

УДК 625.8:550.8.053

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

Канд. техн. наук **Р.А. Еремин**,
инженер **Н.Г. Пудова**
(ФАУ «РОСДОРНИИ»),
Д.Б. Романов
(НПО «Терразонд»)

Конт. информация: r.eremin@rosdornii.ru;
pudova@rosdornii.ru;
info@terrazond.ru

Сообщается о возможностях использования пространственного анализа средствами ГИС-приложений для оценки результатов георадарного обследования. Отдельные георадарные профили содержат полезную информацию о внутреннем строении и состоянии дорожных конструкций в определенных сечениях дороги. Вместе с тем для эффективного поиска ослабленных зон дорожных конструкций и объяснения их причин необходимо также оценить рельеф, ситуацию и гидрогеологические особенности местности. Пространственный анализ позволяет объединять в одном программном окне различные модели существующей действительности, так, например, установить связь мест проседания слоев покрытия, образования пустот или разуплотнений в слоях основания дорожной одежды с местоположением подземных сооружений (коммуникации, подземные переходы и др.). Дано описание методики пространственного анализа и результатов ее применения на примере георадарного обследования дорог Московского региона.

Ключевые слова: георадар, лазерное сканирование, автомобильная дорога, атрибутивный анализ, ослабленная зона, дорожная одежда.

Согласно науке о данных (Data science), пространственный анализ – это произведение вычислительных операций над геоданными с целью извлечения из них дополнительной информации [1]. Используемые инструменты анализа зависят от области применения. Так, для специалистов, занятым в сфере водопользования и гидрологии, может представлять интерес анализ рельефа для моделирования стока поверхностных вод или геологического строения территории с целью моделирования подземных стоков. Экологами используются аналитические функции, помогающие выявить взаимоотношения между территориями дикой природы и освоенными областями. Каждым пользователем самостоятельно

определяются необходимые инструменты в зависимости от конкретных задач, требующих решения. Кроме того, безусловно имеются возможности пространственного анализа данных в георадиолокации, в том числе при обследовании автомобильных дорог.

Актуальность проблемы заключается в том, что анализ георадарных данных зачастую осуществляется в изолированной программной среде без доступа к внешним источникам данных: модель рельефа, модель ситуации, геологическая и гидрологическая модели. Анализ отдельных вертикальных и горизонтальных георадиолокационных разрезов без учета вышеуказанных особенностей территории приводит к недоучету важных факторов при интерпретации данных. Возможность встраивания подповерхностной геофизической модели в программную среду, где уже содержатся данные о рельефе, ситуации, геологии и гидрологии, способствует повышению эффективности результатов георадарных обследований.

В настоящее время запись георадарных данных осуществляется с использованием многоканального и мультиспектрального оборудования, а привязка данных выполняется спутниковыми системами. Это позволяет формировать по результатам георадарного обследования массивы пространственных данных, анализировать которые можно в трех измерениях. При обследовании автомобильных дорог путем пространственного анализа георадарных данных можно решать следующие задачи:

- обнаруживать конструктивные изменения дорожных одежд в плане, продольных и поперечных сечениях на больших по площади территориях и линейных объектах большой протяженности;
- оценивать пространственную изменчивость однородности свойств материалов дорожных одежд и грунтов земляного полотна, локализовать зоны влияния опасных процессов и явлений;
- достоверно определять ослабленные зоны дорожных одежд и грунтов земляного полотна автомобильных дорог в комплексе с геодезической съемкой, другими неразрушающими и разрушающими методами;
- получение цифровых моделей подповерхностной среды автомобильных дорог с атрибутивным наполнением.

Ниже сообщается о проведении исследования, касающегося практического применения пространственного анализа георадарных данных для определения ослабленных зон под дорожным покрытием городских дорог, приводящих к его деформациям.

Цель данного исследования заключалась в повышении эффективности локализации ослабленных зон дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог посредством пространственного анализа результатов георадарных обследований.

К задачам исследовательской работы было отнесено следующее:

1. описать методику преобразования исходных георадарных профилей в массив пространственных данных;
2. выполнить пространственный анализ георадарных данных, в том числе совместно с другими видами пространственной информации;
3. продемонстрировать возможность обнаружения ослабленных зон в основании автомобильной дороги по результатам пространственного анализа;
4. оценить возможность прогнозирования деформаций дорожного покрытия по результатам пространственного анализа.

Методика выполнения исследования и анализ полученных результатов

Исследования выполнены на примере георадарных данных, полученных путем площадной пешей съемки георадаром серии «ОКО-3» (г. Раменское, Московская обл.), а также съемки с помощью автомобиля многоканальным георадаром серии ГРТ (г. Москва). В обоих случаях георадарные обследования выполнены на дорогах Московского региона.

В первом случае обследование выполнено вблизи от зоны неоднократного провала дорожного покрытия. На участке трехполосной городской улицы выполнена съемка системой мобильного лазерного сканирования. Местоположение дефекта дорожного покрытия в облаке точек показано на **рис. 1**.

Пешее георадиолокационное сканирование проезжей части выполнено георадаром серии «ОКО-3» с центральной частотой 700 МГц путем съемки сериями из 4-х продольных и 4-х поперечных георадарных

профилей. Расстояние между продольными профилями составило в среднем 1,7 м, между поперечными – в среднем 1,0 м. При выполнении георадарного обследования предполагалось выявить признаки воздушной полости в месте провала дорожного покрытия [2], в связи с чем ко всем георадарным профилям была применена процедура атрибутивного анализа по расчету максимальной амплитуды отражения электромагнитного сигнала.



Рис. 1. Место провала дорожного покрытия в облаке точек лазерного сканирования (выделено красным маркером)

Примеры преобразованных георадарных профилей представлены на рис. 2 а, б. На данном рисунке показаны обнаруженные несколько мест с признаками ослабленной зоны (воздушная полость). Вместе с тем отчетливые признаки не дают наглядной информации о том, какую форму имеют ослабленные зоны в плане автомобильной дороги, какое пространственное распространение они имеют. Для того, чтобы ответить на эти вопросы, была выполнена часто применяемая в данном случае интерполяция данных в пространстве между георадарными профилями. Результатами этой процедуры является построение амплитудных карт или C-Scan в международной терминологии. Амплитудные карты построены по всему временному разрезу с шагом горизонтальных срезов 3 нс. Для

сравнения приведены 4 среза в диапазоне от 6 до 18 нс (**рис. 3**). Значимым отличием от традиционных амплитудных карт являлось их представление не в форме амплитуд и частот исходного сигнала, а в форме результата атрибутного анализа (Максимальная амплитуда в скользящем окне). Как видно из **рис. 3**, обнаруженные ослабленные зоны (воздушные полости) меняют свою форму и размеры на различной глубине, имея наибольшее распространение и интенсивность отражения сигнала на глубине, соответствующей 9-12 нс (**рис. 3 б**). При этом такие зоны только начинают наблюдаться в диапазоне 6-9 нс (**рис. 3 а**), уменьшаются или исчезают в диапазоне 12-18 нс (**рис. 3 в и 3 г**).

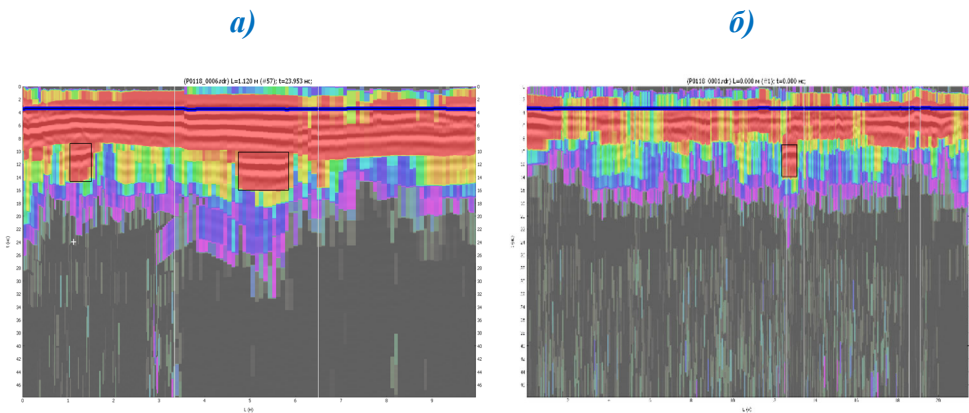


Рис. 2. Расчет атрибута «Максимальная амплитуда»

(красный цвет соответствует наиболее высоким значениям амплитуд):

а) поперечный профиль; вертикальные белые линии – границы полос движения; черный прямоугольный маркер – признак ослабленной зоны (воздушная полость);

б) продольный профиль; вертикальные белые линии – место провала дорожного покрытия и люк смотрового колодца соответственно; черный прямоугольный маркер – признак ослабленной зоны (воздушная полость)

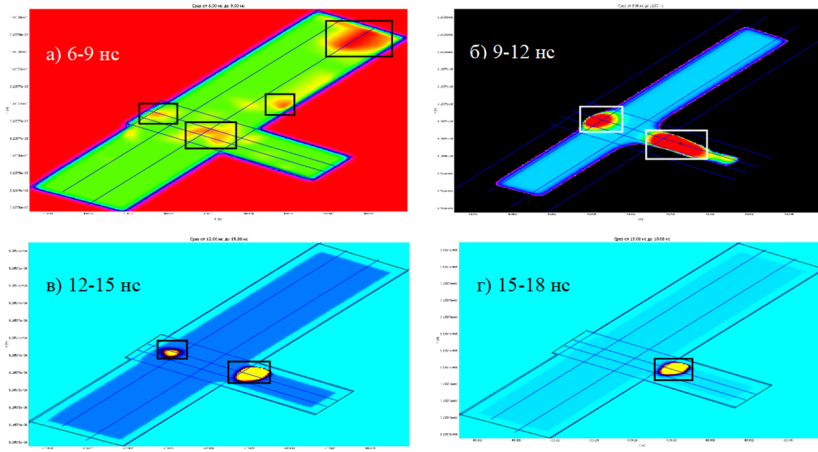


Рис. 3. Результат построения амплитудной карты по атрибуту «Максимальная амплитуда в скользящем окне» (прямоугольниками выделены места с наиболее высокими значениями амплитуд)

Продемонстрированный на **рис. 3** результат был преобразован в геопривязанное растровое изображение формата GeoTIFF и совмещен с облаком точек лазерного сканирования (**рис. 4**). На **рис. 4** видно, что одна из ослабленных зон (воздушная полость) находится в непосредственной близости с провалом дорожного покрытия, в то время как вторая ослабленная зона никак не проявляется на дневной поверхности.

При детальном рассмотрении поперечного георадарного профиля (**рис. 5**) в месте выявленных ослабленных зон можно сделать вывод, что волновой картине присущи характерные признаки воздушной полости: увеличение интенсивности отраженного сигнала и смена фазы сигнала. На поперечном георадарном профиле обнаружено отражение от инженерной коммуникации. Проседание отражающей границы справа над коммуникацией указывает на ее непосредственное отношение к развитию воздушной полости под средней полосой движения участка дороги.

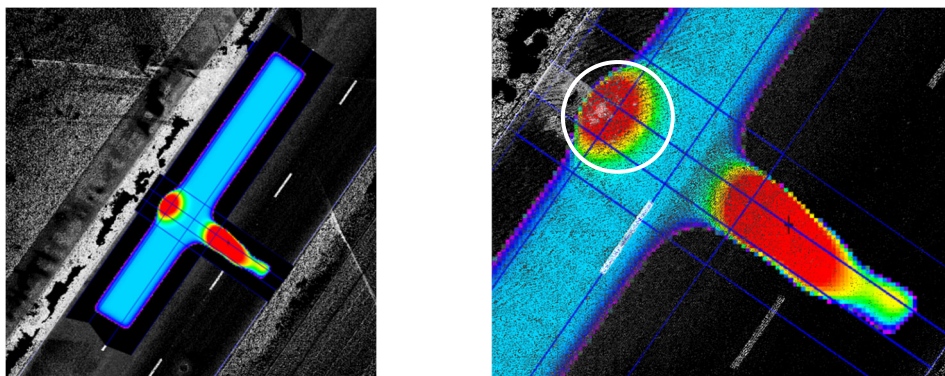


Рис. 4. Совмещение амплитудной карты с облаком точек лазерного сканирования

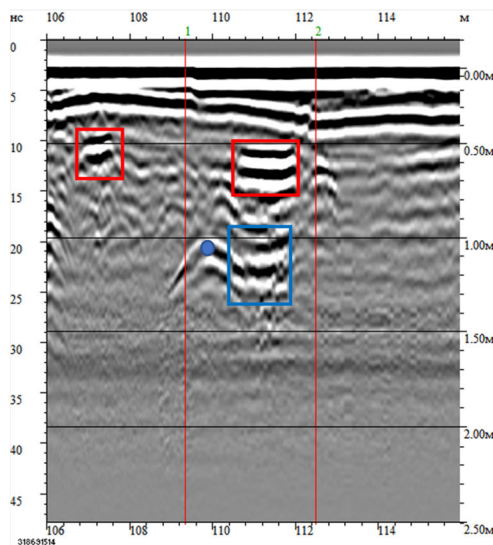


Рис. 5. Поперечный георадарный профиль в месте выявленных ослабленных зон:

красным прямоугольками выделены ослабленные зоны; синим — просадка, связанная с инженерной коммуникацией (отмечена точкой)

Кроме того, пространственный анализ позволил количественно оценить атрибуты сигнала в ослабленных зонах (воздушные полости). Амплитудные карты в виде векторного слоя с атрибутами были загружены в ГИС-приложение, после чего выполнена классификация атрибута «Максимальная амплитуда в скользящем окне» на 7 диапазонов значений (рис. 6). Из рис. 6 видно, что характерные максимальные значения амплитуд в диапазоне времен 9-12 нс не превышают 240 ед., в то время как в местах образования ослабленных зон они превышают 340 ед.

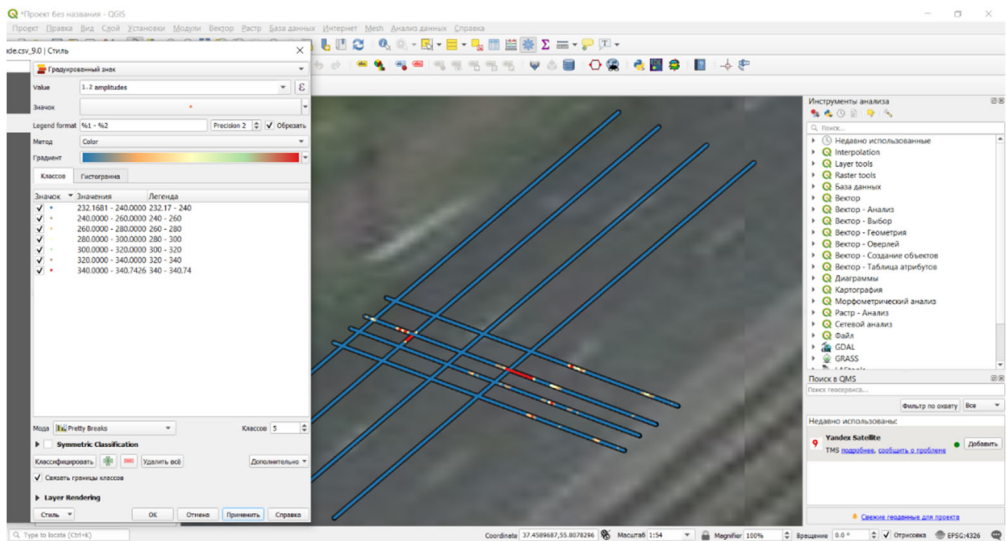


Рис. 6. Количественная оценка атрибутов сигнала в ослабленных зонах

По результатам обследования была спрогнозирована высокая вероятность провала дорожного покрытия по средней полосе движения в месте образования ослабленной зоны, связанной с влиянием инженерной коммуникации.

Другой участок дороги представлял собой 5-полосную магистральную улицу, по которой осуществляется выезд из г. Москвы на скоростное шоссе. Ввиду высокой интенсивности движения все георадарные работы на проезжей части выполнялись с помощью автомобиля. Работы были выполнены многоканальным георадаром серий ГРТ-1 и ГРТ-3 с

антенными блоками, работающими соответственно в диапазоне частот 200-1200 МГц и 500-2500 МГц. Проезды были осуществлены по каждой полосе движения; полезная ширина съемки каждого проезда составила чуть более 1 м для ГРТ-1 и чуть более 1,5 м для ГРТ-3. Георадар серии «ОКО-3» применялся для проверки достоверности результатов георадаров серии ГРТ [3], так как опыт применения последних сравнительно небольшой. В рамках исследования необходимо было установить места потенциального провала дорожного покрытия, поскольку на одном из участков обследованной дороги ранее произошли указанные деформации. На основании предварительных исследований места подтвержденного нарушения дорожного покрытия признаками потенциального провала являлось: проседание подошвы асфальтобетонного покрытия на георадарном профиле и область повышенной амплитуды отраженного сигнала под указанными просадками в слоях основания дорожной конструкции (рис. 7). Указанные признаки не раз удалось наблюдать и другим исследователям [4-6], в связи с чем выводы о причинах образования дефектов дорожного покрытия, полученные в рамках пространственного анализа, можно оценить как объективные с учетом накопленного опыта.

Пространственный анализ был выполнен в ГИС-приложении. На картографическую подложку были загружены векторные ГИС-слои с результатами георадарного обследования (рис. 8): карты изменения толщины асфальтобетона (по данным ГРТ-3) и амплитуды отраженного сигнала (по данным ГРТ-1) на искомой глубине (10-15 нс по временной шкале). В ГИС-приложении была выполнена фильтрация пространственных данных для каждого из слоев с определенными критериями: относительная толщина асфальтобетона – более 30 см в радиусе 5 м для данных ГРТ-3, а также положительные амплитуды более 7 условных единиц (близкие к максимальным для всего объекта на заданной глубине) для данных ГРТ-1. По пространственному отношению оставшихся после фильтрации на карте данных были выявлены места совпадения обоих критериев. Указанные места были проанализированы на георадарных профилях, после чего были спрогнозированы участки потенциального провала дорожного покрытия. Установлена высокая вероятность деформаций слоев дорожной одежды в местах пересечения автомобильной дороги с подземным пешеходным переходом и инженерной коммуникацией [3].

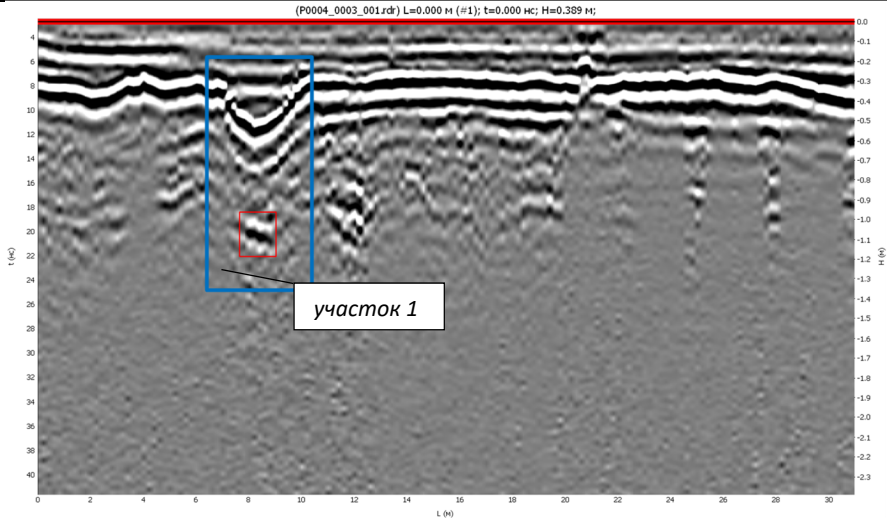


Рис. 7. Георадарный профиль 700 МГц (георадар серии «ОКО-3») с предпосылками к провалу дорожного покрытия:
 (прямоугольник синего цвета – область просадки подошвы асфальтобетона; прямоугольник красного цвета – зона высоких амплитуд сигнала под просадкой)

а)



б)



Рис. 8. ГИС-слои с результатами георадарного обследования:
 а) карта изменения толщины асфальтобетона (ГРТ-3);
 б) карта изменения амплитуды сигнала в диапазоне 10-15 нс (ГРТ-1)

ВЫВОДЫ

1. Современные способы и инструменты обследования автомобильных дорог характеризуются необходимостью сбора и обработки больших объемов пространственных данных. Пространственный анализ этих данных становится востребованным и эффективным инструментом инженеров во всем мире. Уровень развития программных средств позволяет преобразовывать традиционные результаты георадарного обследования в большие массивы пространственных данных. Примеры таких трансформаций продемонстрированы в представленном исследовании.
2. В рамках исследования пространственные данные по результатам георадарных обследований были совмещены и сопоставлены как с картографическими подложками, так и с облаком точек лазерного сканирования. Кроме того, продемонстрированы примеры сопоставительного пространственного анализа таких данных друг с другом. Используя общепринятые в георадиолокации критерии обнаружения аномальных типов записи на радарограммах и возможности пространственного анализа были выявлены ослабленные зоны в основании дорожных одежд автомобильных дорог и спрогнозированы места потенциальных деформаций дорожного покрытия.
3. Пространственное отношение областей высоких амплитуд сигнала по данным георадарных обследований и визуальные признаки дефектов дорожного покрытия в облаке точек лазерного сканирования наглядным образом демонстрируют возможности обнаружения ослабленных зон в основании дорожных одежд по результатам георадарных работ.
4. Пространственное отношение ГИС-слоев с данными о геометрии слоев дорожных одежд и амплитудах отражения сигнала в них также позволяет прогнозировать места потенциальных деформаций дорожного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Келлехер Дж. Тирни Б. Наука о данных: Базовый курс / Дж. Келлехер, Б.Тирни.; пер. с англ. – М. : Альпина Паблшер, 2020. – 220 с.
2. 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.
3. Обследование автомобильных дорог с ПО GeoReader» / Компания ООО «ТИМ» : сайт. URL: <https://geotim.ru/portfolio/obsledovanie-avtomobil-nyh-dorog/> (дата обращения: 03.04.2023).
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: ВоГТУ, 2002. – С. 73—77.
5. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие / А.В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.
6. 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.

L I T E R A T U R A

1. Kellekher Dzh. Tirni B. Nauka o dannyh: Bazovyy kurs / Dzh. Kellekher, B.Tirni.; per. s angl. – M. : Al'pina Pablisher, 2020. – 220 s.
2. 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.
3. Obsledovanie avtomobil'nyh dorog s PO GeoReader» / Kompaniya ООО «ТИМ» : sajт. URL: <https://geotim.ru/portfolio/obsledovanie-avtomobilnyh-dorog/> (data obrashcheniya: 03.04.2023).
4. Kulizhnikov A.M. Obnaruzhenie defektov v gruntah zemlyanogo polotna i podstilayushchego osnovaniya s pomoshch'yu georadarnyh tekhnologij / A.M. Kulizhnikov, A.A. Belozеров, S.N. Burda // Aktual'nye problemy sovremennogo dorozhnogo stroitel'stva i

hozyajstva: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. – Vologda: VoGGU, 2002. – S. 73–77.

5. Starovojtov A.V. Interpretaciya georadiolokacionnyh dannyh: uchebnoe posobie / A.V. Starovojtov. – M.: Izdatel'stvo MGU, 2008. – 192 s.
6. Vladov M.L. Georadiolokaciya. Ot fizicheskikh osnov do perspektivnyh napravlenij: uchebnoe posobie / M.L. Vladov, M.S. Sudakova. – M.: Izd-vo «GEOS», 2017. – 240 s.

.....
SPATIAL ANALYSIS OF GPR DATA

Ph. D. (Tech.) **R.A. Eremin**,
Engineer **N.G. Pudova**
(FAI «ROSDORNII»),
D.B. Romanov,
(SPA «Terrazond»)

Contact information: r.eremin@rosdornii.ru;
pudova@rosdornii.ru;
info@terrazond.ru

The article concerns the possibilities of using spatial analysis through a GIS application to evaluate the results of a GPR survey. Separate GPR profiles contain useful information about the internal structure and condition of pavement structures in certain road sections. At the same time, in order to effectively search for weakened zones of pavement structures and explain their causes, it is also necessary to analyze the relief, situation, and hydrogeological features of the area. Spatial analysis allows to combine different models of the existing reality in one program window, for example, to identify the connection between the zones of pavement layers subsidence, the formation of voids or decompression in the layers of the base of the pavement with the location of underground structures (utility, underpasses, etc.). The description of the methodology of spatial analysis and the results and the results of its application on the example of a GPR survey of roads in Moscow region are done.

Key words: ground penetrating radar (GPR), laser scanning, road, attribute analysis, weakened zone, road pavement.

Рецензент: д-р техн. наук В.Н. Бойков (МАДГТУ (МАДИ)).

Статья поступила в редакцию: 03.04.2023 г.