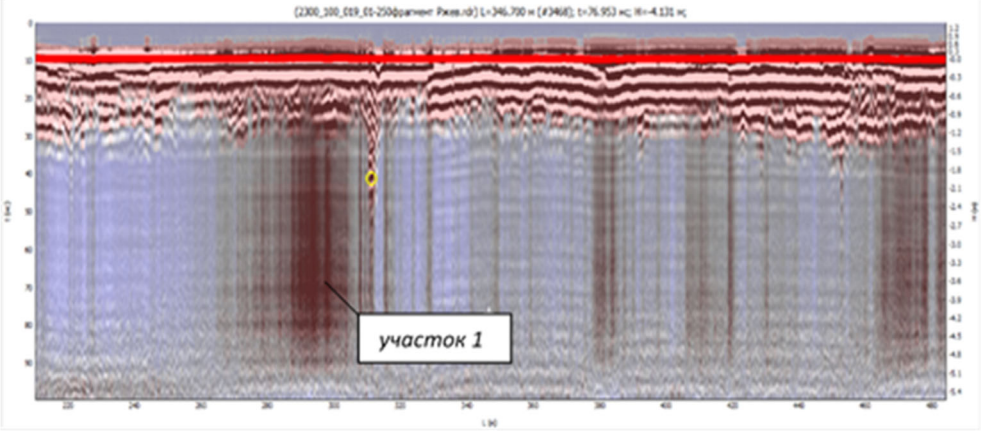


Рис. 4. Фрагмент радарограммы с выделенным участком разуплотненного грунта

После выделения аномальных участков записи на радарограммах с помощью средств атрибутного анализа, на следующем этапе интерпретации для обеспечения автоматизации процесса поиска и распознавания выделенных ослабленных зон выполняется их сегментация с использованием возможностей компьютерного зрения. Идеи компьютерного зрения основаны на анализе изображений, распознавании образов и машинном обучении **[12, 13]**. Среди целого ряда методов машинного обучения можно отметить сверточные нейронные сети (CNN), использование которых в части выделения на изображениях определенных типов аномальных областей позволило достигнуть значительные положительные результаты.

Рассмотрим фрагмент георадарного профиля, полученного при помощи антенного блока 250 МГц на участке автомобильной дороги длиной 500 м. После выполнения минимальных процедур обработки (изменение профиля усиления и вычитание среднего) к данному георадарному профилю применили несколько видов атрибутного анализа: максимум амплитуды, поле затухания, энтропия, энергия сигнала **(рис. 5)**. По изменению тех или иных атрибутов можно сделать вывод о наличии ослабленных зон. На радарограмме в районе ПК 310 на глубине около 2 м от поверхности выделена гипербола дифракции, образованная от водопропускной трубы, расположенной в теле насыпи. Слева от сооружения выделен аномальный участок **(участок 1)** с низкочастотной записью на волновой картине протяженностью около 15 м. Данный участок с достаточной степенью уверенности определяется или как зона максимальных амплитуд **(рис. 5 а)**, или как зона с низкими значениями «поля затухания» **(рис. 5 б)**, при этом он характеризуется низкими значениями энергии сигнала **(рис. 5 в)** и энтропии **(рис. 5 г)**.

а) атрибут «максимум амплитуды»



б) атрибут «поле затухания»

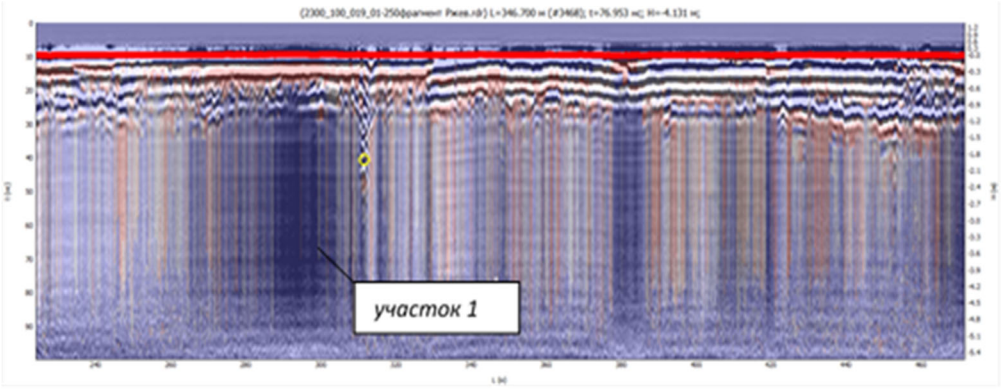
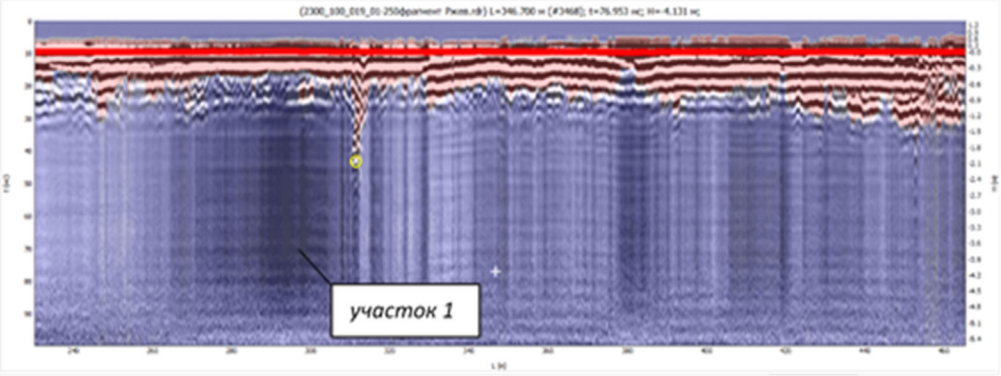


Рис. 5 а, б. Георадарный профиль с антенным блоком 250 МГц после применения различных видов атрибутного анализа
(желтым кружком указано положение водопропускной трубы)

в) атрибут «энергия сигнала»



г) атрибут «энтропия»

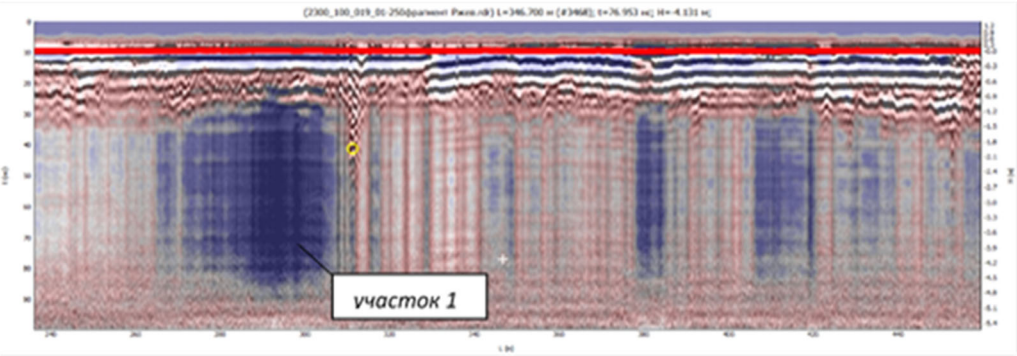


Рис. 5 в, г. Георадарный профиль с антенным блоком 250 МГц после применения различных видов атрибутного анализа
(желтым кружком указано положение водопропускной трубы)

Все рассчитанные атрибуты можно представить как самостоятельные изображения, и на следующем этапе интерпретации данных применить к каждому изображению автоматизированную сегментацию участков записи, отличающихся от общего фона (процедура автоматического поиска и распознавания аномальных областей). Для примера рассмотрим сегментацию для атрибута

максимальной амплитуды **(рис. 6)**. Сегментация ослабленных зон выполнена способом morphological ACWE с подобранными размерами окна для поиска неоднородностей. Данный алгоритм цифровой обработки изображений и распознавания образов позволяет оконтурить поверхности любой криволинейной формы **[12]** и отметить их на изображении прямоугольниками.

В качестве проверки возможностей компьютерного зрения проанализируем отдельно на выделенных участках радарограммы амплитудно-частотные характеристики сигнала. На всех участках, отмеченных прямоугольником на **рис. 6**, действительно можно отметить сдвиг энергии спектра сигнала в область низких частот и высокие значения амплитуды сигнала **(рис. 7)**. Рыхлые грунты обладают увеличенной влагоемкостью по сравнению с грунтами плотного сложения за счет большего значения пористости. Увеличение объемного содержания влаги в грунте приводит к значительному увеличению диэлектрической проницаемости, и, как следствие, изменению динамических особенностей георадарной записи. Динамика сигнала изменяется: спектр сигнала сужается, длительность сигнала увеличивается. Центральная частота спектра сдвигается в сторону низких частот, так как при увеличении влажности центральная частота отраженного сигнала уменьшается.

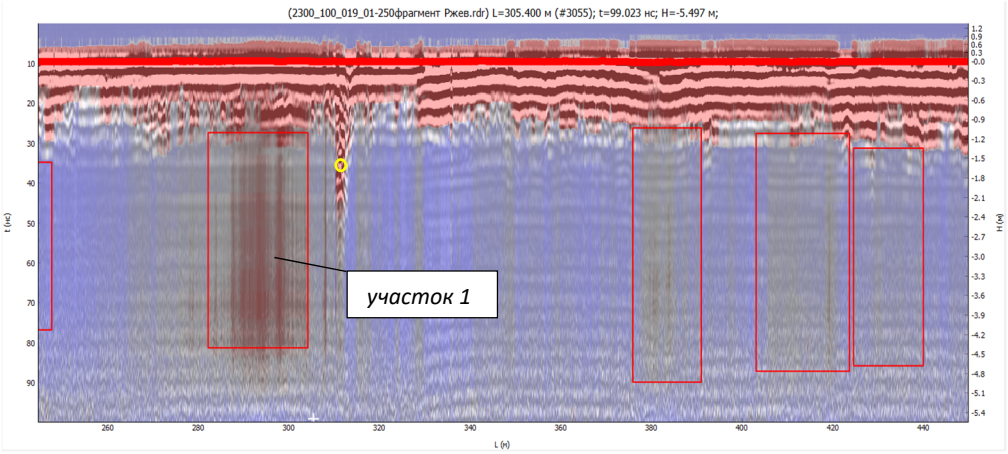


Рис. 6. Фрагмент георадарного профиля на участке ПК 250-445 с атрибутом максимальная амплитуда и выделенными ослабленными зонами методом компьютерного зрения

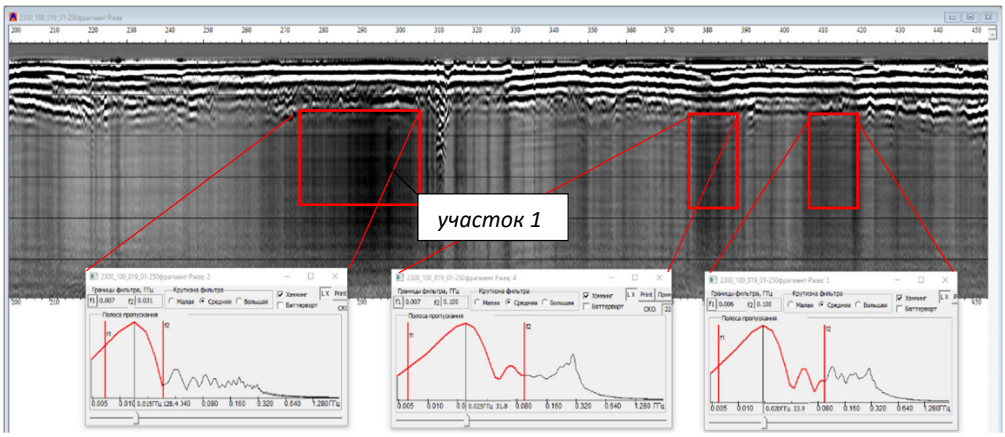


Рис. 7. Модуль спектра сигнала и центральная частота спектра сигнала на выделенных с помощью компьютерного зрения зонах неоднородности

Таким образом, подтверждается, что участки аномальной записи, выделенные на георадарных данных с помощью алгоритма morphological ACWE являются зонами повышенной влажности в грунтах основания. Следует отметить, что протяженная низкочастотная область в левой части **рис. 7** связана с проходящей в насыпи водопропускной трубой на ПК 310 (возможно наличие протечки). Исходя из изложенного выше, можно сделать вывод, что полностью автоматические процедуры атрибутного анализа совместно с инструментами компьютерного зрения позволяют повторить последовательность действий опытного интерпретатора при поиске ослабленных зон в основаниях дорожных конструкций. Вместе с тем, атрибутный анализ позволяет обнаружить изменения динамических признаков волнового поля, а компьютерное зрение – кинематических (т.е. визуальное изменение типа волновой картины).

Аналогичным образом был выполнен анализ некоторых типов волновых картин на георадарных профилях с другими нарушениями (в том числе зоны разуплотнения).

ВЫВОДЫ

1. Значительный объем получаемых георадарных данных при обследовании протяженной сети автомобильных дорог, особенно с применением многоканальных георадарных комплексов, требует максимальной автоматизации процесса обработки и интерпретации радарограмм и достижения качественных результатов диагностики состояния дорожной одежды.
2. Использование различных автоматизированных алгоритмов распознавания образов (методы атрибутивного анализа совместно с инструментом компьютерного зрения), примененных к обработанным георадарным данным, способствует достаточно быстрому выделению неоднородных областей на радарограммах, которые соответствуют ослабленным зонам в подстилающих слоях основания дорожной одежды. При этом необходимо выполнять выборочную проверку на отдельных участках георадарных профилей стандартными средствами анализа амплитудно-частотных характеристик, а также осуществлять обязательную заверку результатов интерпретации бурением.

Направления дальнейших исследований

В настоящее время ФАУ «РОСДОРНИИ» накоплен достаточно обширный опыт по георадарному обследованию участков автомобильных дорог различных категорий общей протяженностью в несколько десятков тысяч километров по всей территории Российской Федерации в разных климатических зонах. В свободном доступе в различных отчетах о НИР, технических отчетах и публикациях специалистов (в том числе дорожников) содержатся примеры различных дефектов (разуплотненные зоны, пустоты, неоднородные включения, переувлажненные зоны, разрушение монолитных материалов, связность материалов смежных слоев, состояние границ слоев и т.д.). В совокупности с получаемыми новыми георадарными данными по современным типам конструкций автомобильных дорог, а также в сопоставлении с результатами численного и натурного моделирования имеется возможность сбора уникальной информации по каждому типу дефекта, типу ослабленной зоны с описанием характерных признаков волновой картины и амплитудно-частотных характеристик для каждого типа дефекта.

Направлением дальнейших исследований станет разработка каталога распространенных ослабленных зон, включающего определенное количество типичных фрагментов радарограмм по

каждому типу ослабленной зоны. Такой каталог можно будет использовать в качестве исходных обучающих выборок для алгоритмов искусственного интеллекта. Размер и вариативность обучающей выборки данных будут в целом определять качество прогнозов по результатам работы алгоритмов искусственного интеллекта при обработке и интерпретации георадарных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 32868-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий. – М.: Стандартинформ, 2015. – 57 с.*
2. *ОДМ 218.4.039-2018. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог. – М.: Федеральное дорожное агентство, 2018. – 73 с.*
3. *Кулижников А.М. Прогрессивные методы и современное георадарное оборудование для обследования автомобильных дорог // Дорожная держава. – 2011. – № 32. – С. 26-30.*
4. *Кулижников А.М. Обнаружение дефектов в грунтах земляного полотна и подстилающего основания с помощью георадарных технологий / А.М. Кулижников, А.А. Белозеров, С.Н. Бурда / Актуальные проблемы современного дорожного строительства и хозяйства: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Вологда: ВоГГУ, 2002. – С. 73-77.*
5. *Кулижников А.М. Георадарные методы инженерно-геологических изысканий автомобильных дорог с одеждами жесткого типа / А.М. Кулижников, Р.Р. Денисов // Дороги и мосты. – 2007. – № 1 (17). – С. 55-67.*
6. *Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие. – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.*
7. *Капустин В.В. Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования / В.В. Капустин, А.В. Синицын // Геофизика 2018. – № 2. – С. 17-23. [Электронный ресурс] : Режим доступа:http://geofdb.com/articles/view?id=1992 (дата обращения: 12.07.2022).*
8. *Pudova N.A. Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data. / N.A. Pudova, M. Shirobokov, A. Kuvaldin // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018. – doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441609.*
9. *Старовойтов А.В. Выделение пустот методом георадиолокации / А.В. Старовойтов, А.М. Пятилова, Н.В. Шалаева,*

А.Ю. Калашников // Инженерные изыскания, 2013. – № 13. – С. 26-33.
10. *Владов М.Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учебное пособие / М.Л. Владов, М.С. Судакова. – М.: Изд-во «ГЕОС», 2017. – 240 с.*
11. *Jol H.M. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 509 p.*
12. *Szymczyk P. Neural Networks as a Tool for Georadar Data Processing / P. Szymczyk, S. Tomecka-Suchon, M. Szymczyk // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 25 (4) (2015) 955–960 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doi.org/10.1515/445amcs- 2015-0068 (дата обращения: 10.07.2022).*
13. *Еремин Р.А. Применение компьютерного зрения для интерпретации георадарных данных / Р.А. Еремин, Д.А. Целковнев, Ю.А. Сухобок, Л.Р. Верховцев // Мир дорог. – 2020. – № 131. – С. 86-91.*
14. *Márquez-Neila P. A Morphological Approach to Curvature-Based Evolution of Curves and Surfaces. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence [Электронный ресурс]. – Режим доступа:http://www.dia.fi.upm.es/~lbaumela/WEB/publications/pami 2013.pdf (дата обращения : 10.07.2022).*

L I T E R A T U R A

1. *GOST 32868-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Trebovaniya k provedeniyu inzhenerno-geologicheskih izyskanij. – M.: Standartinform, 2015. – 57 s.*
2. *ODM 218.4.039-2018. Rekomendacii po diagnostike i ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog. – M.: Federal'noe dorozhnoe agentstvo, 2018. – 73 s.*
3. *Kulizhnikov A.M. Progressivnye metody i sovremennoe georadarnoe oborudovanie dlya obsledovaniya avtomobil'nyh dorog // Dorozhnaya derzhava. – 2011. – № 32. – S. 26-30.*
4. *Kulizhnikov A.M. Obnaruzhenie defektov v gruntah zemlyanogo polotna i podstilayushchego osnovaniya s pomoshch'yu georadarnyh tekhnologij / A.M. Kulizhnikov, A.A. Belozerov, S.N. Burda // Aktual'nye problemy sovremennogo dorozhnogo stroitel'stva i hozyajstva: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. – Vologda: VoGGU, 2002. – S. 73-77.*
5. *Kulizhnikov A.M. Georadarnye metody inzhenerno-geologicheskih izyskanij avtomobil'nyh dorog s odezhdami zhestkogo tipa /*

A.M. Kulizhnikov, R.R. Denisov // Dorogi i mosty. – 2007. – № 1 (17). – S. 55-67.

6. *Starovojtov A.V. Interpretaciya georadiolokacionnyh dannyh: uchebnoe posobie. – M.: Izdatel'stvo MGU, 2008. – 192 s.*
7. *Kapustin V.V. Primenenie atributnogo analiza dlya resheniya prikladnyh zadach georadarnogo profilirovaniya / V.V. Kapustin, A.V. Sinicyn // Geofizika 2018. – № 2. – S. 17-23. [Elektronnyj resurs]: Rezhim dostupa:http://geofdb.com/articles/view?id=1992 (data obrashcheniya: 12.07.2022).*
8. *Pudova N.A. Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data. / N.A. Pudova, M. Shirobokov, A. Kuvaldin // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2018. – doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441609.*
9. *Starovojtov A.V. Vydelenie pustot metodom georadiolokacii / A.V. Starovojtov, A.M. Pyatilova, N.V. Shalaeva, A.Yu. Kalashnikov // Inzhenernye izyskaniya, 2013. – № 13. – S. 26-33.*
10. *Vladov M.L. Georadiolokaciya. Ot fizicheskih osnov do perspektivnyh napravlenij: uchebnoe posobie / M.L. Vladov, M.S. Sudakova. – M.: Izd-vo «GEOS», 2017. – 240 s.*
11. *Jol N.M. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 509 p.*
12. *Szymczyk P. Neural Networks as a Tool for Georadar Data Processing. / P. Szymczyk, S. Tomecka-Suchon, M. Szymczyk // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. 25 (4) (2015) 955–960 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://doi.org/10.1515/445amcs- 2015-0068 (data obrashcheniya: 10.07.2022).*
13. *Eremin R.A. Primenenie komp'yuternogo zreniya dlya interpretacii georadarnyh dannyh / R.A. Eremin, D.A. Celkovnev, Yu.A. Suhobok, L.R. Verhovcev // Mir dorog. – 2020. – № 131. – S. 86-91.*
14. *Márquez-Neila P. A Morphological Approach to Curvature-Based Evolution of Curves and Surfaces. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa:http://www.dia.fi.upm.es/~lbmela/WEB/publications/pami2013.pdf (data obrashcheniya : 10.07.2022).*

METHODOLOGICAL APPROACHES TO DETECTION OF WEAKENED ZONES IN THE ROAD PAVEMENT BY DYNAMIC AND KINEMATIC FEATURES

*Doctor of Engineering **A.M. Kulizhnikov**,*
*Ph. D. (Tech.) **R.A. Eremin**,*
*Engineer **N.G. Pudova**,*
*Engineer **E.O. Zverev***
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information: kulizhnikov@rosdornii.ru;
r.eremin@rosdornii.ru;
pudova@rosdornii.ru
zvereveo@rosdornii.ru

The article presents the problem solution of identifying weakened zones (areas of increased moisture, materials disintegration or decompaction, settlements, etc.) in road pavement structural layers. The use of different automated image recognition algorithms (attribute analysis methods together with the computer vision tool) in georadar data processing and interpretation helps to quickly enough detect heterogeneous areas on radarograms that correspond to weakened zones in base underlayers of road pavement.
***Key words**: road pavement, radarogram, attribute analysis, machine learning, weakened zone, amplitude, frequency.*

Рецензент: канд. техн. наук Н.А. Лушников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).
Статья поступила в редакцию: 25.07.2022 г.