

**Георадиолокационное обследование мостовых сооружений:
вопросы методики проведения полевых исследований,
обработки и интерпретации материалов.
Часть 2 – свайные фундаменты мостовых опор**

©2024 А. А. Аузин[✉], Д. Д. Каратаев

*Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Обследование мостовых сооружений (мостов, путепроводов, акведуков, виадуков, эстакад и пр.), которые предназначены для перевода различных коммуникаций, прежде всего – транспортных, через какие-либо препятствия (водные преграды, авто- и железные дороги, овраги и т.п.), имеет целью определение их конструктивных характеристик и технического состояния, от которых зависят как возможность дальнейшего продолжения безаварийной эксплуатации объектов, так и их ремонтпригодность [1]. Конструктивные элементы мостовых сооружений, которые недоступны для непосредственного (прямого) изучения, могут быть обследованы геофизическими методами, прежде всего георадиолокацией [1–7]. Следует отметить, что георадиолокационный метод официально рекомендован для обследования фундаментов опор мостовых сооружений ГОСТ Р 59617-2021 [1].

1-ая часть статьи была посвящена вопросам георадиолокационного обследования массивных фундаментов мостовых опор [6]. В предлагаемой читателю 2-ой части статьи рассматриваются результаты и некоторые методические вопросы обследования свайных фундаментов, а также таких элементов мостовых сооружений как переходные плиты, подпорные и шкафные стенки.

Методика: Статья иллюстрируется авторскими материалами георадиолокационного обследования различных элементов мостовых сооружений, причем, не только фундаментов, но и стоек опор, подпорных и шкафных стенок, переходных плит.

Результаты и обсуждение: Материалы, представленные в статье, подтверждают высокую эффективность и универсальность георадиолокационного метода обследования мостовых сооружений, который, во многих случаях, оказывается единственным возможным источником информации о конструктивных характеристиках и техническом состоянии их элементов, расположенных как над, так и под поверхностью земли. Бесконтактный способ возбуждения и измерения электромагнитных полей, а также возможность использования экранированных антенных блоков, которые имеют более благоприятную направленность излучения и приема зондирующего электромагнитного излучения, позволяют уменьшить зависимость результативности исследований от условий их проведения.

Заключение: Данные обследования мостовых сооружений свидетельствуют о высокой информативности георадиолокационного метода, особенно при изучении погребенных частей сооружений. Возможность выбора методики исследований, их аппаратного обеспечения и подходов к интерпретации материалов позволяют оптимизировать их проведение применительно к решению конкретных задач.

Ключевые слова: георадиолокационное обследование, мостовые сооружения, свайные фундаменты.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Аузин Андрей Альбертович, e-mail: AAuzin@yandex.ru

Для цитирования: Аузин А. А., Каратаев Д. Д. Георадиолокационное обследование мостовых сооружений: вопросы методики проведения полевых исследований, обработки и интерпретации материалов. Часть 2 – свайные фундаменты мостовых опор // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 1. С. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/102-110>

Введение

Под обследованием мостового сооружения понимается выполнение комплексных работ, целью которых является выяснение его фактической конструкции и технического состояния [1]. Информация такого рода необходима для оценки возможности продолжения безаварийной эксплуатации и ремонтпригодности сооружения, а также определения содержания и объема работ, направленных на повышение эксплуатационных характеристик объекта.

В условиях, когда прямые визуальные и (или) инструментальные методы не могут быть использованы при обследовании сооружений, определение их конструктивных характеристик может быть выполнено геофизическими методами, из которых наиболее универсальным можно считать георадиолокацию [3–9]. Подобная ситуация в наибольшей степени характерна для фундаментов опор мостовых сооружений, которые заглублены в грунт, находятся под водой, бетоном, слоем асфальта и пр.

Георадиолокационный метод имеет ряд преимуществ, обеспечивающих решение большого круга разномасштабных задач. Такая возможность обеспечивается широким набором антенных блоков, имеющих не только различные рабочие частоты, подбор которых позволяет оптимизировать соотношение между разрешающей способностью исследований и их глубиной, но и принципиальные конструктивные особенности. В частности, применение экранированных антенн дает возможность уменьшить помехи, обусловленные отражениями от наземных объектов [3, 4, 6].

Как уже отмечалось в опубликованной ранее 1-ой части статьи [6], в конструктивном плане, опоры мостовых сооружений могут составлять со своими фундаментами единое целое (в таком случае они представляют собой, в основном, свай-стойки глубокого заложения), или иметь отдельные фундаменты. Среди отдельных фундаментов наибольшее распространение получили свайные фундаменты глубокого заложения. Однако встречаются и отдельные массивные фундаменты мелкого заложения или в виде опускных колодцев глубокого заложения.

Свайные фундаменты используются при достаточно глубоком залегании прочных грунтов – более 5–6 м. Оголовки свай такого фундамента объединяются ростверком. Свайные фундаменты бывают с высоким или низким ростверком. Подошва высокого ростверка находится выше поверхности грунта или над дном водотока. Ростверк, подошва которого лежит на поверхности грунта или в него заглублена, считается низким.

В практике мостостроения, в основном, используются два типа свай: забивные и буровые. Среди

буровых свай, по конструкции и способу погружения в грунт, различают: буронабивные, бурообсадные, свай-оболочки и буровые столбы [1].

Задачи и результаты исследований

Результаты решения практических задач по обследованию мостовых сооружений георадиолокационным методом иллюстрируются материалами, полученными авторами статьи. Исследования выполнялись с использованием георадара Зонд-12е в комплекте с антенными блоками, работающими на частотах 1.5 ГГц, 900 МГц, 500 МГц, 150 МГц и 75 МГц. Первые три наиболее высокочастотных блока построены на основе контактных экранированных антенн, а в обоих низкочастотных используются открытые дипольные антенны.

Представленные в статье результаты георадиолокационных исследований сгруппированы по типам обследованных фундаментов и дополнены материалами, полученными в результате обследования таких элементов мостовых сооружений как подпорные и шкафные стенки и переходные плиты.

Свайные фундаменты глубокого заложения

На практике достаточно часто встречается вариант, когда *свай-стойки глубокого заложения составляют единое целое с опорами мостового сооружения*. Результаты георадиолокационного обследования объектов такого рода представлены на рис. 1, 2 и 3.

По результатам георадиолокационного обследования, промежуточная опора моста, расположенного на автодороге М-2 "Крым" в Курской обл., представляет собой забивные свай-стойки квадратного сечения (35 см × 35 см), заглубленные в грунт до отметки 12.3 м (среднее значение) относительно поверхности земли.

Данные георадиолокационного обследования свидетельствуют, что промежуточные опоры моста на автодороге А-298 в Саратовской обл. имеют однотипную конструкцию – по 7 цилиндрических буронабивных свай-стоек диаметром 90 см, заглубленных в грунт до отметки 8.3 м (среднее значение) относительно поверхности земли.

Некоторые результаты георадиолокационного обследования моста на автодороге А-181 через одну из крупнейших рек Кольского перешейка приведены на рис. 8. Инженерно-геологический разрез в пределах правобережной части моста, где и расположена обследованная опора, вплоть до 25 м представлен текучими и текучепластичными илами. Данная опора состоит из 7 свай-оболочек диаметром 40 см. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что, в условиях однородного разреза умеренной электропроводности, сигналы, обусловленные присутствием в разрезе свай, прослеживаются до глубин 20 и даже более метров.

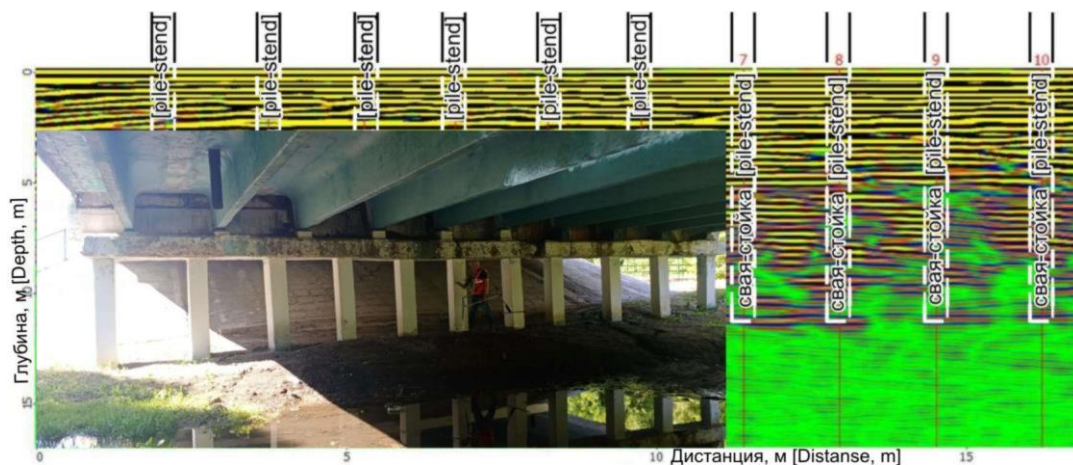


Рис. 1. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге М-2 "Крым" в Курской обл.

[Fig. 1. Results of the geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the M-2 "Crimea" highway in the Kursk region.]

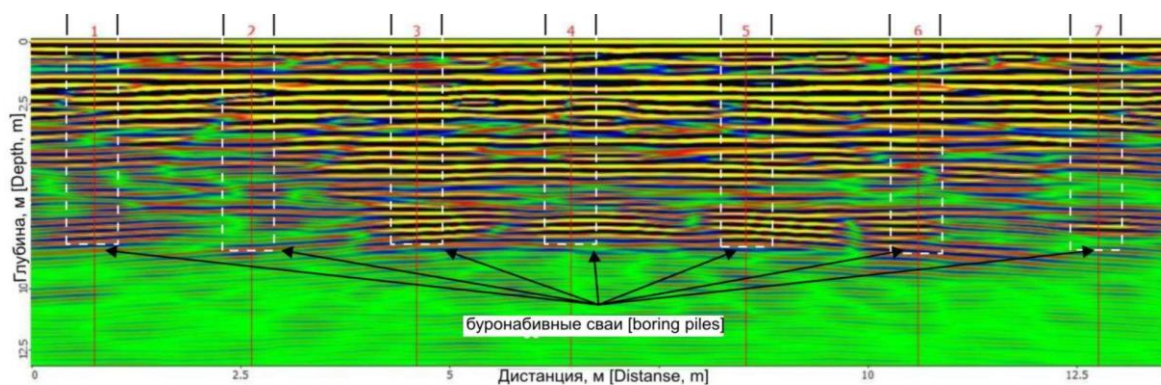


Рис. 2. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге А-298 в Саратовской обл.

[Fig. 2. Results of the geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the A-298 highway in the Saratov region.]

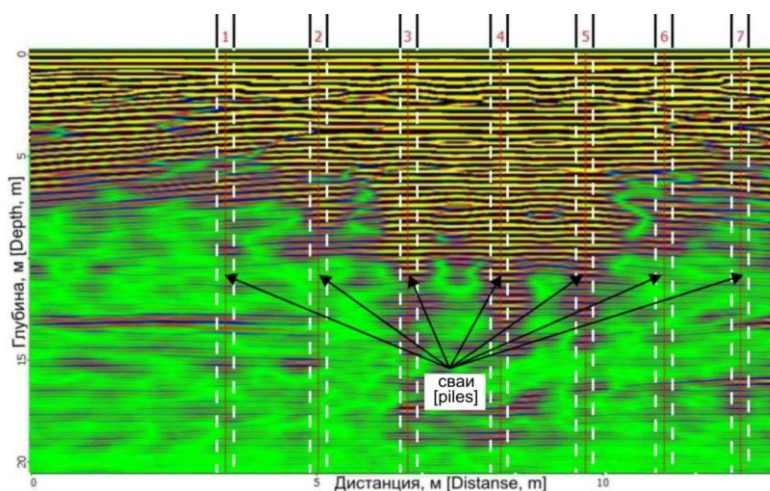


Рис. 3. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге А-181 в Ленинградской обл.

[Fig. 3. Results of the geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the A-181 highway in the Leningrad region.]

Свайные фундаменты глубокого заложения получили наибольшее распространение среди отдельных фундаментов, не составляющих единое целое с опорами мостовых сооружений.

Свайные фундаменты используются, когда глубина залегания прочных грунтов превышает 5–6 м. Оголовки свай такого фундамента объединяются ростверком, который бывает высоким или низким (рис. 4).

В результате обследования опоры моста на автодороге Р-239 вблизи границы с Респ. Казахстан (Оренбургская обл.) были определены её конструктивные параметры – размеры ростверка, количество и глубины залегания забивных свай.

Результаты обследования фундаментов опор моста

на автомобильной дороге Р-22 в Республике Калмыкия показаны на рис. 5.

Данные, полученные в результате интерпретации материалов георадиолокационного обследования, позволяют говорить о том, что все промежуточные опоры имеют идентичную конструкцию. Они покоятся на забивных сваях, заглубленных в грунт в среднем на 10.7 м от поверхности земли. Сваи расположены в 3 ряда, по 7 штук в каждом. Расстояние между рядами свай ~ 2.0 м. Расстояние между сваями в рядах ~ 2.0 м. Оголовки свай объединены ростверком, толщина которого составляет ~ 1.25 м. Его длина ~ 14 м, ширина ~ 5.5 м. Верхние кромки ростверков залегают на глубинах около 1.35 м.

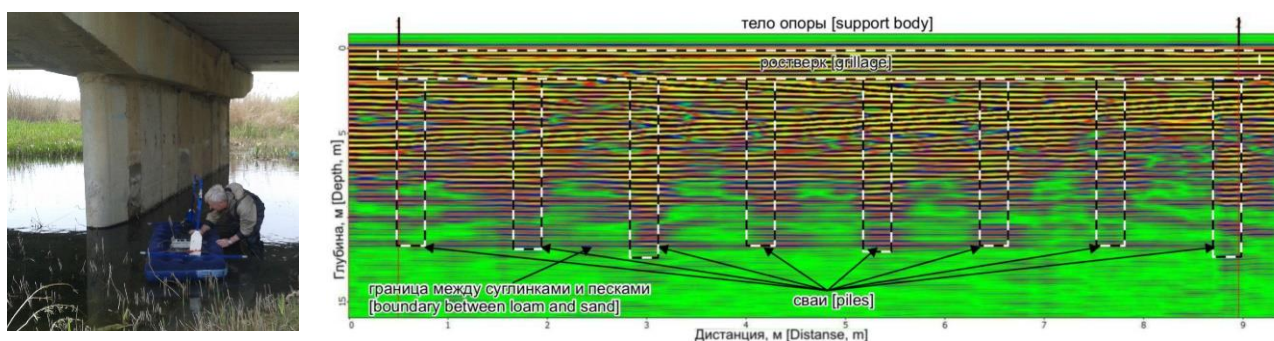


Рис. 4. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге Р-239 в Оренбургской обл. [Fig. 4. Results of the geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the R-239 highway in the Orenburg region.]

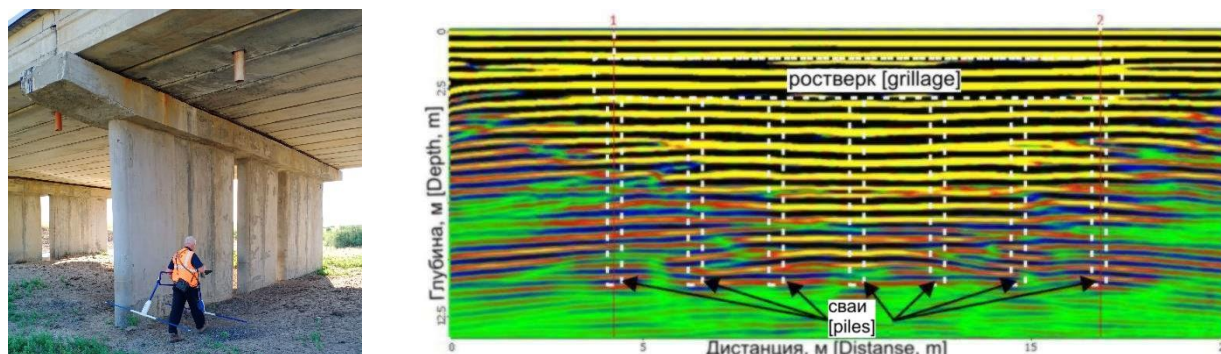


Рис. 5. Результаты георадиолокационного обследования одной из промежуточных опор моста на автодороге Р-22 в Республике Калмыкия

[Fig. 5. Results of geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the R-22 highway in the Republic of Kalmykia.]

Результаты обследования фундамента опоры реконструированного моста на автомобильной дороге Р-228 в Саратовской обл. показаны на рис. 6.

Результаты интерпретации материалов георадиолокационного обследования промежуточных опор моста позволяют говорить о том, что сваи центральных стоек опор погружены на глубины 14.0 – 14.7 м относительно поверхности земли и покоятся на 2-х рядах свай по 7 штук в каждом ряду. Сваи, на которых установлены крайние стойки опор пристроенных частей моста, погружены на глубины около 12.0 – 12.6 м от уровня поверхности земли и в своем основании имеют 2 ряда свай по 3 шт. в каждом. Ростверки стоек промежуточных опор имеют толщину около 1.8 м.

Данные обследования фундамента опоры моста на автомобильной дороге А-298 в Саратовской обл. показаны на рис. 7.

Результаты интерпретации материалов георадиолокационного обследования промежуточных опор моста свидетельствуют, что они покоятся на сваях, заглубленных в грунт в среднем на 8.5 м от поверхности земли. Сваи расположены в 3 ряда, по 7 штук в каждом. Расстояние между рядами свай ~ 1.35 м. Расстояние между рядами свай ~ 1.25. Оголовки свай объединены ростверком, толщина которого составляет ~ 1.5 м, длина ~ 10 м, ширина ~ 3.5 м. Верхние кромки ростверков залегают на глубинах около 1.8 м.

Важные в практическом отношении материалы,

иллюстрирующие методические особенности проведения георадиолокационного обследования опор мостовых сооружений, были получены в процессе изучения фундаментов опор моста через реку на автодороге Р-22

в Саратовской области. Результаты исследований, выполненных с антенным блоком 75 МГц, представлены на рис. 8.

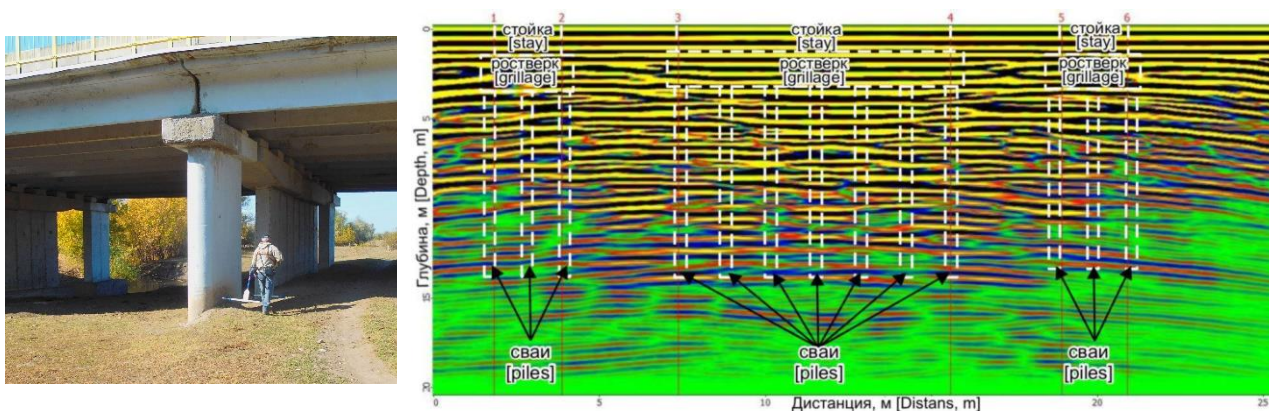


Рис. 6. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге Р-228 в Саратовской обл.
[Fig. 6. Results of geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the R-228 highway in the Saratov region.]

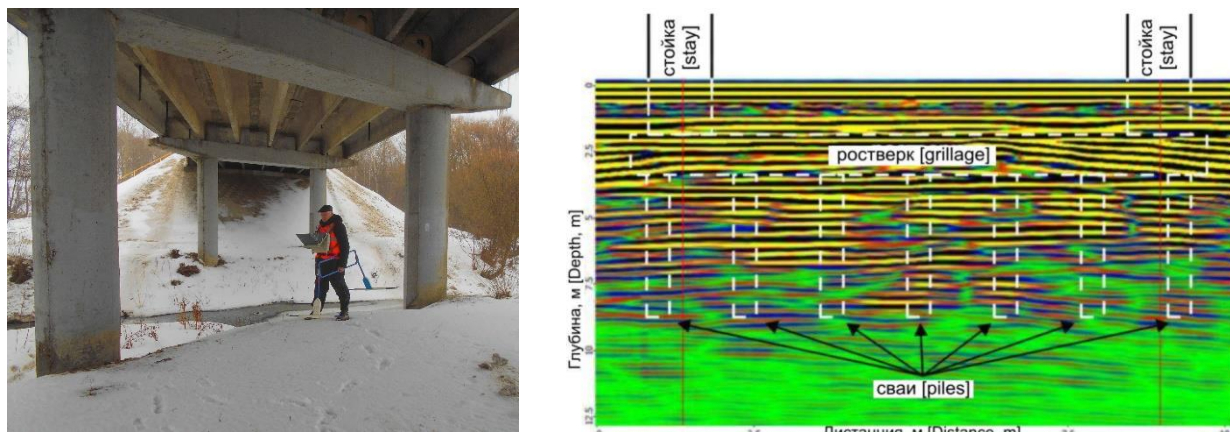


Рис. 7. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге Р-298 в Саратовской обл.
[Fig. 7. Results of geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the R-298 highway in the Saratov region.]

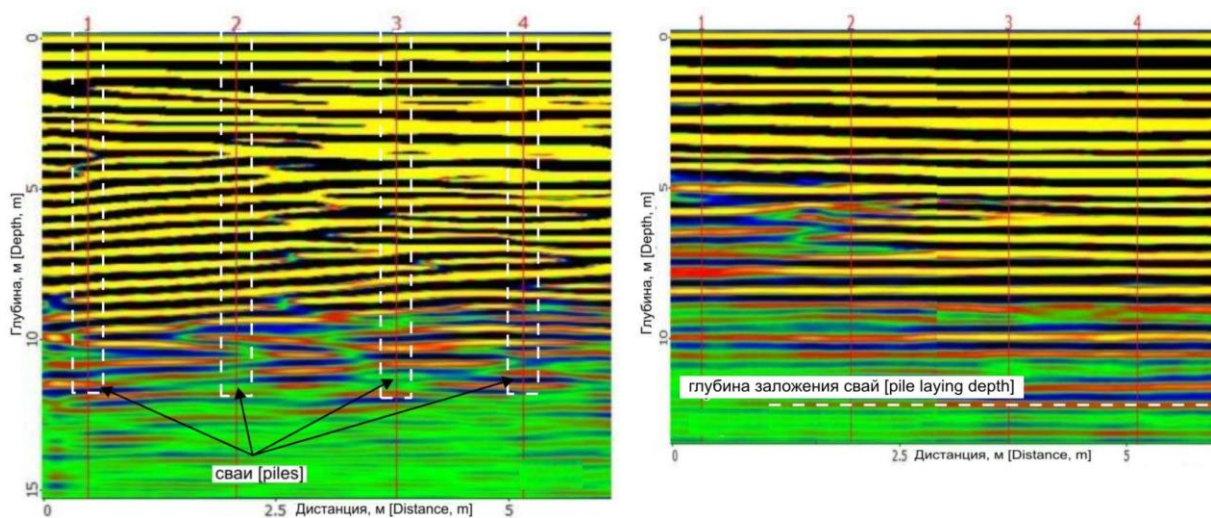


Рис. 8. Результаты георадиолокационного обследования промежуточной опоры моста на автодороге Р-22 в Саратовской обл. На левом профиле антенна ориентирована перпендикулярно линии свай, на правом профиле – вдоль линии свай.
[Fig. 8. Results of geo-radar inspection of the intermediate bridge support on the R-22 highway in the Saratov region. On the left profile, the antenna is oriented perpendicular to the pile line, on the right profile – along the pile line.]

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что, при ориентировке открытой дипольной антенны перпендикулярно линии свай-стоек, в волновом поле просматриваются отражения, обусловленные каждой свайей в отдельности. При ориентировке элементов дипольной антенны параллельно линии свай, в волновом поле находит отражение только интегральный эффект от всех свай в целом.

Обследование подпорных и шкафных стенок осуществляется с целью выяснения их конструктивных характеристик и технического состояния.

Подпорная стенка – служит для удерживания от обрушения или сползания массивов грунтов, которые находятся на участках местности, имеющих уклон.

Шкафная стенка является элементом верхней части устоя мостового сооружения, отделяющим торец пролетного строения и зону расположения опорных

частей от грунта насыпи подхода.

Пример проведения обследования шкафных стенок однопролетного моста через балку на автодороге А-298 в Саратовской обл. показан на рис. 9. Исследования были выполнены с двумя экранированными антенными блоками, работающими с центральными частотами 1.5 ГГц и 900 МГц.

Результаты обследования свидетельствуют, что при капитальном ремонте моста была построена дополнительная передняя шкафная стенка, которая имеет толщину ~ 0.6 м, боковые стенки шкафного блока имеют толщину ~ 0.45 см. Внутренняя ("старая") стенка опоры отстоит от лицевой поверхности передней стенки на ~ 1.5 м. Обследованием было выявлено разрушение тыльной стороны передней ("новой") стенки.

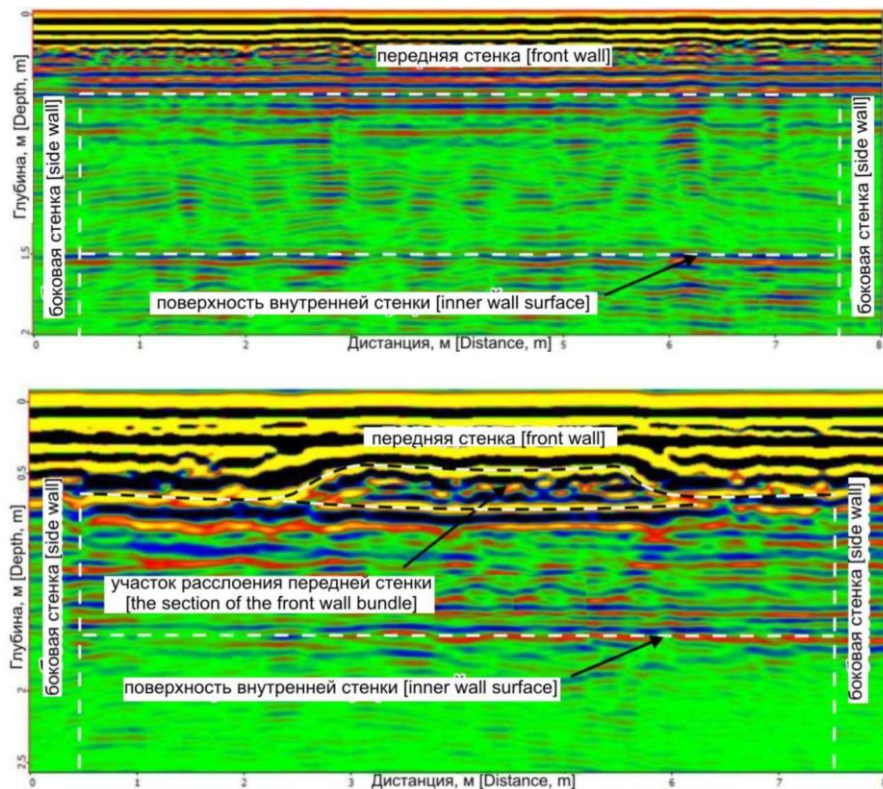


Рис. 9. Результаты георадиолокационного обследования шкафной стенки устоя моста на автодороге Р-298 в Саратовской обл. Обследование выполнено с антенными блоками 1.5 ГГц (вверху) и 900 МГц (внизу).

[Fig. 9. Results of geo-radar inspection of the ballast wall of the bridge on the R-298 highway in the Saratov region. The survey was performed with 1.5 GHz antenna units (top) and 900 MHz (bottom).]

Обследование переходных плит, служащих для сопряжения мостовых сооружений с насыпями и работающих под действием больших вертикальных нагрузок и динамических ударов, осуществляется с целью определения их геометрических характеристик и технического состояния.

В соответствии с результатами интерпретации данных георадиолокационного обследования, выполненного с антенным блоком 1.5 ГГц (рис. 10),

длина переходных плит составляет ~ 600 см, а толщина ~ 15 см. При этом, со стороны въезда на мост угол наклона плиты относительно горизонтали составляет $\sim 1.5^\circ$, а со стороны съезда – $\sim 2.5^\circ$. Результаты обследования свидетельствуют, что переходные плиты находятся в удовлетворительном техническом состоянии.

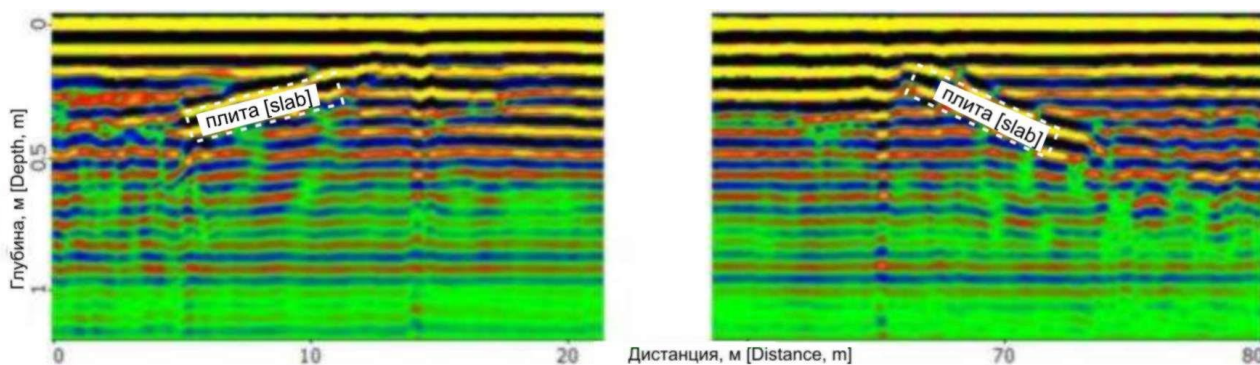


Рис. 10. Результаты георадиолокационного обследования моста на автодороге Р-193 в Тамбовской обл.
[Fig. 10. Results of geo-radar inspection of the bridge on the R-193 highway in the Tambov region.]

Закключение

Материалы исследований подтверждают эффективность обследования мостовых сооружений георадиолокационным методом, применение которого позволяет решать достаточно широкий круг задач.

Имеющийся опыт показывает, что, при обследовании заглубленных в грунт элементов мостовых сооружений, в большинстве случаев, наиболее информативные материалы получаются в результате исследований с открытой дипольной антенной, работающей на центральной частоте 150 МГц. В большинстве случаев, такая антенна обладает оптимальным соотношением между достигаемой глубиной исследования и их детальность. По сравнению с контактными антеннами, она менее чувствительна к неровностям рельефа поверхности наблюдений, неоднородностям приповерхностного слоя грунтов, а также более мобильна.

При выполнении обследования важное значение имеет выбор расстояния от профиля наблюдений до обследуемого объекта, в особенности, если мостовое сооружение имеет глубокий свайный ростверк, который может экранировать электромагнитное поле, формирующееся на сваях.

Проведение обследования осложняется тем обстоятельством, что к настоящему времени большинство мостовых сооружений, как правило, уже реконструировались. Такие мероприятия обычно сопровождаются усилением фундаментов, что в целом существенно усложняет их конструкцию и, соответственно, затрудняет интерпретацию материалов обследования.

При обеспечении полноценной реализации возможностей георадиолокации ключевую роль играют:

- правильный выбор частоты и типа антенного блока георадара;
- учет направленности передающей и приемной антенн и типа поляризации излучения генераторного диполя, что позволяет оптимизировать ориентировку антенн (прежде всего – открытых дипольных) относительно объекта исследования и объектов, являющихся потенциальными источниками помех;

– учет инженерно-геологического строения территории, на которой проводятся исследования, причем не только на стадии интерпретации материалов георадиолокации, но и при определении методики проведения исследований;

– обязательная фиксация на радарограмме положений объектов, которые могут оказать влияние на регистрируемые в процессе исследований сигналы.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 59617-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Правила обследования фундаментов опор. М.: Росстандарт, 2021. 28 с.
2. ГОСТ 33179-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания мостов и путепроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
3. Аузин А. А. Георадиолокационное обследование фундаментов мостовых сооружений // *Геотехника*. № 6. 2017. С. 58–77.
4. Аузин А. А. Информационные возможности георадиолокационного метода при обследовании строительных объектов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 2. С. 54–62.
5. Аузин А. А., Зацепин С. А. Георадиолокационное обследование проблемных участков дорожно-транспортной сети // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2012. № 2. С. 242–246.
6. Аузин А. А., Каратаев Д. Д. Георадиолокационное обследование мостовых сооружений: вопросы методики проведения полевых исследований, обработки и интерпретации материалов. Часть 1 – массивные фундаменты мостовых опор // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 4. С. 106–112.
7. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2006. 192 с.
8. Ground Penetrating Radar. 2nd edition. Ed. Daniels D. J. IEE Press, London 2004. 726 p.
9. Ground Penetrating Radar. Theory and Applications. Ed. Jol H.M. Elsevier. Amsterdam. 2009. 544 p.

Georadiolocation survey of bridge structures: field research methodology, processing and interpretation of materials. Part 2 – the piles foundations of bridge supports

© 2024 A. A. Auzin[✉], D. D. Karataev

*Voronezh State University,
Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The inspection of bridge structures (bridges, overpasses, aqueducts, viaducts, etc.), which are designed to transfer various communications over obstacles (water barriers, automobile roads and railways, etc.), is aimed at determining their design characteristics and technical condition. Both the possibility of trouble-free operation of facilities and their maintainability depends on this [1]. The elements of bridge structures that are not available for direct study can be examined by geophysical methods, primarily georadiolocation [1–3, 6–8]. It should be noted that the georadiolocation method is recommended for the examination of the foundations of the pillars of bridge structures GOST [1].

In the second part of the article, the results of the survey of pile foundations of bridge supports and their visible parts – transition plates, retaining and cabinet walls are considered.

Methodology: The article is illustrated by the author's materials of the geo-radar inspection of bridge structures, primarily their foundations. The data of the survey of visible parts of bridge structures – pillars, retaining and cabinet walls, etc., are given. The work was aimed at establishing their technical condition and design characteristics.

Results and discussion: The materials presented in the article confirm the high efficiency and versatility of the georadiolocation method, which in many cases turns out to be the only possible source of information about the design characteristics and technical condition of the elements of bridge structures. The contactless method of generating and measuring of electromagnetic fields, as well as the presence of shielded antennas reduce the dependence of research on the conditions of their conduct.

Conclusion: The results of the survey of bridge structures indicate the high informativity of the geo-radar method, especially when studying the buried parts of structures. The possibility of choosing research methods, their hardware and approaches to the interpretation of materials allow to optimize their conduct.

Keywords: geo-radar survey, bridge structures, pile foundations.

For citation: Auzin A. A., Karataev D. D. Georadiolocation survey of bridge structures: field research methodology, processing and interpretation of materials. Part 2 – the piles foundations of bridge supports// *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 1, pp. 102–110. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/102-110>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Auzin Andrey Albertovich, e-mail: AAuzin@yandex.ru

REFERENCES

1. GOST R 59617-2021. Dorogi avtomobilnie obshego polzovania. Pravila obsledovania fundamentov opor [GOST R 59617-2021. Public roads. Rules for inspection of foundations of supports]. Moscow, Russian Institute of Standardization publ., 2021, 28 p. (In Russ.)
2. GOST 33179-2014. Dorogi avtomobilnie obshego polzovania. Iziskania mostov i puteprovodov [GOST 33179-2014. Public roads. Surveys of bridges and overpasses. General requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2014, 36 p. (In Russ.)
3. Auzin A. A. Georadiolokacionnoe obsledovanie fundamentov mostovykh soorugenyi [Ground Penetrating Radar (GPR) investigations of the foundations of bridge structures]. *Geotekhnika–Geotekhnika*, 2017, no. 6, pp. 58–77 (In Russ.)
4. Auzin A. A. Informacionnye vozmozhnosti georadiolokacionnogo metoda pri obsledovanii stroitelnykh obektov [Information capabilities of the georadiolocation method in the survey of construction sites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 54–62 (In Russ.)
5. Auzin A. A., Zatsepin S. A. Georadiolokacionnoe obsledovanie problemnykh ychastkov dorogno-transportnoi seti [Ground Penetrating Radar (GPR) investigations of problem areas of the road transport network]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2012, no. 2, pp. 242–246 (In Russ.)
6. Auzin A. A., Karataev D. D. Georadiolokacionnoe obsledovanie mostovykh soorugenyi: voprosy metodiki provedeniya polevykh issledovaniy, obrabotky i interpretatsii materialov. Chast 1 – massivnye fundamenty mostovykh opor [Georadiolocation survey of bridge structures: issues of methodology of field research, processing and interpretation of materials. Part 2 – the piles foundations of bridge supports]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 106–112 (In Russ.)
7. Starovojtov A. V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* [Interpretation of ground penetrating radars data]. Moscow, MGU publ., 2006, 192 p. (In Russ.)
8. Ground Penetrating Radar. 2nd edition. Ed. Daniels D. J. IEE Press, London 2004, 726 p.
9. Ground Penetrating Radar Theory and Applications. Ed. Jol H.M. Elsevier, Amsterdam, 2009, 544 p.

Аузин Андрей Альбертович, д.т.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: AAuzin@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3043-3726

Каратаев Дмитрий Дмитриевич, аспирант, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ddk1997@yandex.ru; ORCID 0009-0003-8451-4710

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Andrey Al. Auzin, Dr. habil. in Tech., Professor, Voronezh State University, Voronezh. Russian Federation, e-mail: AAuzin@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3043-3726

Dmitriy D. Karataev, Post-Graduate Student, Voronezh State University, Voronezh. Russian Federation, e-mail: ddk1997@yandex.ru; ORCID 0009-0003-8451-4710

Authors have read and approved the final manuscript.