



Георадиолокационный метод обследования при решении различных задач в области строительства

Timur Nikolaevich DYMBRENOV, кандидат технических наук, генеральный директор, e-mail: dtn@sste.ru

Pavel Aleksandrovich ZNAICHENKO, ведущий инженер, e-mail: zpa@sste.ru

ООО «СпецСтройЭксперт», 111524 Москва, ул. Электродная, 2, стр.12-13-14, пом. 1, ком. 1

Аннотация. В статье показана значимость георадиолокационных исследований при компетентном подходе к их применению. Рассматриваются вопросы обработки и интерпретации данных, идентификации различных подповерхностных объектов, возможности автоматизированной обработки при работе на протяженных или крупногабаритных сооружениях. Кроме того, проведен обзор ситуации с нормативным обоснованием использования данного метода. Особо отмечено, что детальность обработки и интерпретации меняется в зависимости от качества полевого материала, решаемых задач и наличия фактических опорных точек и информации. Большой опыт обработки материалов георадиолокационных исследований показывает, что унифицированные подходы к интерпретации допустимы только после изучения особенностей каждого конкретного объекта исследований и разработки модели среды с учетом этих особенностей.

Ключевые слова: георадиолокационные исследования, интерпретационные признаки, автоматизированная обработка, нормативное обоснование.

GEORADIOLOCATION SURVEY METHOD FOR SOLVING VARIOUS CONSTRUCTION TASKS

Timur N. DYMBRENOV, e-mail: dtn@sste.ru

Pavel A. ZNAICHENKO, e-mail: zpa@sste.ru

SpetsStroyExpert LLC, Electrodnaya ul., 2, str. 12-13-14, pom. 1, of. 1, Moscow 111524, Russian Federation

Abstract. The article reveals the significance of georadiolocation survey (GPR survey), along with the competent approach to its application, the following issues have been considered: those ones related to processing and interpretation of data, identification of various subsurface objects, option of automated processing when working on large-dimensioned or extensive sites, as well as the outlook of the situation related to the legal basis in terms of application of this method has been presented. It has been specially noted that the detailed degree of processing and interpretation varies depending on the quality of the field materials, tasks to be solved and availability of the actual reference points and information. Considerable experience in the field of processing of the materials obtained from georadiolocation survey proves that the unified approaches to interpretation could be allowed only after studying the characteristics of each specific object of survey and developing the environment model, taking into consideration those features.

Key words: georadiolocation (GPR) survey, interpretative features, automated processing, legal basis.

Георадиолокация (в зарубежных источниках – GPR) занимает достойное место среди геофизических методов исследований как грунтовых массивов, так и строительных конструкций. Простота и оперативность полевых работ, быстрота визуализации результатов измерений позволяют специалистам эффективно использовать данный метод для решения многих задач, в том числе в области строительства и ремонта.

При этом не следует забывать, что очень редко результаты измерений могут сразу дать ответы

на поставленные вопросы на стадии полевых работ. Задачи в основном решаются в процессе достаточно сложной обработки и интерпретации полученных данных.

Одна из стандартных задач, успешно реализуемая методом георадиолокации в городских условиях, – поиск инеродных включений в грунтовом массиве или строительной конструкции. Трубы, кабели, коллекторы в грунте, арматура, закладные элементы в конструкциях резко отличаются величиной диэлектрической проницаемости и, следовательно, хо-

рошо выделяются на записях. В условиях идеальной модели среды на опытном полигоне это действительно так. В реальности результат может быть не вполне однозначным, что обусловлено рядом причин, а именно:

- влажностью среды, от которой напрямую зависит диэлектрическая проницаемость;
- составом грунтового массива (глины и суглинки характеризуются сильным поглощением электромагнитных волн и, следовательно, являются экраном, препятствующим их распространению в среде);

- высокой неоднородностью насыпной толщи грунтов (что особенно характерно для мегаполиса с большой и богатой историей);
- насыщенностью геологической среды строительным мусором, коммуникациями, остатками снесенных зданий и сооружений, а также прочими техногенными включениями;
- состоянием бетона защитного слоя железобетонных конструкций (карбонизация, трещиноватость, проникание хлоридов и пр.);
- погодными условиями (работа в дождливую погоду, в период весеннего таяния снега);
- внешними помехами (воздушные отражения от окружающих объектов, препятствия по трассе профиля).

Рассмотрим стандартную последовательность действий при проведении полевых работ и работ по дальнейшей обработке и интерпретации полученных данных в реальных городских условиях.

Стадия получения полевого материала

На этой стадии всегда следует добиваться качественной «картишки» посредством различных приемов и методов. Повысить информативность получаемых результатов можно путем детального проведения работ: очень низкой скорости прохода при минимальном шаге сканирования, большом количестве накоплений, выборе развертки по вертикали для максимального растягивания полезной области сигнала.

При выполнении полевых работ также необходимо составлять детальное представление о местности, на которой проводятся работы. Желательно построение абриса с нанесением всех объектов на дневной поверхности, фотографирование площа-

ки работ. При исследованиях внутри зданий и сооружений важна привязка ко всем строительным конструкциям, в тоннелях — пикетажная привязка. Это существенно помогает в дальнейшей обработке и интерпретации материалов.

В случае, когда на аппаратуре можно разделить излучающую и приемную части антенны и важно получить кинематические характеристики сигнала, изучение среды можно осуществлять методом пошагового профилирования с построением годографа электромагнитной волны.

Также проводят повторение исследований по нескольким параллельным профилям со смещением трассы (при площадной съемке георадаром). Результаты поиска «стены в грунте» высотой более 14 м с заглублением верхней части в грунт приведены на рис. 1. Профили А и Б проходят параллельно друг другу на расстоянии 1,5–2 м, однако контуры сооружения четко выделяются только на профиле Б. Всего на площадке было пройдено более 20 профилей и только на трех удалось выделить стену, несмотря на одинаковые условия наблюдений.

Другой способ, позволяющий на стадии полевых работ улучшить результаты исследований, заключается в ортогональной смене ориентации положения источника и приемника сигналов [1]. Таким образом значительно изменяется четкость получения отражающих границ и, как следствие, точность распознавания глубины объектов в грунте. Этот прием существенно зависит от геометрических параметров объекта поиска и позволяет изменять отображение сигнала за счет резонанса.

Применение различных приемов осуществления полевых работ и достоверная интерпретация невозможны без построения

модели изучаемой среды. Для этого в идеале нужно иметь хотя бы несколько опорных точек, в которых проведено бурение, шурфование грунтов или вскрытие конструкций при сопоставлении с георадарными волновыми разрезами. В случае невозможности проведения подобных работ необходимо получить исходную информацию: геологические разрезы участка, чертежи конструкций и т. д.

Когда те или иные аномалии волновой картины, назовем их интерпретационными признаками, привязаны к конкретным объектам, дефектам и нарушениям, остается только выделить характерные участки и сформировать отчет о работах с выводами. Однако во многих случаях, к сожалению, обработка и интерпретация проводятся без опорных точек какой-либо геологической или проектной информации. В этих случаях желательно использовать в комплексе с георадаром другие методы исследований.

Стадия обработки и интерпретации. Интерпретационные признаки

Обработка и интерпретация результатов георадиолокационных исследований выполняются в программных комплексах, алгоритмы обработки которых заимствованы из программ обработки материалов инженерной сейсморазведки (метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки — МОВ ОГТ). Поскольку одной из основных задач инженерной сейсморазведки является поиск нефтяных и газовых коллекторов, а нефть и газ по-прежнему доминируют на промышленном рынке, разработка программ предшествовала большая научная и практическая работа с привлечением значительных ресурсов. В силу этого программные комплексы имеют весьма внушительный функционал обработки сигналов.

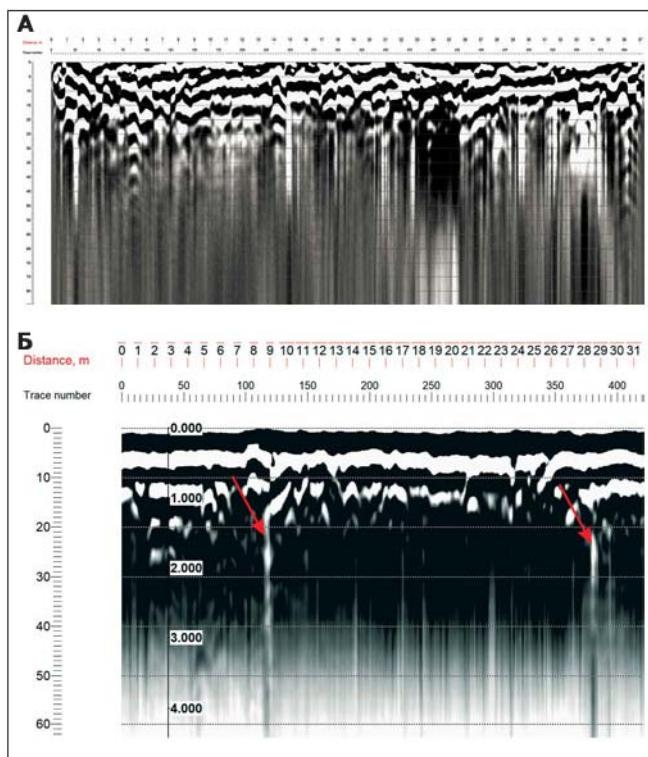


Рис. 1. Результаты поиска заглубленной «стены» в грунте, профили А и Б проходят параллельно друг другу на расстоянии 1,5–2 м

Первый шаг обработки — визуальный анализ волновой картины. На этом этапе оценивается скорость в среде, выделяются отражающие границы по осям синфазности сигнала, определяются его кинематические и динамические характеристики.

Из практики известно, что в ряде случаев, в частности для поиска искусственных объектов в грунте, для интерпретации лучше использовать необработанные исходные данные [2].

В то же время уже информативную картину можно существенно улучшить обработкой. Так, выполнение процедуры миграции сигнала в той же задаче поиска инородных объектов в грунте или в железобетонной конструкции позволит более четко восстановить их плановое расположение и глубину залегания.

Кроме того, следует отметить, что при исследованиях без опорных точек часто приходится использовать разные интерпрета-

ционные признаки, полученные на основании опыта. При этом один и тот же признак может иметь разное визуальное представление, а с виду одинаковые картинки будут означать совершенно разные процессы. Самый простой и понятный признак — огибающая в виде гиперболы, возникающая при отражении от неоднородности в среде при приближении/отдалении прибора. В зависимости от коэффициента отражения в среде картина может быть контрастной или слабой либо отсутствовать в неблагоприятных с точки зрения георадиолокации средах. Причем конфигурация гиперболы меняется в зависимости от глубины: вблизи поверхности она имеет так называемые длинные усы дифракции, и можно приблизительно оценить размер неоднородности и скорость в среде, с глубиной усы уменьшаются и оценить геометрию труднее.

По сути, любая обработка сво-

дится к выделению полезных отражений, подавлению воздушных волн-паразитов, выделению кратных и неполнократных отражений, идентификации изменений частоты и амплитуды сигнала на волновых картинах, из которых и формируется идентификационный признак. Самым распространенным идентификационным признаком электромагнитной волны является так называемый звон, или звенящая запись.

Процесс формирования такой волновой картины носит крайне непредсказуемый характер и не имеет четких логических объяснений. Явление звона возникает прежде всего при отражениях от металлических поверхностей, обводненных грунтов. Причем оно может прослеживаться как с поверхности (т. е. от начала записи), так и на глубине. Звон — безусловный показатель неоднородности в георадиолокации, но определение вызывающего эти особенности записи предмета,

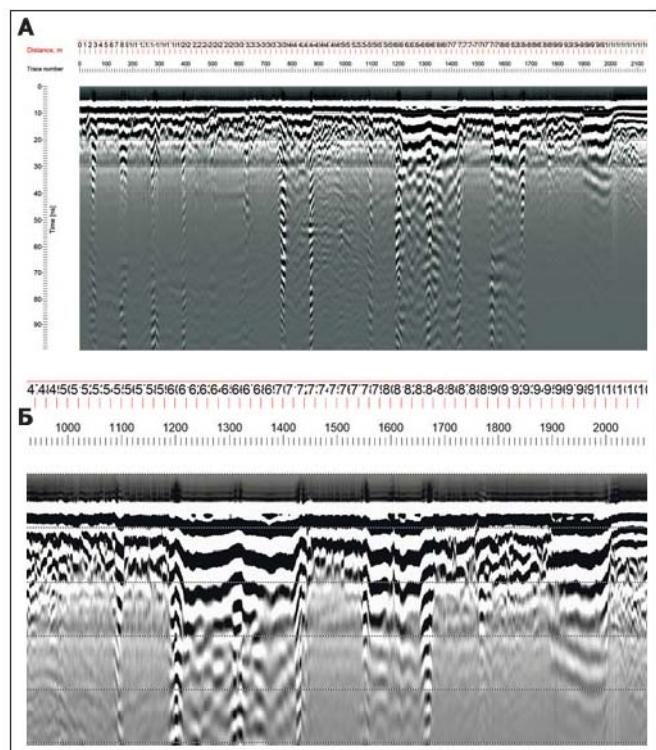


Рис. 2. Георадиолокационные профили А, Б, выполненные с целью поиска заглубленных фундаментов зданий и сооружений, оставшихся после сноса

без привязки к конкретному объекту, очень сложная задача.

Звон может быть как интерпретационным признаком, так и мешать интерпретации. Например, высокоамплитудный низкочастотный звон, возникающий при отражении от свай, служит поисковым признаком в задаче обнаружения свай и в то же время является помехой при прослеживании отражающих границ в грунтовом массиве и в самой свае. Обработка сигнала с помощью одномерного и двумерного вейвлет-разложения позволяет добиться исчезновения звука и выделить полезные отражения от оголовков свай [3].

Результат поиска фундаментов, оставшихся после сноса зданий и цехов в промышленной зоне, показан на рис. 2. Конструкции также выделяются как участки низкочастотного звука на записи. При этом наблюдается затухание сигнала, вероятно, связанное с глубиной заложения конструкций.

Аналогичные данные были получены при поиске «стены в грунте», верхняя часть которой была заглублена в грунтовом массиве (см. рис. 1). Звон является также показателем потери контакта обделок тоннелей различного назначения с грунтом. Такие обследования служат важным фактором надежности эксплуатации тоннельных сооружений, поскольку локальная потеря контакта приводит к неравномерному обжатию обделки, вследствие чего могут развиваться деформации конструкций вплоть до возникновения аварийной ситуации. Задача успешно решается методом ультразвуковой томографии и эхо-импульсным методом. Однако такие методы, основанные на распространении упругих волн в изучаемой среде, довольно трудоемки. В этой связи высокая оперативность георадиолокации весьма привлекательна в условиях исследований подземных сооружений,

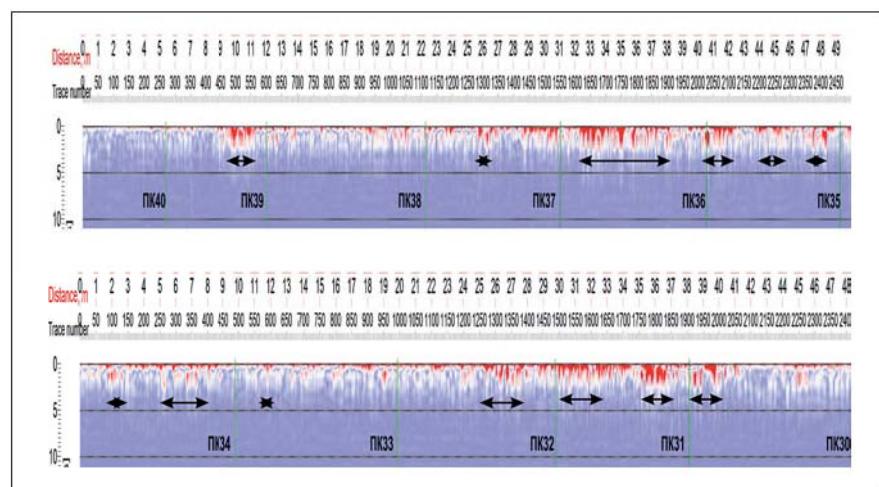


Рис. 3. Георадиолокационные профили по «вторичной рубашке» обделки коммуникационных тоннелей, стрелками показаны места нарушения контакта в конструкции обделки

особенно тоннелей метрополитена, где время работы ограничено технологическим окном.

Проведенные эксперименты на полигоне, имитирующем различные дефекты в заобделочном пространстве [4], показали неоднозначные результаты. Это обусловлено общими законами распространения электромагнитных волн, которые в отличие от упругих волн в сейсмоакустике недостаточно чувствительны к переходу через границы раздела сред и больше зависят от водонасыщенности.

Значительный опыт авторов статьи по применению георадара для решения подобных задач полностью подтверждает экспериментальные результаты. Для получения убедительных материалов исследований контакта в тоннелях обязательно требуются комплексирование георадара с другими методами, в частности с акустическими, и локальные зондажи конструкций.

В то же время при обследовании коммуникационных щитовых тоннелей со вторичной обделкой получен положительный опыт в определении полостей между основной и вторичной обделками. Основная обделка таких тоннелей сооружается из железобетонных

блоков. Для предотвращения падания воды при протечках по швам первичной обделки на силовые кабели в тоннелях сооружают монолитную железобетонную вторичную обделку («вторичная рубашка»). Некачественное выполнение работ и последующие деформации этой обделки приводят к образованию полостей между ней и основной обделкой тоннеля, по которым обычно происходит миграция грунтовых вод, фильтрующихся через швы основной обделки, и их протечки в тоннель. Эти полости необходимо заполнять ремонтными составами. Для определения их местоположения по трассе тоннеля и проводят георадиолокационные обследования.

Перемещая георадар по разным участкам верхнего полупериметра тоннеля вдоль его продольной оси можно получить расположение участков нарушения контакта. Фрагмент результатов исследований после обработки, на котором четко выделяются дефектные участки, приведен на рис. 3. В данном случае использован стандартный программный комплекс обработки RadExplorer 1.42. В некоторых случаях стандартной обработки недостаточно и следует использовать сторонние програм-

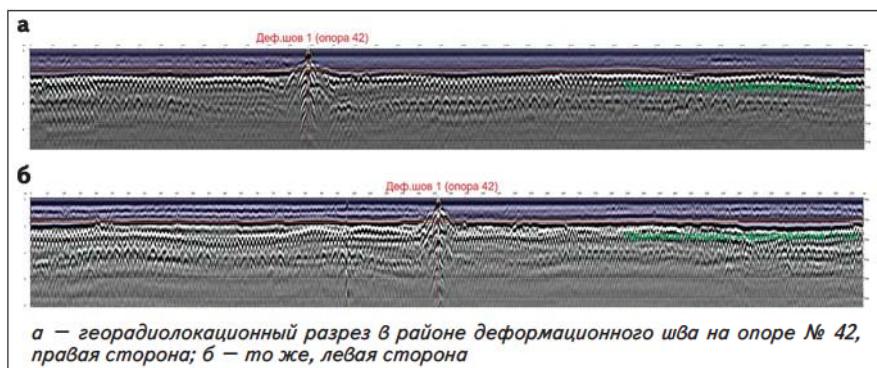


Рис. 4. Результаты определения толщины дорожной одежды при строительстве эстакады в районе Вешняки в Москве

мы. Так, в работе [5] рассматривается применение программного пакета MATLAB Image Processing Toolbox. Для работы необходима организация обмена данными между программой обработки и MATLAB с помощью написания специальной M-функции для обеспечения ввода–вывода данных в форматах sgy и gpr. В работе [5] подчеркивается, что поскольку методы обработки и сегментации изображений лежат в основе метода распознавания образов, с их помощью могут быть построены алгоритмы автоматического поиска различных объектов, например подсчет трещин большого раскрытия в дорожном покрытии, выделение обводненных участков и пр., т. е. процесс обработки можно автоматизировать.

Это возможно в случае диэлектрически контрастных сред при больших объемах полевого материала (исследования автомобильных дорог железнодорожных путей, аэроромов и т. п.). Методы обработки при этом построены на стандартных графах [6].

Автоматизация процесса распознавания дифрагированных отражений и определения кинематических характеристик волн с построением разреза позволяет существенно упростить процессы обработки и интерпретации. В числе преимуществ обработки данных в автоматическом режиме нужно отметить следующие:

- повышение глубинности исследований за счет высокой помехоустойчивости;
- увеличение информативности исследований благодаря формированию границ в условиях недостаточной контрастности значений диэлектрической проницаемости;
- значительное возрастание скорости обработки данных, что особенно важно при больших объемах информации, например в дорожных и железнодорожных отраслях;
- полный уход от человеческого фактора;
- расширение спектра информации, получаемой георадиолокационным методом (например, появляется возможность распределения влажности по разрезу) [6].

Именно благодаря автоматизации процесса обработки применение георадара в некоторых отраслях, в частности в дорожной, получило широкое распространение, что способствовало разработке новых нормативных документов.

Нормативное обоснование метода

За последние годы широкое распространение метода георадиолокации нашло отражение в нормативных документах. Однако таких документов, регламентирующих применение георадара, до

сих пор мало, и они носят отраслевой характер. Основной документ – СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», ч. 5. В постановлениях правительства Москвы (№ 857-ПП от 07.12.2004 г. и № 980-ПП от 06.12.2005 г.) упоминаются георадарные исследования при оформлении ордера на производство земляных работ. При проведении работ по микротоннелированию геофизические исследования прописаны для применения в обязательном порядке («Руководство по применению микротоннелепроходческих комплексов и технологий микротоннелирования при строительстве подземных сооружений и прокладке коммуникаций закрытым способом». М., 2004, прил. 16).

Немного лучше обстоят дела в дорожной отрасли: в 2004 г. введены в действие «Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций», в 2013 г. принят СТО-01-2013 «Применение георадарных технологий в дорожной отрасли Хабаровского края» и в 2016 г. Росавтодором выпущен ОДМ 218.3.075-2016 «Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации» (наиболее проработанный документ по которому можно вести оценку) [7].

При проведении работ по строительству эстакады в Москве использование рекомендаций [7] позволило однозначно оценить состояние качества асфальтобетонного покрытия даже без проведения работ по бурению контрольных отверстий (рис. 4).

В настоящее время георадары активно применяются в железнодорожной отрасли для оценки состояния железнодорожного полотна, при этом отсутствуют нормативные документы, регламентирующие выполнение таких исследований.

Выводы

1. При проведении георадиолокационных исследований необходимо на стадии полевых работ получить достоверную картину, позволяющую решить поставленные задачи. При этом следует учитывать все факторы и применять известные приемы выполнения съемки на местности. Желательно добиться, чтобы полученный в поле материал даже без обработки содержал всю необходимую информацию. В случае, если полевые записи не дают ну-

жной информации или она недостаточна, следует добиваться получения результатов с помощью различных приемов и методов обработки.

2. Для решения стандартных задач в повторяющихся условиях, в случае сильно протяженных и объемных объектов, эффективно использовать автоматизированные системы обработки данных.

3. С целью более глубокой обработки, качественного анализа изучаемой среды, мониторинга и проведения научных эксперимен-

тов следует применять сторонние программные комплексы математической обработки сигналов.

4. Разработка нормативных документов, регламентирующих использование метода георадиолокации в различных отраслях, существенно упростит обоснование его использования, позволит конкретизировать критерии получения параметров среды, обоснует целесообразность применения метода в глазах инженерных кадров в различных областях строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шилин А. А., Кириленко А. М., Знайченко П. А. Результаты интерпретации георадиолокационных исследований грунтовых массивов в городских условиях // Транспортное строительство. 2015. № 6. С. 19–23.
2. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М. : МГУ, 2008. 191 с.
3. Капустин В. В. Дополнительные возможности компьютерной обработки георадарных и сейсмических данных // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 26–30.
4. Набатов В. В., Гайсин Р. М., Вознесенский А. С. Георадиолокационная оценка качества контакта «грунт–обделка» в условиях тоннелей метрополите-нов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 9. С. 157–163.
5. Капустин В. В., Строчков Ю. А. Некоторые особенности обработки георадарных данных при исследованиях строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 22–25.
6. Денисов Р. Р., Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2008. № 4. С. 76–80.
7. ОДМ 218.3.075-2016. Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации / Росавтодор. М., 2016. 76 с.

REFERENCE

1. Shilin A. A., Kirilenko A. M., Znaychenko P. A. Interpretation results of georadiolocation survey of soil masses in urban settings. *Transportnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 6, pp. 19–23. (In Russian).
2. Starovoytov A. V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* [Interpretation of georadiolocation data]. Moscow, MGU Publ., 2008. 191 p. (In Russian).
3. Kapustin V. V. Additional options of computer processing of georadiolocation and seismic data. *Razvedka i okhrana nedr*, 2005, no. 12, pp. 26–30. (In Russian).
4. Nabatov V. V., Gaysin R. M., Voznesenskiy A. S. Georadiolocation assessment of quality of contact "ground – lining" in environment of the underground tunnels. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2013, no. 9, pp. 157–163. (In Russian).
5. Kapustin V. V., Strochkov Yu. A. Some features of processing of georadiolocation data in the course of survey of building constructions. *Razvedka i okhrana nedr*, 2008, no. 1, pp. 22–25. (In Russian).
6. Denisov R. R., Kapustin V. V. Processing of georadiolocation data in automatic mode. *Geofizika*, 2008, no. 4, pp. 76–80. (In Russian).
7. ODM 218.3.075-2016. *Rekomendatsii po kontrolyu kachestva vypolneniya dorozhno-stroitel'nykh rabot metodom georadiolokatsii* [Recommendations related to quality control of road-construction works with the application of GPR method]. Moscow, 2016. 76 p. (In Russian).

Для цитирования: Дымбренов Т. Н., Знайченко П. А. Георадиолокационный метод обследования при решении различных задач в области строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 11. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.28-33.

For citation: Dymbrenov T. N., Znaichenko P. A. Georadiolocation Survey Method for Solving Various Construction Tasks. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroiteльstvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 11, pp. 28–33. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.11.28-33. ■