

УДК 624.13.539.3

## ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА УСТРОЙСТВА ЦЕМЕНТО-ГРУНТОВЫХ И МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСТРАИВАЕМЫХ В ГРУНТЕ

канд. техн. наук, доц. **А.П. КРЕМНЁВ; А.Н. ПОЛЯКОВ; К.С. ГУСЕНОК; Т.А. МИРЗАЕВ**  
(Полоцкий государственный университет)

*Рассматривается неразрушающий метод контроля качества изготовления различного рода подземных конструкций, элементов фундаментов и грунтовых сооружений с использованием георадара. Приводятся примеры успешного применения георадарного зондирования для обнаружения пустот, каверн, слабых прослоек в цементно-грунтовых конструкциях, выполненных при помощи струйной технологии, а также при изготовлении буронабивных свай. Затронуты вопросы оптимизации применения традиционных разрушающих методов исследования с учётом данных георадиолокационного зондирования на примере противофильтрационной стенки строящейся Витебской ГЭС.*

**Введение.** Внедрение в практику строительства новых современных технологий возведения фундаментов и различного рода подземных конструкций позволяет существенно сократить сроки строительства и его стоимость. Так, к примеру, применение струйной технологии (Jet Grouting) при устройстве цементно-грунтовых опор и противофильтрационных завес позволяет в разы сократить время их возведения и, соответственно, снизить стоимость работ нулевого цикла. То же самое касается и буросмесительных методов устройства цементогрунтовых свай и опор, когда цементный раствор, смешиваясь с природным грунтом, после схватывания образует прочные и жесткие подземные конструкции.

Особое внимание в этом случае уделяется контролю качества выполняемых работ. Смешение цемента с грунтом происходит непосредственно в выработке, и проконтролировать этот процесс визуально не представляется возможным. При контрольном вскрытии нередко можно обнаружить каверны, пустоты, слабые прослойки, не заполненные цементным раствором, что отражается на несущей способности конструкций, долговечности и эксплуатационной пригодности.

На наш взгляд, наиболее перспективным методом оценки технического состояния подземных конструкций, устраиваемых непосредственно в грунте, является метод георадиолокационного зондирования, основанный на изучении отраженной электромагнитной радиоволны, излучаемой специальным передатчиком. Данный метод позволяет получить наибольшее количество информации о состоянии и строении подземных конструкций, уточнить геометрические параметры и обнаружить в них неоднородности. Георадарное зондирование предоставляет возможность наблюдать непрерывную целостную картину строения как оснований, так и возводимых конструкций в плане и по глубине [1–3]. При необходимости может быть построена трехмерная модель сооружения.

Важный вопрос при проведении обследования конструкций, совмещённых с грунтовой средой, при помощи георадара – подбор параметров зондирования, к которым относятся рабочая частота и тип антенного блока. Осложняющими факторами при выполнении георадарного зондирования на площадках возведения ответственных сооружений, в частности таких, как строящаяся Витебская ГЭС, являются стеснённые условия и возникающие помехи. Появление помех связано с наличием вблизи исследуемых конструкций арматуры, металлической опалубки, строительной техники, то есть всего того, что связано с выполняющимися непрерывно общестроительными работами.

### **Контроль качества цементно-грунтовой (грунтобетонной) противофильтрационной завесы Витебской ГЭС, выполненной с применением струйной технологии**

Витебская ГЭС – строящаяся гидроэлектростанция на реке Западная Двина вблизи города Витебска. После завершения строительства эта ГЭС будет крупнейшей в Беларуси.

Витебская ГЭС представляет собой типичную русловую низконапорную гидроэлектростанцию, включающую в себя бетонную водосбросную плотину, грунтовую плотину, здание ГЭС, однокамерный однониточный судовой шлюз, распределительное устройство. Проектная мощность строящейся Витебской ГЭС – 40 МВт, среднегодовая выработка – 38 млн. кВт·ч. В здании ГЭС должны быть установлены четыре горизонтальных капсульных гидроагрегата (диаметр рабочего колеса 3,95 м), мощностью по 10 МВт каждый. Подпорные сооружения ГЭС образуют водохранилище площадью 8,82 км<sup>2</sup> и объёмом 4,1 млн. м<sup>3</sup>, максимальной шириной 420 и максимальной глубиной 14 м.

Согласно проекту наряду с возведением основных сооружений ГЭС необходимо устройство так называемых конструкций, совмещённых с грунтовой средой – противофильтрационных стенок из цементно-грунта. На ГЭС противофильтрационные стенки выполнены по струйной технологии, сущность которой заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и

одновременного перемешивании грунта с цементным раствором в режиме «mix-in-place» (перемешивание на месте). После твердения раствора образуется новый материал – грунтобетон (цементогрунт), обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками [4]. Согласно проекту высота стенок на Витебской ГЭС составляет 10...12,5 м.

В данной исследовательской работе ставилась **задача** оценить применимость георадиолокации как составной части комплексной методики определения технического состояния и контроля качества выполнения работ по устройству заглубленной противофильтрационной стенки. На первом этапе планировалось выполнить зондирование по верху стенки для поиска возможных скрытых дефектов (сквозных отверстий, пропущенных участков природного грунта в толще стены, выделение участков с отличной от остальной стены волновой картиной). Необходимо было также оценить пригодность для этого антенн различного типа и частотного диапазона, подобрать оптимальные параметры зондирования. На втором этапе планировалось отобрать пробы (керны) из тела стенки в наиболее интересных с точки зрения интерпретации результатов георадарного зондирования местах.

Обследование технического состояния велось по комплексной методике, включающей метод неразрушающего контроля (георадиолокацию) и традиционный прямой метод исследования – отбор кернов из тела противофильтрационной стенки в отдельных точках.

**Георадиолокационное зондирование.** Георадиолокационное зондирование нашло широкое применение в различных областях науки и техники, связанных с изучением верхних слоев литосферы. Области применения георадара и основные принципы его работы достаточно подробно освещены в технической литературе [5; 6].

При исследовании сплошности подземных конструкций основное внимание уделялось обнаружению границ раздела между средами с различными значениями диэлектрической проницаемости (участками грунтоцемента различной плотности, материалом стены и пустотами, стеной и грунтами природного сложения и т.д.). Учитывая, что при распространении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона граница сред с различными электрофизическими свойствами служит своего рода отражающей поверхностью, что фиксируется приёмником устройства в виде всплеска амплитуды возвращенного сигнала, можно сделать вывод: чем больше разница в электрофизических характеристиках, тем лучше отображается граница раздела между ними.

Результаты георадарного зондирования записываются в виде профилей, состоящих из совокупности отдельных трасс. Трасса – один акт посылки-приёма зондирующего сигнала (физическое измерение). На профиле границы раздела сред отображаются почти в том виде, в каком они есть на самом деле [7].

Важнейшим фактором, влияющим на получение максимально информативного профиля, являются параметры зондирования. К таким параметрам относятся рабочая частота, тип антенного блока, временной интервал зондирования (глубинность исследования), шаг трасс в профиле и т.д.

Низкочастотные антенны (с рабочей частотой до 100 МГц) позволяют получать информацию с больших глубин, но имеют довольно низкую разрешающую способность (порядка метра для антенн с частотой 25 МГц и от 0,5 до 0,1 м для антенн с частотой 100 МГц), что связано с большой длиной волны зондирующего сигнала. Глубинность исследования при этом достигает 25...35 м. В то же время со снижением частоты увеличивается зона начальной нечувствительности (так называемая мертвая зона) георадара. При повышении частоты зондирования разрешающая способность возрастает (4...10 см для антенн с частотой 500 МГц), но при этом увеличивается затухание электромагнитной волны в среде, а значит и уменьшается глубина зондирования до 3...6 м.

Антенны могут быть экранированными и неэкранированными. Неэкранированные предназначены для работы на больших глубинах, их конструкция позволяет разнести приёмник и передатчик при работе методом общей глубинной точки для получения электрофизических характеристик исследуемых сред, но очень чувствительны к помехам. В конструкции экранированных антенн для минимизации помех применён поглощающий экран, что позволяет работать в условиях городской застройки.

Так как на начальном этапе скорость распространения сигнала в исследуемой среде неизвестна, запись результатов зондирования ведётся в глубинном формате, то есть фиксируется амплитуда отражённого сигнала и время его двойного пробега. Глубинность исследования зависит от предполагаемого времени ожидания отклика зондирующего сигнала от нижней границы исследуемого объекта, так что временной интервал записи (развертка) превышает двойное время пробега до самого глубокого объекта исследований. Основанием для выбора интервала записи служат сведения о глубинах и предполагаемые значения скоростей распространения электромагнитных волн в среде.

Так как предполагалось исследование конструкции со значительной глубиной залегания нижнего края (около 12 м), были выбраны три антенных блока с различающимися характеристиками – неэкранированный с частотой 100 МГц и экранированные с частотами 100 и 250 МГц. Каждая из этих антенн имеет схожие сферы применения.

Неэкранированная антенна с рабочей частотой 100 МГц – универсальная антенна с хорошей глубиной зондирования и достаточной разрешающей способностью. Сферы применения очень обширны – ис-

пользуется для исследования заглубленных объектов, инженерной геологии, картирования дна рек и водоемов, обнаружения захоронений отходов, карстовых полостей и глубоко заложённых трубопроводов и т.д.

Экранированная антенна с рабочей частотой 250 МГц – универсальная, со средней глубинностью и средней разрешающей способностью. Обычно используется для обследования подземных конструкций, обнаружения коммуникаций, подземных резервуаров и пустот и т.д.

Экранированная антенна с рабочей частотой 100 МГц – самая низкочастотная серийно выпускаемая экранированная антенна. Обладает средней разрешающей способностью. Подходит для решения широкого спектра инженерных, инженерно-геологических, гидрогеологических и других задач.

Полученные георадаром профили были обработаны на компьютере с помощью программы RadExplorer разработанной «ДЕКО-Геофизика». Эта программа позволила обработать полученные данные и с помощью различных встроенных инструментов получить качественную картину строения стенки как в плане, так и по глубине.

Интерпретация результатов георадарного зондирования проводилась в четыре этапа. На первом этапе устанавливалось, все ли выделяемые оси синфазности отраженных волн на радарограммах являются полезными отражениями, связанными с реальными отражающими границами в разрезе. На втором проводилось выделение основных элементов разреза, которые получили название георадарных комплексов. Третий этап заключался в детальном анализе волновой картины внутри выделенных георадарных комплексов, то есть выделялись и анализировались так называемые георадарные фации. На заключительном, четвертом, этапе производилось построение глубинного разреза, на котором отображены особенности строения исследуемой противифльтрационной стены.

**Результаты георадиолокационного зондирования.** Исследуемая стенка располагалась в котловане строящейся Витебской ГЭС (рис. 1). На момент проведения работ были частично возведены бетонные стенки отдельных блоков ГЭС.

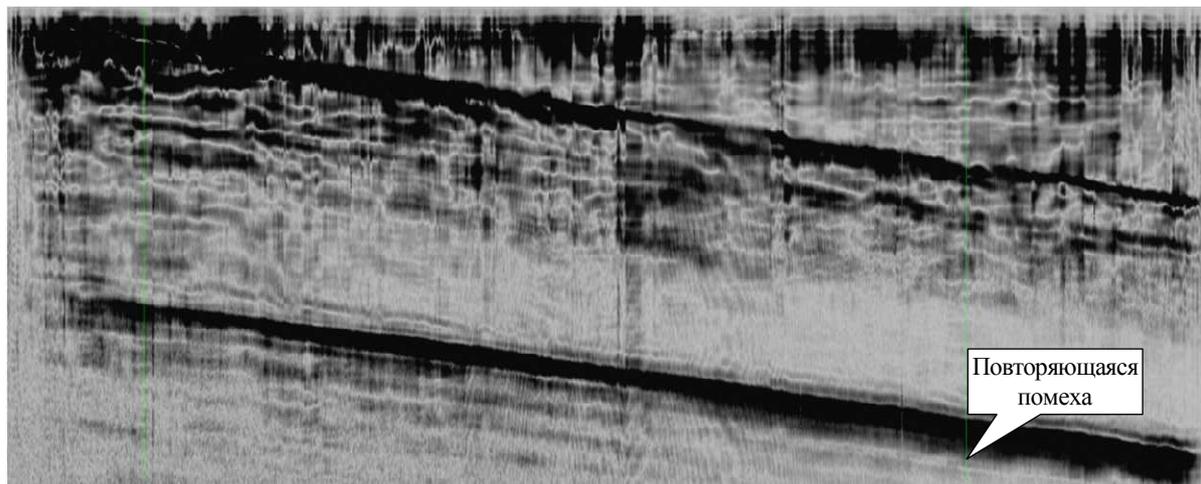


Рисунок 1 – Противофильтрационная стенка и прилегающая территория

Проведение работ осложнялось тем, что для выполнения зондирования антенна должна была перемещаться по верху стенки. Так как верхний край стенки неровный, для антенн были устроены деревянные подмости (см. рис. 1). Кроме того, вдоль направления профиля располагался откос, который был источником постоянной помехи, хорошо видной на всех профилях. Источниками помех являлись также металло-

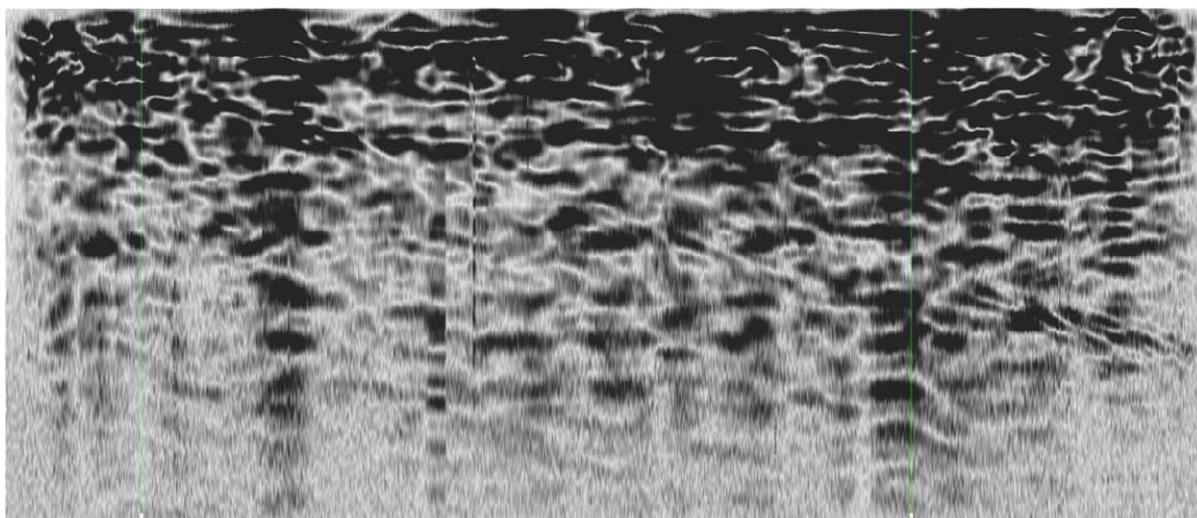
конструкции опалубки, арматурные каркасы вблизи стенки и участки уже возведённых железобетонных стен. Первой использовалась незранированная антенна с частотой 100 МГц. Но именно чувствительность этой антенны к внешним помехам не позволила получить качественный профиль.

На рисунке 2 показан профиль после обработки. Мощные сигналы помех от откосов котлована отобразились повторяющимися параллельными наклонными полосами чёрного цвета, и из-за их мощности объём полезной информации на профиле мал. Удалось выделить только отдельные скважины, показанные на профиле вертикальными полосами.



**Рисунок 2 – Профиль незранированной антенны с частотой 100 МГц**

Экранированная антенна с частотой 250 МГц показала себя лучше, на профиле уже можно выделить отдельные зоны с одинаковой волновой картиной, отображающей распределение участков с аналогичными характеристиками (рис. 3).



**Рисунок 3 – Профиль экранированной антенны с частотой 250 МГц**

Но самый информативный профиль получен с помощью экранированной антенны 100 МГц. На профиле после обработки на некоторых участках чётко видны отдельные скважины, сделанные при устройстве стены (рис. 4). Также уверенно можно выделить в теле стенки зоны, волновая картина которых отличается от общей. Эти зоны показаны на профиле в виде областей сплошной чёрной заливки или с чередованием контрастных чёрных и серых линий. При обработке данных зондирования в программе RadExplorer выявлено, что сигнал в таких областях слабо затухал с глубиной.

По результатам зондирования установлено, что скважины при устройстве противодиффузионной стены выполнялись с шагом 200 мм (отдельные скважины видны по всему профилю, полученному для экранированной антенны с рабочей частотой 100 МГц).

Анализ волновой картины показал, что структура стены в целом однородна. Существенных неоднородностей, полостей значительных размеров не обнаружено. На профиле отмечены аномальные области со сплошным чёрным фоном с редкими горизонтальными серыми полосами (либо без них), сигнал в которых практически не затухает.

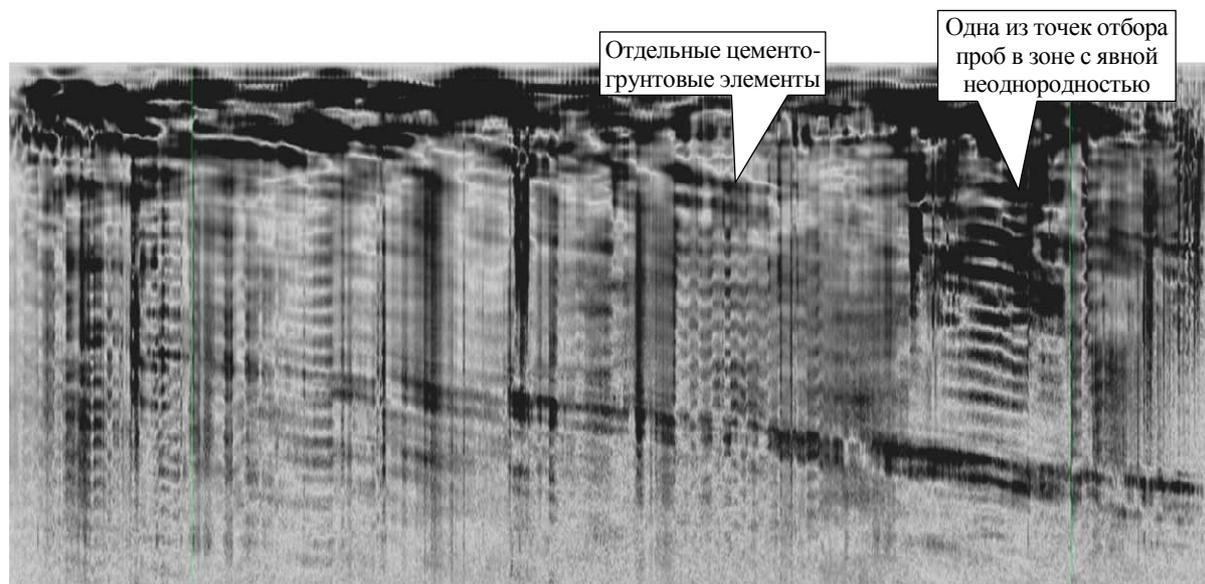


Рисунок 4 – Георадарный профиль экранированной антенны с частотой 100 МГц

Полученный георадарный профиль представляет собой реальную непрерывную картину строения противofiltrационной стенки как в плане, так и по глубине и комплексно отображает распределение зон с одинаковыми свойствами.

**Результаты второго этапа исследования.** На основе результатов анализа волновой картины были намечены места для отбора образцов с целью их дальнейшего визуального и лабораторного исследования в местах наиболее явных неоднородностей. После отбора кернов из тела стенки в местах с наиболее интенсивной на профиле чёрной заливкой выяснилось, что материал стены состоит из однородного цементного камня практически без посторонних примесей (рис. 5).



Рисунок 5 – Керны, отобранные из тела стенки

Сравнение радарограмм с результатами инженерно-геологических изысканий показало, что в местах с тёмной заливкой на профиле стенка проходит через песчаные грунты.

По результатам исследований можно сделать следующие **выводы**:

- георадарное зондирование применимо в качестве метода оперативного контроля качества выполненных работ при устройстве монолитных и цементогрунтовых подземных конструкций;
- наиболее информативный профиль с достаточной для данных целей разрешающей способностью и глубиной исследования получен при применении экранированной антенны с рабочей частотой 100 МГц;
- применение неэкранированных антенных блоков при проведении исследований на строительной площадке нецелесообразно из-за сильных помех, которые вносят существенные искажения в принимаемый сигнал;
- анализ волновой картины показывает, что структура противодиффузионной стены в целом однородна. Существенных неоднородностей, полостей значительных размеров не обнаружено;
- полученный георадарный профиль представляет собой реальную непрерывную картину строения противодиффузионной стенки как в плане, так и по глубине и комплексно отображает распределение зон с одинаковыми свойствами;
- результаты георадарного зондирования позволили существенно сократить количество точек отбора кернов для визуального и лабораторного исследования. Отбор кернов производился лишь в точках с наибольшей концентрацией неоднородностей строения, что позволило более оперативно и с меньшими затратами оценить техническое состояние подземной конструкции.

Таким образом, георадиолокация – это метод, который при небольших затратах труда и времени позволяет оперативно оценить состояние и сплошность конструкций, качество выполняемых работ, строение основания т.д. Применение георадарного метода для решения различных инженерных задач в настоящее время приобретает все более широкие масштабы. Это объясняется простотой и удобством проведения полевых работ и высокой производительностью метода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Изюмов, С.В. Теория и методы георадиолокации: учеб. пособие / С.В. Изюмов, С.В. Дручинин, А.С. Вознесенский. – М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2008. – 196 с.
2. Кремнёв, А.П. Георадарное зондирование при обследовании грунтовых насыпей / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVIII междунар. науч.-метод. семинара: в 2-х т. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. II. – С. 260–265.
3. Кремнёв, А.П. Практическое применение георадарного зондирования в инженерно-геологической практике / А.П. Кремнёв, А.Н. Поляков // Геотехника Беларуси: наука и практика: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. – Минск: БНТУ, 2013. – Т. I. – С. 129–134.
4. Малинин, А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. – Пермь: Пресстайм, 2007. – 168 с.
5. Владов, М.Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 90 с.
6. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию: учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
7. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие / А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.

Поступила 03.11.2015

#### **GPR QUALITY CONTROL METHODS FOR THE CEMENT-SOIL AND CAST IN SITE UNDERGROUND STRUCTURES**

**A. KREMNIU, A. PALIAKOU, K. HUSIANOK, T. MIRZAYEU**

*This article describes the non-destructive GPR quality control method of a various types of underground structures and foundation elements. The article describes an examples of the successful GPR application to detect voids, cavities, weak layers in the cement-ground structures made using jet-grouted technology, as well as in the manufacture of bored piles. On an example of Vitebsk hydroelectric station watertight wall in touched upon issues of optimizing use of traditional destructive methods of control based on the GPR data.*