

УДК 625.8:550.835

## ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

Канд. техн. наук Р.А. Еремин  
(ФАУ «РОСДОРНИИ»),

канд. техн. наук, доцент Ю.А. Сухобок  
(Дальневосточный государственный

университет путей сообщения),

аспирант Н.Ю. Рассадкин

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Конт. информация: +7(967)448-78-75;

+7(967)448-78-75;

+7(977)864-82-91;

r.eremin.01@gmail.com;

khvyus@gmail.com;

battleg@yandex.ru

Приведены результаты обследования и изысканий дорожных одежд автомобильных дорог с помощью новой технологии геопространственного моделирования георадарных данных, которая является симбиозом георадиолокационной и геодезической съемок. Рассмотрены результаты решения задач по оценке толщины слоев дорожной одежды, выявлению участков проседания слоев дорожной одежды и объяснению причин деформации дорожного покрытия. Отличием предлагаемой технологии от похожих решений зарубежных компаний, таких как Roadscanners (Финляндия), IDS (Италия), MALA Geoscience (Швеция) и др., является высокая универсальность и ориентированность на отечественную практику в области дорожного хозяйства Российской Федерации.

**Ключевые слова:** дороги, искусственные сооружения, дорожная одежда, толщина слоев, георадар, лазерное сканирование, спутниковые системы, 3D модели, системы автоматизированного проектирования, геоинформационные системы.

В настоящее время в России и за рубежом при осуществлении оценки состояния и контроля качества автомобильных дорог все чаще используются такие современные технологии, как георадиолокационное обследование, лазерное сканирование, различные виды съемок беспилотными летательными аппаратами и др. (рис. 1) [1-3]. В Российской Федерации материалы георадиолокационных исследований в основном представляются в формате плоских негеопривязанных 2D моделей в ви-

де вертикальных геологических разрезов, в то время как еще в прошлом веке проф. А.М. Кулижников предложил [4] технологию пространственного моделирования инженерно-геологической и гидрогеологической информации при изысканиях в полосе варьирования автомобильных дорог с применением систем спутникового позиционирования.

В основе рассматриваемой технологии геопространственного моделирования георадарных данных заложен тот же подход, который предложил и описал в своей работе [4] проф. А.М. Кулижников. Принципиальным отличием является ориентированность на обследование дорожных одежд, а не грунтовой среды в естественном залегании. Этим объясняются такие особенности новой технологии, как непрерывная геодезическая привязка георадиолокационных профилей, а не только в опорных точках, а также формирование съемочной сети георадиолокационных данных путем записи параллельных друг другу продольных профилей, а не поперечных по траектории «змейки». Данная технология была разработана в рамках реализации задач по ремонту, реконструкции, новому строительству и содержанию автомобильных дорог Российской Федерации [5]. К таким задачам следует отнести:

- контроль толщины слоев дорожной одежды при новом строительстве и реконструкции дорог;
- оценку толщины и состояния слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна в рамках ремонтных работ и диагностики;
- установление причин деформации дорожного покрытия и тротуаров.

Суть технологии заключается в непрерывной геодезической привязке георадиолокационных профилей с помощью навигационных модулей систем мобильного лазерного сканирования (МЛС) или приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), преобразовании результатов интерпретации георадиолокационных данных в облака и массивы точек, а также экспорте последних в форме 2D, 2,5D и 3D моделей в системы автоматизированного проектирования (САПР) и геоинформационные системы (ГИС).

Возможны два варианта выполнения георадарного обследования в рамках применения технологии: с системой МЛС (георадарно-лазерное сканирование) и без лазерного сканера с привязкой данных только приемниками ГНСС (**рис. 2**).



*Рис. 1. Использование современных технологий обследования автомобильных дорог:*

- а) обследование дорог многоканальным георадаром 3D-Radar (Норвегия);*
- б) мобильное лазерное сканирование отечественной системой АГМ МС-7;*
- в) воздушное лазерное сканирование отечественной системой АГМ МС-3;*
- г) исследование мостового сооружения с помощью роботизированного инспектора RABIT™ (США)*

В случае георадарно-лазерного сканирования выполняется синхронная съемка георадаром и системой МЛС. Навигационный модуль МЛС, состоящий из приемника(ов) ГНСС и инерциальной системы, одновременно является навигационным модулем георадара. В этом случае траектория георадара определяется с точностью в первые сантиметры. При этом облако точек лазерного сканирования используется для формирования цифровых моделей местности или рельефа обследуемого объекта. Цифровая модель подповерхностной среды строится с учетом поверхности модели. Детальность модели подповерхностной среды зависит от плотности георадиолокационных профилей, охватывающих

дорожное покрытие. Применение многоканальных антенных блоков георадара (рис. 1а, г) обеспечивает максимальную детальность таких моделей и наибольшую производительность работ.



*Рис. 2. Внешний вид мобильных лабораторий для геопространственного моделирования георадарных данных:*  
а) георадар с системой МЛС;  
б) георадар с приемником ГНСС

Преимущества данного способа георадиолокационного обследования неоспоримы:

- высокая точность геопространственного позиционирования георадарных данных, в том числе геодезическая точность непрерывной привязки геофизических профилей в плане;
- высокая производительность работ;
- доступность различных инструментов сопоставительного анализа моделей поверхностной и подповерхностной сред;
- повышение объективности результатов георадиолокационного обследования;
- возможность экспорта данных в среду проектирования в форматах различных САПР, а также в ГИС;
- возможность подготовки схем с результатами обследования в системе координат проекта;

- отсутствие необходимости ведения журналов с записями, абри-сами и др.

Недостатком данного способа является высокая стоимость систем МЛС.

С целью обеспечения доступности технологии геопространственного моделирования георадарных данных широкому кругу пользователей был разработан вариант выполнения обследования без необходимости применения систем МЛС.

В этом случае дополнительно к георадарному оборудованию требуется только ГНСС приемник геодезического класса и возможность получения данных с базовой станции в районе выполнения работ. При этом цифровую модель местности или рельефа получают по данным традиционной топографо-геодезической съемки. При работе с данным вариантом компоновки оборудования точность плановой привязки георадарных профилей может составить значения от нескольких сантиметров до первых дециметров, однако, как показывает практика, и таких значений точности в подавляющем большинстве случаев достаточно для получения объективного результата георадарного обследования.

Для оценки толщины слоев дорожной одежды наиболее удобно применение бесконтактных антенных блоков, поскольку они позволяют выполнять сбор геопространственных данных на скорости движения транспортного потока. При этом, как правило, применяют высокочастотные антенные блоки (от 1000 МГц), что позволяет получать наиболее высокую разрешающую способность данных по глубине [2,6]. Высокая частота антенных блоков объясняется небольшой толщиной дорожных одежд, обычно до 1,5 м.

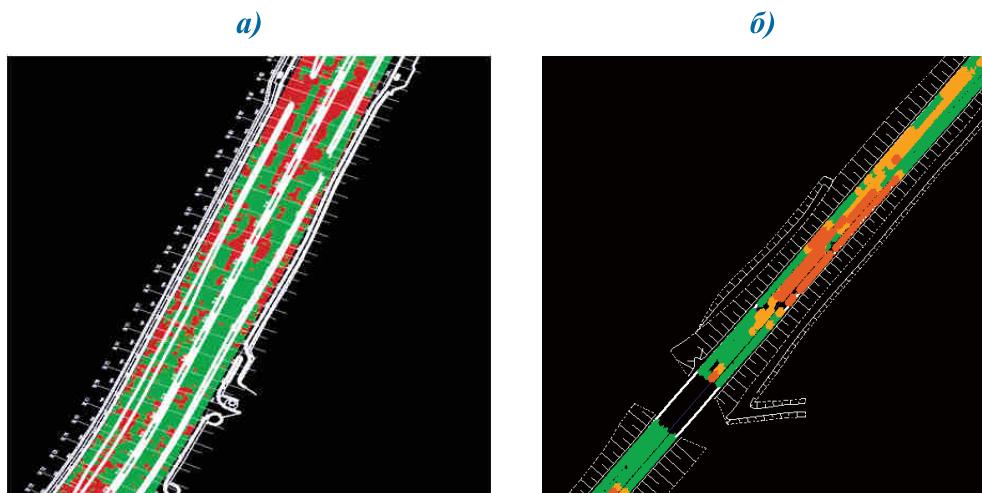
Пример результатов георадиолокационного контроля толщины слоев дорожной одежды с применением технологии геопространственного моделирования представлен на **рис. 3**. Для обеспечения возможности построения подобных схем георадиолокационное обследование выполняют методом параллельного продольного профилирования, при этом необходимо записать не менее 2 профилей на каждую полосу движения.

На **рис. 3 а** представлены результаты георадарной оценки толщины асфальтобетонного слоя в рамках приемочного контроля. Представлена схема автомобильной дороги с дублерами общей шириной 70 м (с учетом разделительных полос). Ширина проезжей части по основному ходу в каждом направлении – 16,5 м, ширина дублеров – 11 м. Было осуществлено по 2 проезда по каждой полосе. Всего выполнено по 8 проездов по каждому основному ходу и – по 6 проездов по каждому дублеру. В данном примере диапазон толщин по данным георадара раз-

делен на 2 группы: зеленый цвет соответствует толщине 17 см и более, красный – менее 17 см, при условии, что диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) асфальтобетона равна 5,5.

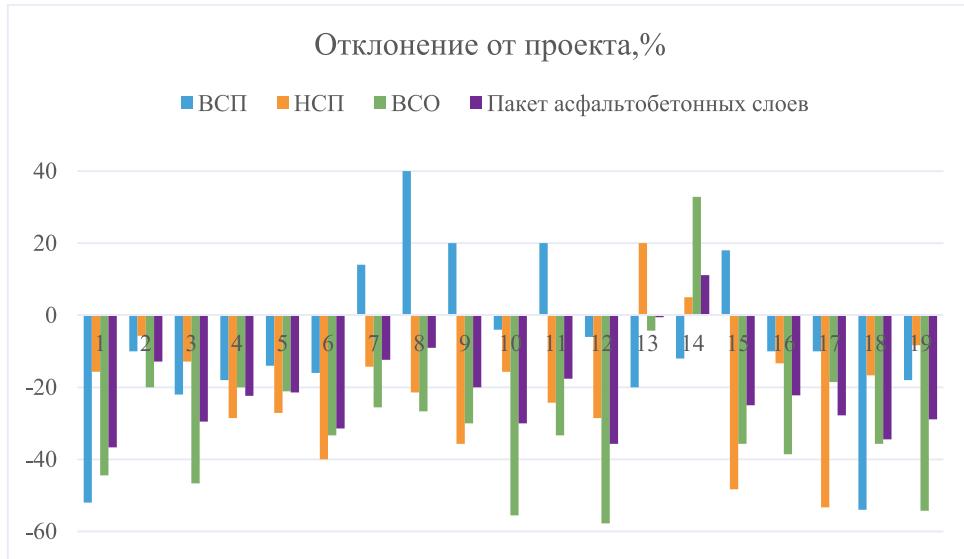
На **рис. 3 б** представлены результаты контроля толщины слоев в рамках инженерно-геологических изысканий. Представлена схема двухполосной автомобильной дороги с шириной проезжей части 7-10 м. Всего выполнено 4 параллельных проезда по дороге. Для слоя из щебеночно-песчаной смеси приняты следующие значения интервалов толщины и соответствующие им цвета: зеленые точки – слой щебеночно-песчаного слоя толщиной 30 см и менее; оранжевые точки – от 30 см до 40 см (включительно); красные точки – более 40 см (принято значение  $\epsilon=8$ ).

В первом случае (**рис. 3 а**) обследование выполнено по варианту георадарно-лазерного сканирования до буровых работ, после чего на участках, характеризующихся красным цветом, были отобраны керны из асфальтобетонного слоя (всего 19 точек). Результаты контрольного бурения представлены на **рис. 4**.



**Рис. 3. Результаты геопространственного моделирования георадарных данных при контроле толщины слоев дорожной одежды:**

- a – контроль толщины пакета асфальтобетонных слоев;*
- б – контроль толщины слоя из щебеночно-песчаной смеси*



**Рис. 4. Отклонение толщины слоев от проектных значений:**  
**ВСП – верхний слой покрытия;**  
**НСП – нижний слой покрытия;**  
**ВСО – верхний слой основания**

Отбор кернов показал среднее отклонение в меньшую сторону толщины пакета асфальтобетонных слоев на разных участках от 18,25% до 23,25%. Максимальное отклонение от проектных значений в меньшую сторону составило по верхнему слою покрытия – 54% (27 мм), по нижнему слою покрытия – 53,33% (32 мм), по верхнему слою основания – 57,78% (52 мм), по пакету асфальтобетонных слоев в целом – 36,67% (77 мм).

В приведенном примере георадиолокационная съемка использовалась для получения непрерывной информации об относительном изменении толщины слоев и обоснования мест контрольного бурения, являющегося обязательной процедурой оценки соответствия толщины и материалов дорожной одежды. При этом полученная по данным проходки выработок информация позволяет сместить по высоте результаты непрерывной георадарной съемки и посадить их на нужную глубину. Этот процесс обычно называют калибровкой, заверкой или корректировкой георадарных данных по результатам бурения.

Далее будут представлены сопоставительные данные (табл. 1) о значениях толщины пакета асфальтобетонных слоев по результатам георадарной съемки и бурения. Поскольку георадарная съемка предшествовала бурению, представлены исходные результаты георадиолокаци-

онной оценки толщины асфальтобетона при указанных ранее электрофизических свойствах ( $\epsilon=5,5$ ) без выполнения каких-либо калибровок и корректировок по данным выработок.

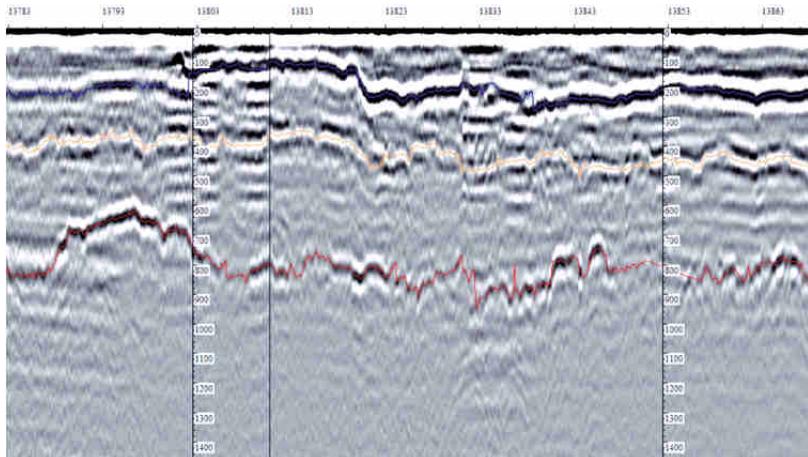
Как видно из **табл. 1**, расхождения между данными георадарных измерений и бурения преимущественно не превышают 20%, а средние значения близки к 10% или 1 см. Имеет место и существенное расхождение (керн №13), вызванное разностью подходов: георадарная съемка выполнялась с геодезической привязкой, а вынос точек бурения и нанесение результатов на план – с помощью линейной привязки. В качестве обоснования необъективности данных бурения ввиду ошибок позиционирования приводится фрагмент одного из 2 параллельных георадарных профилей (**рис. 5**). Вертикальная линия на ПК138+10 соответствует местоположению керна, на участке ПК138+00 – ПК138+20 толщина асфальтобетонного слоя снижается до 10 см, в то время как по данным бурения она здесь составляет 17,9 см. Причиной расхождения толщины слоев и данных бурения является как не полное соответствие местоположений точек наблюдения, при этом важную роль в обеспечении соответствия результатов играет однородность толщины слоя (чем она лучше, тем менее вероятны расхождения данных), так и усреднение электрофизических свойств асфальтобетона. Для получения полного соответствия результатов по толщине слоев разрушающими и неразрушающими методами необходимо в каждой точке наблюдения георадаром использовать фактическое значение диэлектрической проницаемости. Однако очевидно, что невозможно проверить каждую точку георадиолокационного сканирования бурением, в связи с чем в настоящее время решают задачу неразрушающего измерения толщины слоя методом общей глубинной точки [7], но для успешной апробации метода требуется выполнить ряд исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Во втором случае (**рис. 3 б**) схема подготовлена уже после выполнения буровых работ и корректировки результатов георадарного обследования по данным проходки выработок. В данном примере расхождения между данными откалиброванной георадарной съемки и результатами бурения более существенные (среднее значение расхождения данных – 17%). Вызвано это тем, что точки бурения не согласовывались с производителями георадиолокационной съемки и могли находиться на достаточном удалении от траектории движения георадара. Это указывает на то, что основной объем бурения целесообразно выполнять после получения предварительных результатов георадиолокационного обследования, которое является обоснованием местоположения скважин, в том числе необходимо располагать выработки как можно ближе к траектории движения георадара.

**Таблица 1**  
**Сравнительные данные определения толщины общего пакета асфальтобетонных слоев георадаром и путем бурения**

№ карниза	Толщина по керну, см	Толщина слоя а/б <sup>1</sup> , определенная георадаром, см (ход №1)	Удаленность точки сканирования георадаром от точки бурения, м	Расхождение между данными по ходу №1		Толщина слоя а/б*, определенная георадаром, см (ход №2)	Удаленность точки сканирования георадаром от точки бурения, м	Расхождение между данными по ходу №2	
				%	см			%	см
1	13,3	12	1,8	10,8	1,3	14	2,4	5,0	0,7
2	18,3	15	0,6	22,0	3,3	-	-	-	-
3	14,8	14	1,2	5,7	0,8	13	2,3	13,8	1,8
4	16,3	15	1,2	8,7	1,3	15	2,9	8,7	1,3
5	16,5	15	0,5	10,0	1,5	-	-	-	-
6	14,4	12	1,2	20,0	2,4	13	2,7	10,8	1,4
7	18,4	16	0	15,0	2,4	-	-	-	-
8	19,1	16	0	19,4	3,1	-	-	-	-
9	16,8	15	0,8	12,0	1,8	-	-	-	-
10	14,7	14	2,6	5,0	0,7	13	1,3	13,1	1,7
11	17,3	15	2,2	15,3	2,3	15	2,0	15,3	2,3
12	13,5	14	1,5	3,6	0,5	14	2,0	3,6	0,5
13	17,9	10	0,5	79,0*	7,9*	10	0,5	79,0*	7,9*
14	20,0	17	0,5	17,6	3	-	-	-	-
15	13,5	12	0	12,5	1,5	-	-	-	-
16	14,0	13	2,3	7,7	1	13	1,1	7,7	1
17	13,0	11	2,2	18,2	2	11	1,6	18,2	2
18	11,8	11	0,8	7,3	0,8	13	2,3	9,2	1,2
19	12,8	13	0	1,5	0,2	-	-	-	-
<i>Среднее</i>				11,8	1,6	<i>Среднее</i>		10,5	0,7

*Примечание: \* Не учитывается при расчете средних значений. <sup>1</sup> а/б – асфальтобетон.*



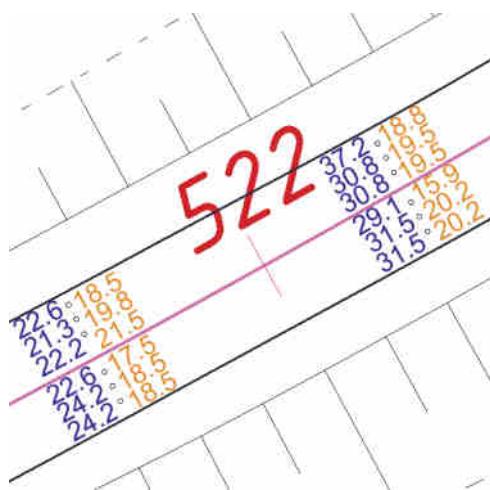
*Рис. 5. Фрагмент георадарного профиля, записанного оборудованием ОКО-2, 1000 МГц  
(синий цвет – подошва асфальтобетона,  
оранжевый – подошва бетона, красный – подошва щебеночного слоя)*

Преимущество подобных схем (**рис. 3 а,б**) состоит в том, что результаты могут быть интегрированы в среду автоматизированного проектирования автомобильных дорог в виде трехмерных моделей в системе координат проекта, а проектировщик может оценивать толщину дорожной одежды на том или ином участке и обосновывать проектные решения по ее усилению. При этом у проектировщика появляется дополнительный инструмент оценки полноты и объективности результатов инженерно-геологических изысканий при обследовании дорожных одежд эксплуатируемых автомобильных дорог.

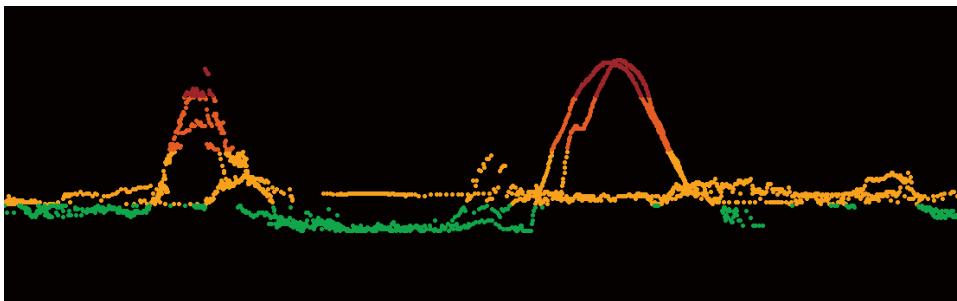
Результаты геопространственного моделирования по толщине могут быть выданы в различных форматах:

- в табличном с координатами точек и толщиной слоя (слоев);
- в формате плоской 2D модели (**рис. 6**) на топографическом плане в виде точек с подписями отметок толщины и определенным шагом поперечных профилей (например, 20 м);
- в формате условно-плоской 2,5D модели (координата Z содержит не абсолютное значение высоты точки, а значение толщины по данным определения георадаром в сантиметрах) в виде массива точек (**рис. 3, 7**) с их цветовой классификацией по толщине;

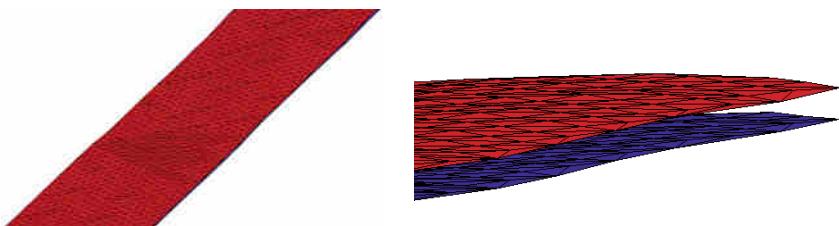
- в формате 3D модели (рис. 8), где каждой точке соответствуют абсолютные значения широты, долготы и высоты в нужной системе координат.



*Рис. 6. Плоская модель в виде точек с подписями отмечок толщины слоев дорожной одежды (вид в плане)*



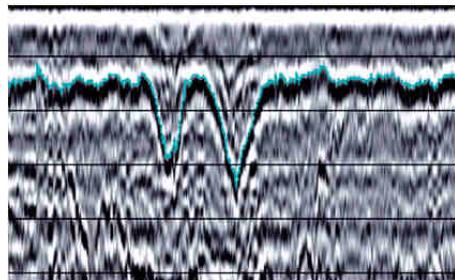
*Рис. 7. Условно-плоская модель в виде массива точек с их цветовой классификацией по толщине слоев дорожной одежды (вид в продольном профиле)*



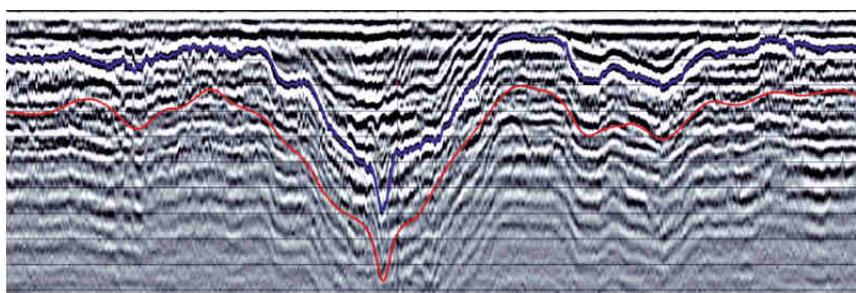
*Рис. 8. Трехмерная (3D) модель  
в виде триангуляционных поверхностей:  
красный цвет – поверхность подошвы асфальтобетонного слоя;  
синий цвет – поверхность подошвы слоя из щебеночно-песчаной смеси*

Рассмотрим конкретные примеры применения технологии геопространственного моделирования георадарных данных при выделении участков проседания слоев дорожной одежды. В подготовке материалов приняли участие сотрудники компании ГЕОТЕХ Н.Г. Пудова и Е.О. Зверев. Фрагменты продольных георадиолокационных профилей приведены на **рис. 9-13**. На всех представленных радарограммах наблюдается значительное (более чем в 2-3 раза) для участков небольшой протяженности увеличение толщины асфальтобетонного слоя до 35-80 см, при его характерных значениях толщины 10-20 см. Под характерными понимаются значения, преобладающие по данным бурения 25 скважин из 32. На **рис. 10** также нанесена граница, соответствующая подошве подстилающего асфальтобетон слоя из щебеночно-песчаной смеси (ЩПС). Во всех случаях на участках значительного увеличения мощности видны границы напластования в асфальтобетонном слое, что указывает на последствия ремонта покрытия. Очевидно, что в данных зонах имеет место просадочный процесс в грунтах земляного полотна или его основании, приводящий к подобным изменениям.

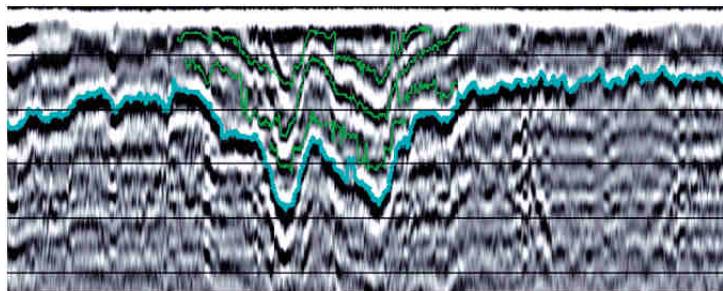
По данным бурения толщина асфальтобетона достигает 50 см, существенное изменение толщины подтверждено и непрерывной георадарной съемкой. Результаты георадарного обследования по выявлению участков проседания границ раздела слоев дорожной одежды могут быть представлены как в виде трехмерной модели (**рис. 7**), так и в виде плоской (**рис. 14**).



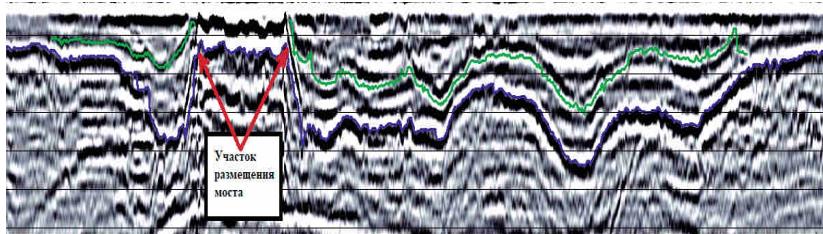
*Рис. 9. Радарограмма продольного профиля (георадар ОКО-2, 1000 МГц) с выделенной подошвой асфальтобетонного слоя:  
размер фрагмента профиля 300x0,5 м  
(подошва слоя асфальтобетона выделена голубой линией)*



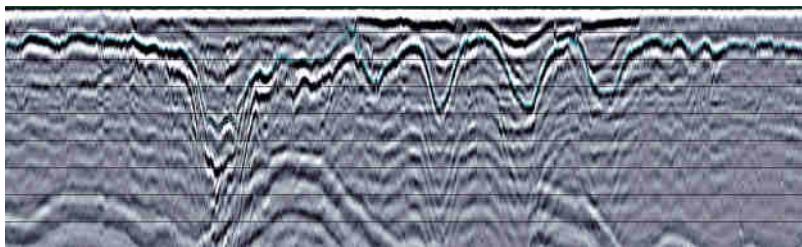
*Рис. 10. Радарограмма продольного профиля  
(георадар ОКО-2, 1000 МГц):  
размер фрагмента профиля 400x1,1 м  
(синяя линия – подошва слоя асфальтобетона;  
красная линия – подстилающий слой из ЩПС)*



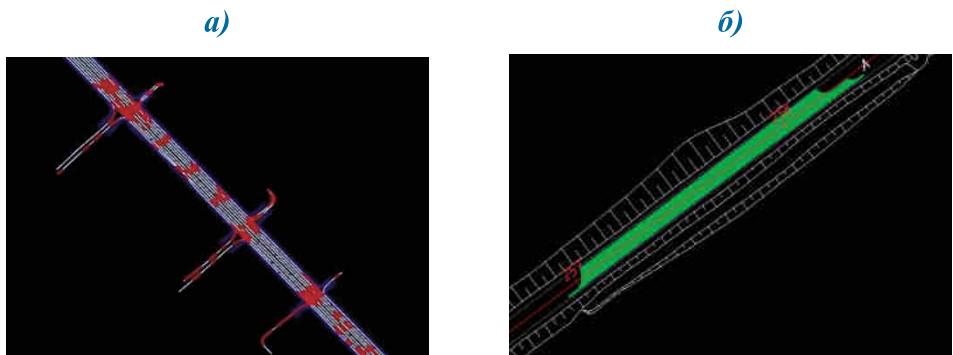
*Рис. 11. Радарограмма продольного профиля  
(георадар ОКО-2, 1000 МГц):  
размер фрагмента профиля 350x0,6 м  
(голубая линия – подошва слоя асфальтобетона;  
зеленая линия – границы напластования в асфальтобетоне)*



**Рис. 12. Радарограмма продольного профиля  
(георадар ОКО-2, 1000 МГц) на подходах к мосту:  
размер фрагмента профиля 240x0,6 м  
(синяя линия – подошва слоя асфальтобетона;  
зеленая линия – граница напластования в асфальтобетоне)**



**Рис. 13. Радарограмма продольного профиля  
(георадар ОКО-2, 1000 МГц):  
размер фрагмента профиля 510x0,8 м  
(голубая линия – подошва слоя асфальтобетона)**



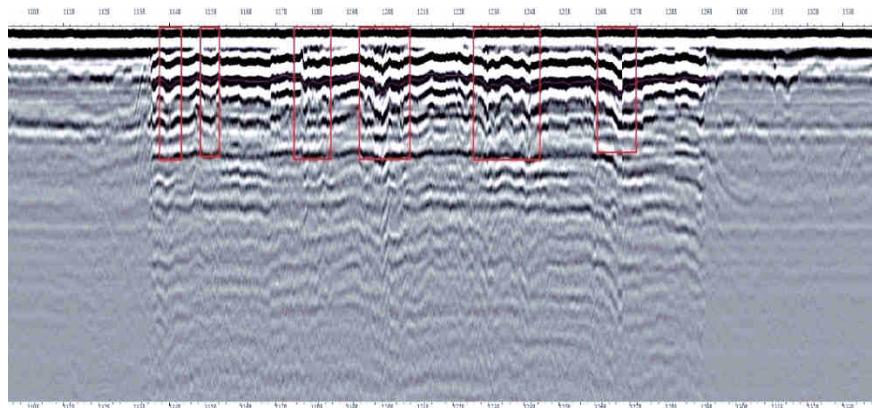
**Рис. 14. Пример плоской модели:**  
*а* – участки просадочных деформаций на точках  
траектории движения георадара выделены красным цветом;  
*б* – участки просадочных деформаций выделены  
полигонаами зеленым цветом

Технология геопространственного моделирования георадарных данных может быть использована для объяснения причин образования дефектов на дорожном покрытии искусственных сооружений. Так, в октябре 2016 г. было проведено георадарное обследование путепровода через железную дорогу. По данным организации, занимающейся содержанием объекта, уже с первого года эксплуатации на асфальтобетонном покрытии путепровода (2010 г.) стали проявляться деформации. После ремонта верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, произведенного в 2013 г., аналогичные разрушения повторились на тех же участках.

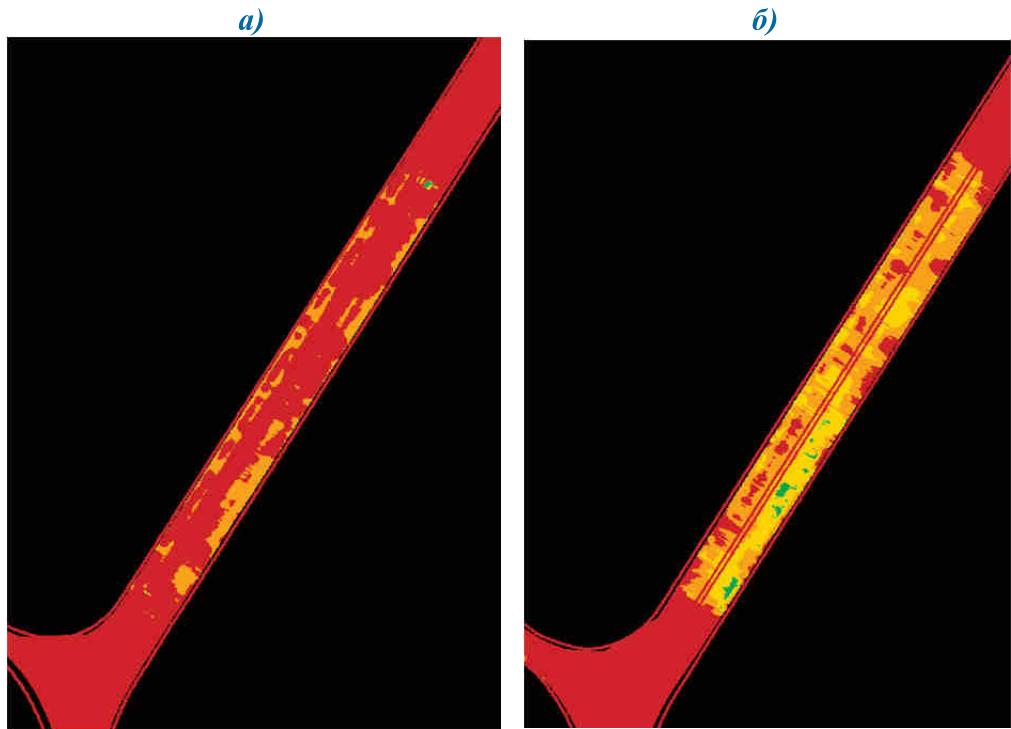
По результатам георадиолокационного обследования установлены признаки повышенной влажности под асфальтобетонным покрытием путепровода (переотражение сигнала). Поведение границ раздела слоев *покрытие-основание* указывает на наличие вертикальных перемещений (**рис. 15**).

По данным георадарно-лазерного сканирования было установлено, что местоположение указанных деформаций, как правило, соответствует положению ремонтных карт на покрытии, однако зафиксированы также участки, где имеются нарушения подповерхностной структуры без каких-либо проявлений на дневной поверхности.

Повторное обследование в рамках мониторинга участка было выполнено в начале марта 2017 г. На радарограммах одного и того же участка, записанных в разное время, была выделена граница подошвы асфальтобетонного слоя. Диэлектрическая проницаемость среды задавалась одинаковой. Результаты построения трехмерных моделей (**рис. 16**) показали, что в весенний период при тех же электрофизических свойствах толщина асфальтобетонного слоя оказалась меньше, чем осенью. Фактически же толщина не изменилась. Это свидетельствует об увеличении диэлектрической проницаемости за зимний период вследствие повышения влажности материала. Кроме того, можно отметить более неоднородный характер распределения цвета точек моделей, полученных в ходе георадарной съемки путепровода весной 2017 г. по сравнению с осенью 2016 г. (в 2016 г. все значения толщины слоя попадают в 2 цветовых диапазона, а в 2017 г.– в 4 цветовых диапазона). Следовательно, имеется неоднородное распределение влажности на участке. Подтверждается гипотеза о наличии структурных нарушений в дорожной одежде путепровода, способствующих накоплению воды и деформациям покрытия.



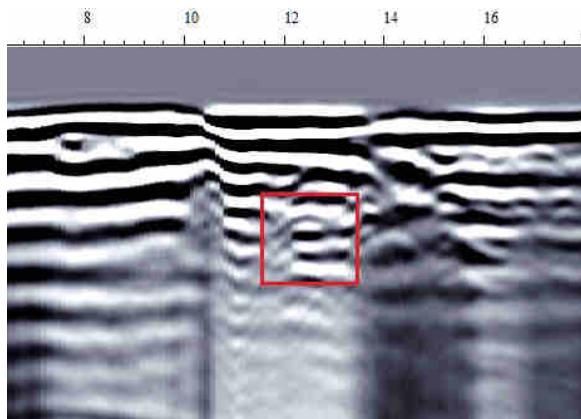
*Рис. 15. Радарограмма продольного профиля  
(георадар ОКО-2, 1000 МГц) по путепроводу  
(просадочные участки выделены красным цветом)*



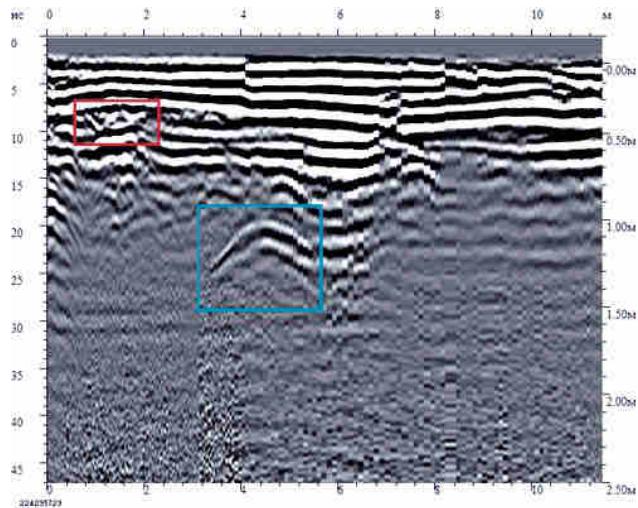
*Рис. 16. Результаты георадиолокационного  
мониторинга путепровода:  
а – 2016 г.; б – 2017 г.  
(ширина проезжей части по каждому направлению движения – 8 м;  
4 прохода по каждому направлению)*

Приведем примеры применения технологии геопространственного моделирования георадарных данных для объяснения причин деформации дорожного покрытия, тротуаров и т.п. в городских условиях. На **рис. 17** на основании георадарного обследования по гиперболическому отражению под местом провала выявлено наличие водонесущей трубы и признаков переувлажнения (переотражение сигнала). На **рис. 18** представлена радарограмма поперечного прохода по проезжей части, у внешней кромки покрытия которого был обнаружен провал. На основании георадарного обследования было установлено, что в непосредственной близости к месту провала под дорожной одеждой проложена инженерная коммуникация, имеющая непосредственное отношение к образованию дефекта покрытия. На **рис. 19** представлена поперечная радарограмма с места провала асфальтобетонного покрытия. По данным георадарного обследования было установлено наличие подземной коммуникации непосредственно под местом провала.

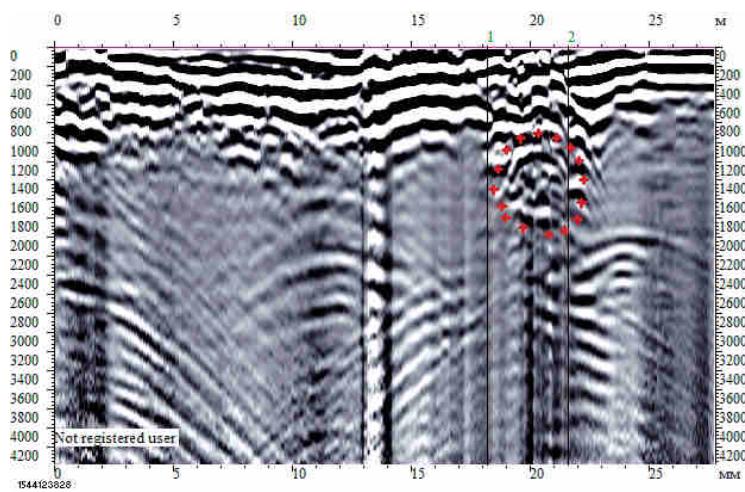
Во всех указанных примерах разрушение дорожной одежды обусловлено влиянием инженерных коммуникаций, в том числе протечек из них. В данном случае актуально применение георадарно-лазерного сканирования, которое позволяет зафиксировать положение дефектов на дорожном покрытии, люков смотровых колодцев и соотнести их местоположение с результатами георадарного обследования (**рис. 20**).



**Рис. 17. Установление местоположения водонесущей трубы**  
(выделено красным цветом; георадар ОКО-2, 250 МГц)



**Рис. 18. Радарограмма поперечного прохода по проезжей части  
(красным цветом выделено место провала;  
синим – местоположение коммуникации;  
георадар ОКО-2, 700 МГц)**



**Рис. 19. Радарограмма продольного прохода  
(вертикальные метки 1-2 – место провала;  
георадар ОКО-2, 250 МГц)**



*Рис. 20. Результаты георадиолокационного обследования участка деформации дорожного покрытия*

Для повышения эффективности применения технологии геопространственного моделирования георадарных данных в настоящее время решается задача по разработке соответствующего программного обеспечения. В качестве основы для такого программного комплекса авторами предлагается программа GeoReader, позволяющая выполнять обработку и расшифровку радарограмм: определять скоростные характеристики различных сред, наносить границы раздела слоев, выявлять местонахождение подземных коммуникаций и др. [8].

Программный комплекс состоит из четырех модулей:

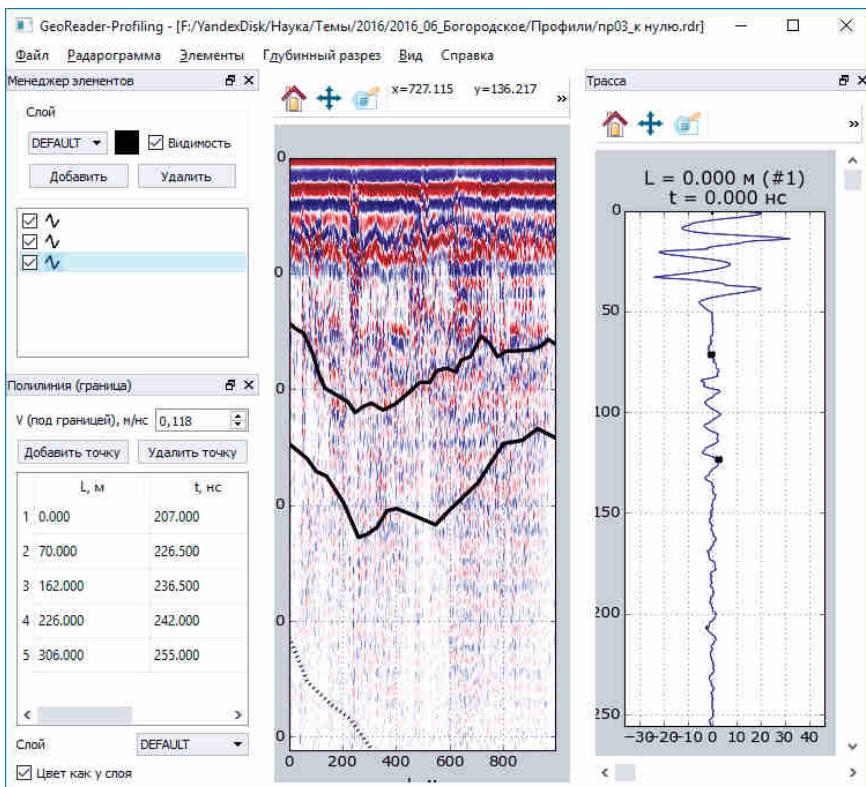
- модуля преобразования исходного временного разреза в глубинный;
- модуля привязки радарограммы к поверхности земли (топографической коррекции);
- модуля обработки годографов и построения грунтовой модели;
- модуля детальной обработки сигналов.

Основной рабочий модуль программы – модуль преобразования временного разреза в глубинный (**рис. 21**). В него включены возможности выделения границ раздела сред между слоями и дифракционных гипербол, импорта исходных данных для различных видов георадаров, исходные преобразования радарограмм (нормировка амплитуд, коррекция дрейфа нуля, фильтрация и пр.), преобразование исходного временного разреза в глубинный. Кроме того, имеется возможность экспорта результата в чертеж системы автоматизированного проектирования AutoCAD с генерацией оформления в соответствии с нормами единой системы конструкторской документации (ЕСКД).

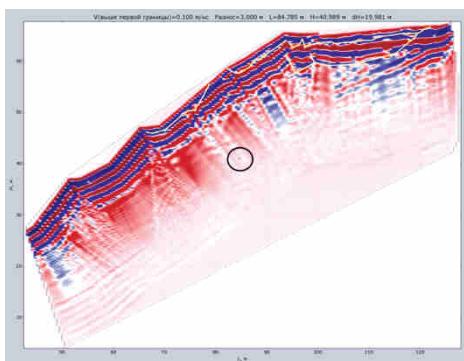
В модуль топографической коррекции включен алгоритм, основанный на геометрических преобразованиях исходной радарограммы в зависимости от отметок профиля. После выполнения преобразования отображается глубинный разрез (рис. 22).

Модуль обработки гидографов и построения грунтовой модели предназначен для определения скоростных характеристик сред по методу общей глубинной точки (ОГТ). В программу встроена авторская методика расшифровки таких данных [9].

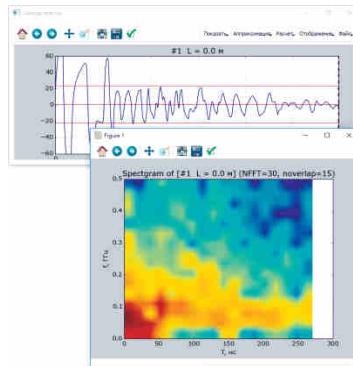
Наконец, в модуль детальной обработки трасс включены основные алгоритмы цифровой обработки сигнала: спектральный анализ, выделение статических параметров трасс, высокочастотная и низкочастотная фильтрация сигналов, преобразование Гильберта, автоматическое построение огибающей сигнала и др. (рис. 23).



*Рис. 21. Интерфейс рабочей области для преобразования временного разреза в глубинный разрез*



**Рис. 22. Радарограмма, привязанная к поверхности земли: выделена текущая точка**



**Рис. 23. Модуль детальной обработки сигнала в программе GeoReader: приведена рассчитанная спектрограмма сигнала**

В настоящее время решается задача по интеграции программы GeoReader с системами автоматизированного проектирования и геоинформационными системами посредством дополнительного САПР/ГИС модуля, обеспечивающего в интерактивном режиме обмен данными различных программных комплексов.

## ВЫВОДЫ

1. Технология геопространственного моделирования георадарных данных успешно апробирована на этапах изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.
2. Технология геопространственного моделирования георадарных данных позволяет осуществлять контроль толщины слоев дорожной одежды и выявлять участки минимальной толщины с высокой точностью.
3. При использовании технологии геопространственного моделирования георадарных данных по значительному увеличению толщины асфальтобетона на участках небольшой протяженности можно с высокой точностью локализовать в плане области с просадочными деформациями в основании.
4. В ходе мониторинга технология позволяет наглядно фиксировать изменения свойств материалов дорожной одежды, а также устанавливать местоположение неоднородных по влажности зон.
5. Во многих случаях в крупных городских агломерациях разрушение дорожного покрытия проезжей части дорог, тротуаров, пар-

ковок и т.п. обусловлено влиянием водонесущих коммуникаций. Технология позволяет наглядно установить соответствие между зонами влияния инженерных коммуникаций и информацией на радарограммах.

6. При использовании предлагаемой технологии открываются новые возможности учета результатов георадарного обследования в процессе проектирования, в том числе для оценки полноты и объективности результатов инженерно-геологических изысканий при обследовании дорожных одежд эксплуатируемых автомобильных дорог.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Benedetto A. Civil engineering applications of ground penetrating radar / A. Benedetto, L. Pajewski. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 373 p.*
2. *Saarenketo T. Experiences of Integrated GPR and Laser Scanner Analysis – We should not only look down but also around // Proceedings of the 17<sup>th</sup> Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic (NGM 2016), Reykjavik, 25<sup>th</sup> – 28<sup>th</sup> of May. – 2016. – PP. 1273-1277.*
3. Кулижников А.М. Внедрение георадарных технологий в дорожной отрасли / А.М. Кулижников // Транспортная стратегия – XXI век. – 2015. – Вып. 30 – С. 44-45.
4. Кулижников А.М. Комплексное проектирование автомобильных дорог на основе пространственного моделирования (на примере Европейского Севера России): дисс. ... д-ра техн. наук ( 05.23.11 ) / Кулижников Александр Михайлович; Архангельский государственный технический университет. – Архангельск, 1998. – 340 с.
5. Еремин Р.А. Инновационные технологии для решения задач в сфере дорожного строительства и городского хозяйства / Р.А. Еремин, А.А. Хозяйчиков, А.А. Девичев, А.В. Почивалин: материалы Международного форума «Дорожное строительство в России: инновации, технологии, качество», 17-18 мая 2017 г., Калуга. – 21 с.
6. Кулижников А.М. Комплексирование контактных и воздушных антенных блоков при георадарном обследовании дорожных конструкций / А.М. Кулижников, Р.А. Еремин: материалы 10-й науч.-практ. конференции «Инженерная геофизика 2014», 21-25 апреля 2014 г., Геленджик. – 15 с.
7. Еремин Р.А. О перспективах измерения толщины монолитных слоев дорожной одежды неразрушающим способом / Р.А. Еремин // Дороги и мосты. – 2017. – Вып. 37/1. – С. 95-108.
8. Сухобок Ю.А. Программный комплекс для обработки результатов георадарного обследования / Ю.А. Сухобок, В.В. Пупатенко // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления:

*материалы III всероссийской науч.-практ. конф., Хабаровск, 30 июня – 4 июля 2015 г. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 177-180.*

9. Пупатенко В.В. Литологическое расчленение разреза по данным георадиолокации / В.В. Пупатенко, Ю.А. Сухобок // Мир транспорта. — 2013. — № 3. — С. 154-161.

## *LITERATURA*

1. Benedetto A. Civil engineering applications of ground penetrating radar / A. Benedetto, L. Pajewski. – Springer International Publishing Switzerland, 2015. – 373 p.
2. Saarenketo T. Experiences of Integrated GPR and Laser Scanner Analysis – We should not only look down but also around // Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic (NGM 2016), Reykjavik, 25th – 28th of May. – 2016. – PP. 1273-1277.
3. Kulizhnikov A.M. Vnedrenie georadarnykh tehnologij v dorozhnoj otрасли / A.M. Kulizhnikov // Transportnaja strategija – XXI vek. – 2015. – Vyp. 30 – S. 44-45.
4. Kulizhnikov A.M. Kompleksnoe proektirovaniye avtomobil'nyh dorog na osnove prostranstvennogo modelirovaniya (na primere Evropejskogo Severa Rossii): diss. ... d-ra tehn. nauk ( 05.23.11 ) / Kulizhnikov Aleksandr Mihajlovich; Arhangelskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet. – Arhangelsk, 1998. – 340 s.
5. Eremin R.A. Innovacionnye tehnologii dlja reshenija zadach v sfere dorozhnogo stroitel'stva i gorodskogo hozjajstva / R.A. Eremin, A.A. Hozjajchikov, A.A. Devichev, A.V. Pochivalin: materialy Mezhdunarodnogo foruma «Dorozhnoe stroitel'stvo v Rossii: innovacii, tehnologii, kachestvo» – 17-18 maja 2017 g., Kaluga. – 21 s.
6. Kulizhnikov A.M. Kompleksirovaniye kontaktnykh i vozдушnykh antennyh blokov pri georadarnom obsledovanii dorozhnykh konstrukcij / A.M. Kulizhnikov, R.A. Eremin: materialy 10-j nauch.-prakt. konferencii «Inzhenernaja geofizika 2014», 21-25 aprelja 2014 g., Gelen-dzhik. – 15 s.
7. Eremin R.A. O perspektivah izmerenija tolshhiny monolitnyh sloev dorozhnoj odezhdy nerazrushajushhim sposobom / R.A. Eremin // Dorogi i mosty. – 2017. – Vyp. 37/1. – S. 95-108.
8. Suhobok Ju.A. Programmnij kompleks dlja obrabotki rezul'tatov georadarnogo obsledovanija / Ju.A. Suhobok, V.V. Pupatenko // Informacionnye tehnologii i vysokoproizvoditel'nye vychislenija: materialy III vserossijskoj nauch.-prakt. konf., Habarovsk, 30 iyunja – 4 iulja 2015 g. – Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2015. – S. 177-180.

9. Pupatenko V.V. *Litologicheskoe raschlenenie razreza po dannym georadiolokacii* / V.V. Pupatenko, Ju.A. Suhobok // Mir transporta. — 2013. — № 3. — S. 154-161.
- 

## **GEOSPATIAL MODELING TECHNOLOGY OF GEORADAR DATA**

*Ph. D. (Tech.) R. A. Eremin*  
(FAI «ROSDORNII»),

*Ph. D. (Tech.), Associated Professor Yu. A. Sukhobok*  
(Far Eastern State Transport University),

*Post-Graduate Student N. Yu. Rassadkin*  
(Bauman Moscow State  
Technical University)

*Contact information:* + 7-967-448-78-75;  
+ 7-967-448-78-75;  
+7 (977) 864-82-91;  
*r.eremin.01@gmail.com;*  
*khvyus@gmail.com;*  
*battleg@yandex.ru*

*The results of road pavement diagnostic and survey using a new geospatial modeling technology of georadar data, which is a combination of georadar and geodesic survey methods, are done. The results of solving problems in estimating road pavement layer thickness, identifying subsided zones of pavement layers, as well as understanding the causes for road pavement deformation are presented. The difference between the offered technology and similar solutions proposed by foreign companies such as Roadscanners (Finland), IDS (Italy), MALA Geoscience (Sweden) and others is the high flexibility and orientation towards use in practice in the Russian road sector.*

**Key words:** roads, structures, pavement, thickness of layers, laser scanning, georadar, satellite systems, 3D models, computer-aided design systems, geoinformation systems.

---

Рецензент: д-р техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).  
Статья поступила в редакцию: 06.10.2017 г.