

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ПО
ПЛОЩАДНОМУ ОБСЛЕДОВАНИЮ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ
ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Инженер **Е.О. Зверев**,
канд. техн. наук **Р.А. Еремин**,
инженер **Н.Г. Пудова**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»)
zverev@rosdornii.ru
r.eremin@rosdornii.ru
pudova@rosdornii.ru

В статье рассматриваются аспекты применения георадиолокации в тесной связи с методами точной геодезической привязки при работах в условиях плотной городской застройки. Для интерпретации объемных массивов данных используется пакетная обработка с применением алгоритмов атрибутного анализа. Для визуализации и представления данных используются ГИС-технологии.

Ключевые слова: дорожная одежда, радарограмма, атрибутный анализ, методика, ослабленная зона, дефекты.

Современная городская агломерация представляет собой сложное переплетение зданий, сооружений, объектов транспортной инфраструктуры, инженерных коммуникаций, объектов жизнеобеспечения, а также других объектов различного назначения, которые органично вписываются в существующее геологическое пространство и образуют сферу взаимодействия сооружения с геологической средой [1]. Развитие современных методов обследования позволяет максимально всесторонне изучить свойства этой сферы, а широкий спектр порождающих проблемы факторов требует комплексного подхода к решению задач. Указанные факторы делятся на природные и техногенные в своих проявлениях. Вместе с тем, все они характеризуются перемещением твердых частиц и жидкостей в грунтовой среде, что приводит к деформациям и разрушениям инженерных сооружений и отдельных их конструкций. Различие условий работы и конструктивное многообразие сооружений несомненно требует индивидуального подхода к решению каждой конкретной задачи, но при выполнении инженерных обследований можно выделить и общие подходы.

Одним из способов детального обследования подповерхностной среды с целью изучения ее строения и состояния является использование метода георадиолокации, который хорошо себя зарекомендовал в различных сферах деятельности. В частности, при выполнении археологических изысканий георадар применяют для поиска исторических фундаментов и захоронений. Методика работ предусматривает создание плотной ортогональной сети геофизических наблюдений [2, 3] с целью локализации объектов определенного размера, а также прослеживания изменения их пространственного положения под землей. Вместе с тем подход к решению археологических задач не применим к обследованию объектов дорожного хозяйства. При обследовании дорожных одежд городской транспортной инфраструктуры, как правило, используется параллельное продольное георадиолокационное профилирование с контрольными поперечными георадарными профилями. В основном расстояние между параллельными продольными и поперечными профилями не удовлетворяет требованиям к разрешающей способности по горизонтали для обнаружения объектов относительного малого размера. В ряде случаев для повышения разрешающей способности применяемый в археологии подход по выполнению детальных обследований приобретает актуальность при изучении объектов дорожного хозяйства. Методология работ по обследованию объектов городской транспортной инфраструктуры, рассматриваемая в настоящей статье, преимущественно базируется на вышеуказанном подходе, однако имеет свои специфические особенности, обусловленные характером прикладных задач. При выполнении обследований решаются задачи по обнаружению ослабленных зон в грунтовом основании, определению их причин образования и оценке их влияния на состояние дорожных покрытий. Исследование направлено на разработку оптимальной с точки зрения производительности работ и достигаемого результата методики полевых и камеральных георадиолокационных исследований для определения причин образования дефектов дорожных покрытий на объектах дорожного хозяйства городской транспортной инфраструктуры.

Существует ряд проблем, возникающих под действием природных и техногенных факторов. При выполнении инженерных обследований необходимо выявить и обозначить причинно-следственные связи в механизме возникновения и развития ослабленных зон грунтового основания дорожных одежд.

В результате воздействия указанных факторов на объектах дорожного хозяйства с искусственными покрытиями образуются следующие *типы дефектов* [4, 5]:

- выбоины;
- просадки;
- проломы;
- переувлажнение и замачивание грунтов;
- вымывание и суффозия грунта;
- трещины покрытия (трещины растяжения и сжатия, отраженные трещины, сетки трещин).

В зависимости от имеющейся совокупности дефектов требуется определенный комплекс мероприятий по их локализации.

Сеть наблюдения планируется с расчетом, чтобы расстояние между профилями не превышало минимальных размеров объектов поиска. При картировании протяженных объектов профили наблюдения располагают в крест картируемой структуре. При отсутствии информации об ориентации объектов поиска планируют ортогональные сети наблюдений (рис. 1). Для уверенного выделения аномалии от объекта характерный сигнал должен быть зафиксирован не менее чем на 3-х профилях. Таким образом, при размерах объекта поиска менее 1 м в плане расстояние между профилями в одном направлении должно быть менее 1 м, желательно менее 0,5 м. Кроме того, выбор шага сканирования зависит от глубины расположения объекта и частоты антенного блока.

Применительно к георадиолокации, минимальный интервал между профилями выбирается исходя из соображений частичного перекрытия зон Френеля для отражающих объектов [6, 7].

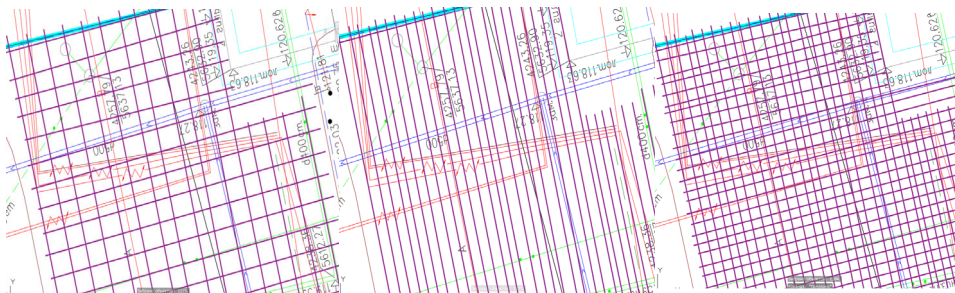


Рис. 1. Варианты организации сети наблюдений в зависимости от размера объектов поиска и ориентации инженерных коммуникаций: сетка 2х2 м – слева; однонаправленная сетка с шагом 1 м – в центре; ортогональная сетка 1х1 м – справа

Цель представленного в данной статье исследования заключалась в повышении эффективности методики обследования объектов дорожного хозяйства городской транспортной инфраструктуры для объективной оценки происходящих в дорожных конструкциях и основаниях процессов и определения причин развития различных дефектов.

При этом требовалось решить следующие задачи:

1. подготовить методологию полевых и камеральных георадарных работ;
2. обследовать объекты дорожного хозяйства городской транспортной инфраструктуры с развитой системой подземных инженерных коммуникаций и сооружений;
3. определить пространственное положение ослабленных зон и неоднородных включений в слоях основания дорожной одежды и нижележащих грунтах, приводящих к разрушениям дорожного покрытия.

В рамках выполнения поставленных задач необходимо было подобрать оптимальный комплекс методов полевого обследования, определить наиболее эффективные способы обработки и представления результатов обследования, а также подготовить карты распределения ослабленных зон обследуемой территории.

Методика работ

Комплексный подход к обследованию строится из нескольких групп методов, применение которых имеет последовательный, итерационный характер.

Общие подходы к методике инженерного обследования описаны в [6].

Рассмотрим ход проведения работ на конкретном объекте.

Для выбора оптимального набора методов была детально проанализирована исходная информация, именно:

- план территории с вынесенными инженерными коммуникациями;
- проектные конструкции дорожных одежд;
- информация об объектах поиска и диагностики, визуально открытых и предполагаемых скрытых дефектах покрытия и ослабленных зонах в основании дорожных одежд;
- требования к результатам обследования.

В ходе рекогносцировочного обследования установлено, что поверхность объекта покрыта мощными конструкциями дорожной

одежды, уложенными на грунты преимущественно песчаного состава. На поверхности выявлена система трещин различного происхождения, отмечены зоны просадок, люки инженерных коммуникаций. Условия являются благоприятными для применения метода георадиолокации.

Следует отметить, что в процессе рекогносцировочного обследования важно установить период наиболее интенсивных деформаций. Обследуемая территория имеет сложную форму, несколько независимых локаций.

Общую площадь работ разделили на систему участков простой геометрической формы, на каждом из которых разместили систему профилей. Для геодезической привязки профилей была использована система дифференциальной спутниковой привязки GNSS в тандеме с инструментальной привязкой к характерным элементам на местности. В то же время была произведена инструментальная привязка выявленных ослабленных зон и характерных элементов инфраструктуры объекта обследования для составления технологической схемы участка работ. Поскольку вблизи высоких сооружений спутниковая система работает неэффективно, необходимо применять тахеометрическую съемку или иные измерительные приборы. Точность привязки точек съемки в плане составила не менее 5 см. Все участки увязаны в одну систему координат.

Георадиолокационная съемка производилась двухчастотным антенным блоком 250/700 МГц, что обеспечило глубинность метода до 5 м, разрешающую способность в верхней части разреза – не менее 0,1 м, шаг по профилю – 0,04 м. Данная конфигурация позволяет картировать как ослабленные зоны в грунтах основания дорожных одежд и нижележащих грунтах, так и структуру слоев в конструкции дорожных одежд.

В процессе съемки проводился контроль полевого материала и первичный анализ данных георадиолокации.

Следует обратить внимание на то, что поверхностные условия в пределах площади съемки не должны существенно отличаться, при этом не допускается наличие луж, металлических листов, сеток, проводов.

Обработка и интерпретация результатов обследования

Задача обработки результатов обследования заключается в получении информативного наглядного материала с набором параметров, отвечающих техническому заданию.

Формат представления выходных данных может иметь вид графиков, разрезов, карт, 2D планов, 3D карт, шейп-слоев ГИС, интерактивных 3D моделей с подгрузкой атрибутов.

В настоящий момент наиболее качественной формой представления материалов является геоинформационная модель, в которую введены различные характеристики отдельных компонентов объекта, описанные группами параметров, атрибутов.

После ввода геометрических параметров и выполнения координатной привязки профилей к массиву данных георадиолокации была применена пакетная обработка по набору атрибутов [8, 9], которая выполняется ко всей сетке георадиолокационных профилей единовременно.

Результаты расчета атрибутов представляются в виде площадных срезов для различных глубин, выгруженных с шагом 0,3-0,5 м. Шаг выгрузки определяется анализом 2D профилей.

Результаты вычисления по различным атрибутам сопоставляем с планом коммуникаций с вынесенными дефектами покрытия по результатам визуального обследования.

В ходе сопоставления выбрано несколько атрибутов, которые позволили визуализировать скрытые ослабленные зоны: энергию, затухание сигнала, максимум в скользящем окне, текстурный анализ.

Выходные данные атрибутного анализа имеют вид трехмерного массива данных в используемой на объекте системе координат. Отметим, что такой массив данных готов для загрузки в любую ГИС-систему.

По результатам атрибутного анализа был составлен реестр выделенных ослабленных зон, подготовлена карта дефектных участков в основании дорожной одежды и подстилающих грунтах с указанием глубины расположения и типа, а также определены места под заверочное бурение.

Анализ эффективности предлагаемой методики

Предложенный подход по аналогии с детальной археологической съемкой обеспечил возможность непрерывного картирования дефектов покрытия и ослабленных в основании дорожных одежд.

При совместном анализе радарограмм, полученных при помощи антенн 250 и 700 МГц, удалось разделить дефекты покрытия на поверхностные, связанные с растрескиванием бетонного основания асфальтобетонного покрытия вследствие отсутствия нормативных деформационных швов, и на дефекты покрытия, связанные с динамикой грунтов основания, сезонными колебаниями температуры около теплонесущих коммуникаций и миграцией грунтовых вод.

На **рис. 2** представлены несколько типов трещин.

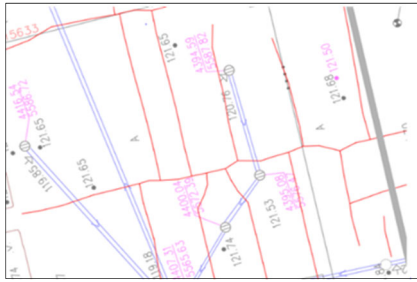


Рис. 2. Виды трещин на искусственном покрытии:
слева – трещины в асфальтобетонном покрытии, отраженные от трещин сжатия в жестком основании, не связанные с функционированием подземных коммуникаций;
справа – трещины в проекции инженерных коммуникаций, связанные с просадкой слоев дорожной одежды и подстилающих грунтов

На **рис. 3** и **4** представлены результаты атрибутного анализа с разделением поверхностных и глубинных аномалий.

Наиболее информативными атрибутами для выделения ослабленных зон под бетонным основанием выбрана энергия сигнала (срезы для глубины 0,5-1 м для 700 МГц). Участки потенциальных пустот проявляются в виде зон повышенной энергии сигнала [5, 10]. Кроме того, по этому атрибуту фиксировались участки разуплотнения грунта вокруг коммуникаций (срезы 1-2 м для АБ-250 МГц.) [8].

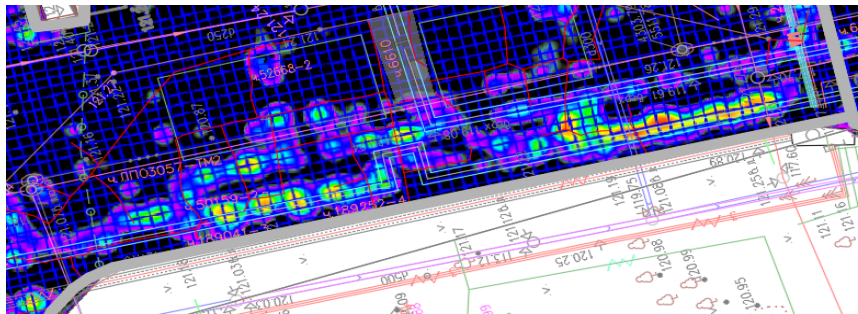


Рис. 3. Разуплотнение грунта над теплотрассой
(антенна 700 МГц; атрибут – «энергия сигнала»;
срез на глубине 0,5-0,7 м)

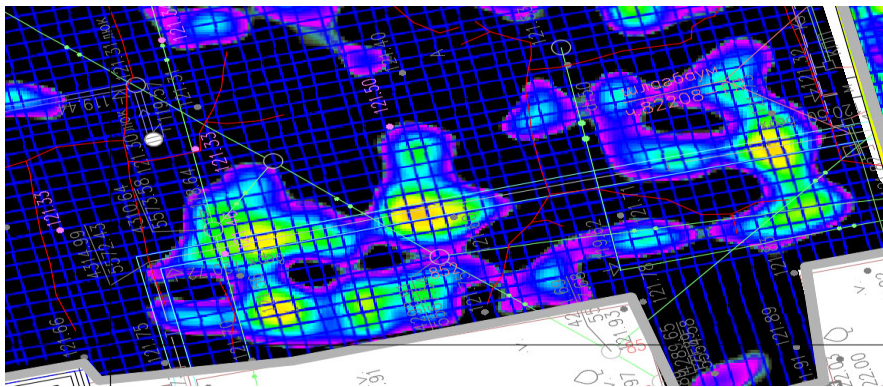


Рис. 4. Участки переувлажнения грунта вокруг коммуникаций (антенна 250 МГц; атрибут – «энергия сигнала»; срез на глубине 1,7-2,2 м)

Для участков повышенной влажности оценивался атрибут «поле затухания» и поиск «максимумов в скользящем окне».

Для уверенного прослеживания коммуникаций применялось преобразование Гильберта и взаимная корреляция.

Выделенные ослабленные зоны заверялись разрушающими методами – бурением с отбором проб и лабораторным определением плотности и влажности образцов.

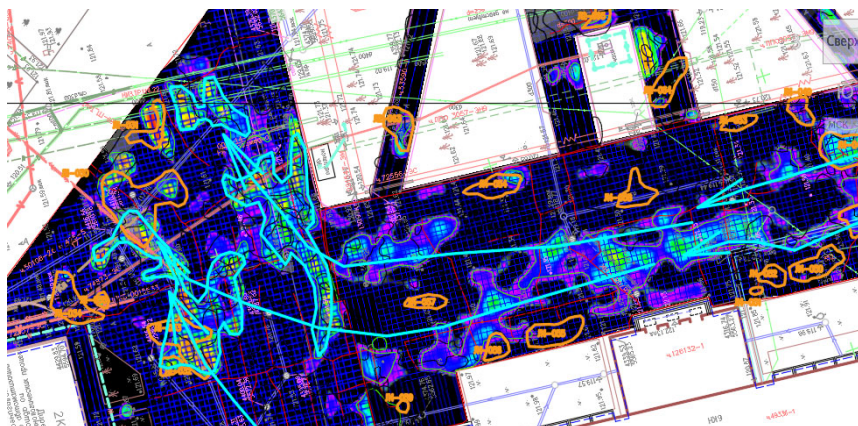


Рис. 5. Оценка направления миграции грунтовых вод по форме выявленных аномалий по атрибутам «амплитуда» и «энергия сигнала»

На **рис. 5** представлены результаты оценки направления миграции грунтовых вод на обследуемой территории.

В качестве критериев оценки путей миграции грунтовых вод были приняты следующие:

- ориентация трещин на поверхности покрытий;
- расположение участков просадок искусственных покрытий;
- расположение и форма аномалий на карте атрибутов георадиолокационных данных;
- топографические и гидрологические особенности участка работ, уточненные путем анализа.

Данный поток грунтовых вод носит временный, сезонный характер и связан с периодом активного таяния снега и обильных осадков. Из-за прогрессирующего раскрытия сквозных трещин покрытия происходит ухудшение ситуации.

Корректная модель процесса является результатом плотной интеграции атрибутивного анализа георадиолокационной съемки, точной геодезической съемки и результатов визуального обследования.

Применение одного метода не обеспечивает объективного решения возникающих задач. Устойчивое решение достигается комплексированием методов с учетом специфики объектов поиска. Для данного объекта обследование можно дополнить применением бесконтактных электроразведочных методов с целью картирования участков повышенной влажности грунтов основания, а также акустических методов – для подтверждения полостей под покрытием.

Кроме того, в рамках пространственной привязки наземных объектов следует отметить высокую эффективность системы лазерного сканирования и аэрофотосъемки, в том числе тепловой, что позволяет получить существенно большую информацию об объекте обследования.

ВЫВОДЫ

1. Исследования на площадных объектах целесообразно выполнять комплексом методов (включающего георадиолокационную съемку на двух частотах, видеофиксацию, спутниковую GNSS и тахеометрическую привязки), что обеспечивает получение наилучших результатов.

2. Сетка профилей с шагом 1x1 м позволяет выполнить фиксацию объектов поиска двумя профилями.
3. Применение исключительно спутниковой привязки не позволяет получить необходимую точность из-за влияния близкорасположенных строений. В силу этого, в дополнение к спутниковой привязке, использованы приемы классической геодезии.
4. Совместный анализ сигнала с двух антенных блоков позволил определить природу дефектов покрытия и глубоко расположенных ослабленных зон в грунтах основания. Как показали результаты обследований, выделение субвертикальных нарушений в конструкции искусственных покрытий доступно при использовании антенн 700 МГц и более, а выделение участков разуплотнения на глубине возможно только с применением более низкочастотных антенн.
5. Единовременный атрибутный анализ для массива данных по площадным измерениям существенно обеспечивает ускорение темпов работы и повышение эффективности выделения аномалий.
6. Использование высокоточной геодезической съемки позволило совместить временные срезы атрибутов георадиолокационных данных с картами расположения дефектов покрытия, тем самым определить их пространственное положение и природу дефектов.

Направления дальнейших исследований

Специалистами ФАУ «РОСДОРНИИ» осуществляется работа по созданию алгоритмов автоматизированной обработки большого объема информации, получаемой в процессе обследований.

Системный подход к обработке получаемой информации позволяет получить устойчивое решение поставленных задач в кратчайшие сроки.

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 47.13330.2016. *Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.* – М.: Стандартинформ, 2017. – 160 с.
2. *Urusova A.V. Restoration of the Historico-architectural Plan of the Voskresensky New-Jerusalem Monastery by Geophysical Methods / A.V. Urusova, A.A. Ivanov, V.V. Monakhov, N.G. Pudova, M.P.*

- Shirobokov // Conference Proceedings. – Near Surface 2010 - 16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – 6 Sep. 2010 - 08 Sep. 2010, cp-164-00062.*
3. *Ristić A. Using Ground Penetrating Radar to Reveal Hidden Archaeology: The Case Study of the Württemberg-Stambol Gate in Belgrade (Serbia). A. Ristić, M. Govedarica, L. Pajewski, M. Vrtunski and Ž. Bugarinović // Sensors. – 2020. – 19 с.*
 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. *Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных / А.В. Старовойтов // учебное пособие. – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.*
 6. *Бондарик Г.К. Инженерно-геологические изыскания / Г.К. Бондарик, Л.А. Ярг. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.*
 7. *Владов М.Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: учебное пособие / М.Л. Владов, М.С. Судакова – М.: ГЕОС, 2017. – 240 с.*
 8. *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.*
 9. *Капустин В.В. Применение атрибутивного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования / В.В. Капустин, А.В. Синицын // Геофизика, 2018. – № 2. – 17-23 с.*
 10. *Старовойтов А.В. Выделение пустот методом георадиолокации / А.В. Старовойтов, А.М. Пятилова, Н.В. Шалаева, А.Ю. Калашиников // Инженерные изыскания. – 2013. – № 13. – С. 26-33.*

L I T E R A T U R A

1. *SP 47.13330.2016. Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva. Osnovnyye polozheniya. – М.: Standartinform, 2017. – 160 с.*
2. *Urusova A.V. Restoration of the Historico-architectural Plan of the Voskresensky New-Jerusalem Monastery by Geophysical Methods / A.V. Urusova, A.A. Ivanov, V.V. Monakhov, N.G. Pudova,*

- M.P. Shirobokov // Conference Proceedings. – Near Surface 2010 – 16th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – 6 Sep. 2010 - 08 Sep. 2010, cp-164-00062.*
3. *Ristić A. Using Ground Penetrating Radar to Reveal Hidden Archaeology: The Case Study of the Württemberg-Stambol Gate in Belgrade (Serbia). A. Ristić, M. Govedarica, L. Pajewski, M. Vrtunski and Ž. Bugarinović // Sensors. – 2020. – 19 s.*
 4. *Kulizhnikov A.M. Obnaruzhenie defektov v gruntah zemlyanogo polotna i podstilayushchego osnovaniya s pomoshch'yu georadarnyh tekhnologij / A.M. Kulizhnikov, A.A. Belozarov, S.N. Burda // Aktual'nye problemy sovremennogo dorozhnogo stroitel'stva i hoz'yajstva: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. – Vologda: VoGGU, 2002. – S. 73–77.*
 5. *Starovojtov A.V. Interpretaciya georadiolokacionnyh dannyh / A.V. Starovojtov // uchebnoe posobie. – M.: Izdatel'stvo MGU, 2008. – 192 s.*
 6. *Bondarik G.K. Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya / G.K. Bondarik, L.A. Yarg. – M.: KDU, 2008. – 424 s.*
 7. *Vladov M.L. Georadiolokaciya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnyh napravlenij: uchebnoe posobie / M.L. Vladov, M.S. Sudakova – M.: GEOS, 2017. – 240 s.*
 8. *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.*
 9. *Kapustin V.V. Primenenie atributnogo analiza dlya resheniya prikladnyh zadach georadarnogo profilirovaniya / V.V. Kapustin, A.V. Sinicyn // Geofizika, 2018. – № 2. – 17-23 s.*
 10. *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.*

.....
**SYSTEMATIC APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF AREA
SURVEY OF ROAD STRUCTURES FOUNDATION SOILS**

*Engineer E.O. Zverev
Ph. D. (Tech) R.A. Eremin,
Engineer N.G. Pudova,
(FAI «ROSDORNII»)
Contact information:
zverev@rosdornii.ru
r.eremin@rosdornii.ru
pudova@rosdornii.ru*

The article considers the aspects of GPR application in close connection with the precise geodetic referencing methods when working in the conditions of dense urban area. Batch processing with the use of algorithms of attribute analysis is used for the interpretation of volumetric data sets. For visualization and presentation of data the GIS technology is used.

Key words: *road pavement, radarogram, attribute analysis, method, weakened zone, defects.*

Рецензент: д-р техн. наук В.Н. Ефименко (Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ)).
Статья поступила в редакцию: 25.07.2022 г.