

ПОИСК КОНСТРУКТИВНЫХ ПУСТОТ В СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

DETECTION OF VOIDS IN ENGINEERING STRUCTURES USING GPR METHOD

СУДАКОВА М. С.

Научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва; научный сотрудник лаборатории комплексных методов изучения криогенных геосистем Института криосферы Земли СО РАН, к. ф.-м. н., г. Тюмень, m.s.sudakova@yandex.ru

КАЛАШНИКОВ А. Ю.

Младший научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, г. Москва, x_kalash@mail.ru

ВЛАДОВ М. Л.

Заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, д. ф.-м. н., профессор, г. Москва, vladov@geol.msu.ru

ТЕРЕНТЬЕВА Е. Б.

Старший преподаватель кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, к. ф.-м. н., г. Москва, genia_teren@mail.ru

МАРЧЕНКО А. Л.

Научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, к. ф.-м. н., г. Москва, antonmarchenko@mail.ru

САДУРТДИНОВ М. Р.

Директор Института криосферы Земли СО РАН, к. т. н., г. Тюмень, mr_sadurtdinov@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Неразрушающий контроль; георадар; электромагнитные исследования; томография; трехмерная визуализация.

АННОТАЦИЯ

В статье приведены примеры использования георадиолокации при поиске конструктивных пустот в стенах, под бетонной плитой основания и в двух колоннах. Для решения задач использовались разные методики получения и обработки данных: профилирование с совмещенным источником и приемником, «псевдо-3D» и георадарная томография. Выбор методики определялся поставленной задачей, конструкцией исследуемых объектов и наличием априорной информации об их строении. Обнаруженные с помощью георадиолокации пустоты в стенах, плитах и колоннах подтверждены вскрытыми участками либо технической документацией. Результаты исследований позволили сделать вывод о том, что метод георадиолокации необходимо использовать при реконструкции и ремонте сооружений для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных и гражданских объектов.

SUDAKOVA M. S.

Senior researcher of the Department of Seismology and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow; senior researcher of the Department of Complex methods of research of cryologic systems, Earth Cryosphere Institute SB RAS, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Tyumen, m.s.sudakova@yandex.ru

KALASHNIKOV A. YU.

Junior senior researcher of the Department of Seismology and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, x_kalash@mail.ru

VLADOV M. L.

Head of the Department of Seismology and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, DSc (Doctor of Science in Physics and Mathematics), professor, Moscow, vladov@geol.msu.ru

TERENTIEVA E. B.

Senior teacher of the Department of Seismology and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, genia_teren@mail.ru

MARCHENKO A. L.

Senior researcher associate of the Department of Seismology and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Physics and Mathematics), Moscow, antonmarchenko@mail.ru

SADURTDINOV M. R.

Director of the Earth cryosphere Institute SB RAS, PhD (Candidate of Science in Technics), Tyumen, mr_sadurtdinov@mail.ru

KEY WORDS

Non-destructive testing; GPR; electromagnetic investigations; tomography; 3D visualization.

ABSTRACT

The paper presents examples of constructional voids detection in walls, under a base plate concrete and in two columns using Ground Penetrating Radar (GPR) method. Different methods were used for acquisition and data processing: single-fold antenna geometry, "pseudo-3D" and GPR tomography. The selection of methods was governed by the problem assigned, the construction of the objects under study and availability of prior information on internal structure. The voids detected by GPR method in walls, base mats and columns were proved either by exposed portions of an object or by engineering documentation. The results of the investigation allowed drawing a conclusion about benefits of the GPR method as part of rebuilding and maintenance operations of industrial and accommodation facilities aimed at accident prevention.

Введение

Несущая способность строительных конструкций зависит от различных дефектов внутренней структуры, таких как трещины, инородные включения, пустоты. Это могут быть пустоты различного размера и происхождения, например полости, предусмотренные конструкцией: воздуховоды и прочее, или пустоты, появившиеся вследствие нарушения целостности конструкций и свидетельствующие об аварийном состоянии. Неразрушающие методы являются основными и во многих случаях единственными возможными средствами исследования зданий и инженерных конструкций, таких как колонны или опоры зданий и мостов.

Георадиолокация является одним из методов неразрушающего контроля состояния зданий и сооружений [2]. Метод зарекомендовал себя как относительно быстрый, эффективный и наименее трудоемкий при определении внутренней структуры стен, потолков, перекрытий и прочих конструкций [5, 9, 11]. Высокая разрешающая способность георадиолокации позволяет хорошо определять внутреннюю структуру конструкций и выявлять аномальные зоны, связанные с увлажнением и трещиноватостью [9, 10].

Цель данной статьи — показать возможности георадиолокации при поиске конструктивных пустот, **линейные размеры которых равны первым десяткам сантиметров**: воздуховодов, элементов канализации и водостока, пустот, облегчающих конструкцию, и т.д. От наличия и положения этих элементов, в частности, зависит несущая способность всей конструкции, при этом зачастую их положение неизвестно вследствие того, что конструктивный план утерян или здание претерпело частичную или полную перестройку в прошлом.

Самая популярная модификация георадиолокации — с совмещенным источником и приемником — является самой экономичной, менее трудоемкой и, как следствие, самой используемой [4]. Однако интерпретация получаемых данных во многих случаях является неоднозначной, а информация о внутреннем строении исследуемой среды, в большинстве случаев качественная. Конструктивные пустоты выделяются по наличию высокоамплитудного отражения, которое может быть результатом внутреннего дефекта или неоднородностью конструкции [2, 12]. Для точной идентификации пустоты и определения ее параметров необходима дополнительная информация, например, о ее типе, вероятных размерах и положении в пространстве.

Для точной идентификации и определения положения конструктивной пустоты в плане необходимо выявить ее на нескольких георадиолокационных профилях. Если сеть таких профилей достаточно частая (методика «псевдо-3D»), то возможно уверенно определить положение аномального объекта в пространстве на временных срезах, полученных как результат интерполяции значений амплитуд отражений между профилями. При работе по методике «псевдо-3D» площадь исследования покрывается сетью близко расположенных (как правило, от 0,1 до 0,5 м) параллельных геора-

дарных профилей. Плотная сеть профилей необходима для правильного отображения геометрии и размера различных особенностей разреза и уменьшения неоднозначности и вероятности появления артефактов, связанных с некорректной интерполяцией [6]. При обработке данные двумерных георадарограмм собираются в 3D-изображение (куб данных). После необходимой интерполяции из этого куба могут быть извлечены двумерные профили в любом направлении, а также «срезы» в горизонтальной плоскости XY, соответствующие определенному времени или глубине. Объекты искусственного происхождения на срезах в горизонтальной плоскости будут выделяться как амплитудные аномалии простой геометрической формы, в отличие от пустот или зон трещиноватости естественного происхождения [7].

Проведение измерений с разными расстояниями между источником и приемником, в частности георадиолокационная томография, позволяет избавиться от неоднозначности интерпретации. Результат томографии — количественный: скорости распространения электромагнитных волн. По их значениям можно не только выявить так называемые «аномальные зоны», но и определить влажность слоев конструкции и объем пустот. Сложность методики приводит к уменьшению производительности съемки, при этом увеличивается точность определения как свойств, так и размеров аномалий. Основным ограничением применения георадиолокационной томографии является необходимость доступа к нескольким сторонам исследуемого объекта [14].

В статье приведены примеры использования георадиолокации при поиске конструктивных пустот в стенах, под бетонной плитой основания и в двух колоннах. Для решения задачи использовались разные методики получения и обработки данных. Выбор методики определялся поставленной задачей, конструкцией исследуемых объектов и наличием априорной информации об их строении.

Обнаруженные с помощью георадиолокации пустоты в стенах, плитах и колоннах подтверждены вскрытыми участками на продолжении воздуховодов в стенах, технологических каналов под плитами при поисковых работах либо технической документацией при опытно-методических работах на колоннах.

Результаты томографии, которые приводятся в статье, также опубликованы в работе [3], посвященной методическим вопросам георадарной томографии, выделению полезных волн и решению прямых задач поиска воздушных аномалий.

Объекты и методика исследований

Поиск конструктивных пустот с помощью георадиолокации рассматривается на примере решения трех разных задач.

Поиск воздуховодов в стенах здания постройки начала XX века (станция Датско-шведско-русского телефонного общества в Москве), подлежащего последующей реконструкции (рис. 1). Целью георадиолокационных работ был поиск воздуховодов в стенах разной толщины из различных материалов (бетон, кирпич). Было известно, что воздуховоды располага-



Рис. 1. Объект исследования. Станция Датско-шведско-русского телефонного общества в Москве (фото интернет-портала mosday.ru)

лись внутри стен строго вертикально. При наличии достаточного количества априорной информации для обнаружения и идентификации конструктивных пустот бывает достаточно одного или двух пересекающих эти пустоты профилей. Для точной идентификации воздухопроводов на каждом из участков исследования делалось два профиля, параллельных полу, на высоте около 70 см и 1,7–2 м. При такой методике на радараграммах, полученных на одной стене, на одинаковых координатах должны были выделяться идентичные высокоамплитудные отражения, соответствующие воздушным полостям.

Поиск пустот под плитой основания здания типологии, в которой должен был быть поставлен новый, более тяжелый, печатный станок. Георадиолокационное исследование проводилось с целью поиска пустот непосредственно под плитой, конструктивных или связанных с просадкой грунта, для последующего расчета несущей способности плиты и планирования мер по ее увеличению, если требуется. При этом никакой априорной информации о том, что находится под плитой, не было. Поэтому было принято решение равномерно покрыть всю необходимую площадь сетью продольных и поперечных профилей с расстоянием между ними 50 см для выявления и определения положения в плане аномальных объектов, в том числе пустот. Георадиолокационные исследования проводились по методике «псевдо-3D», что позволило получить высокую детальность наблюдений.

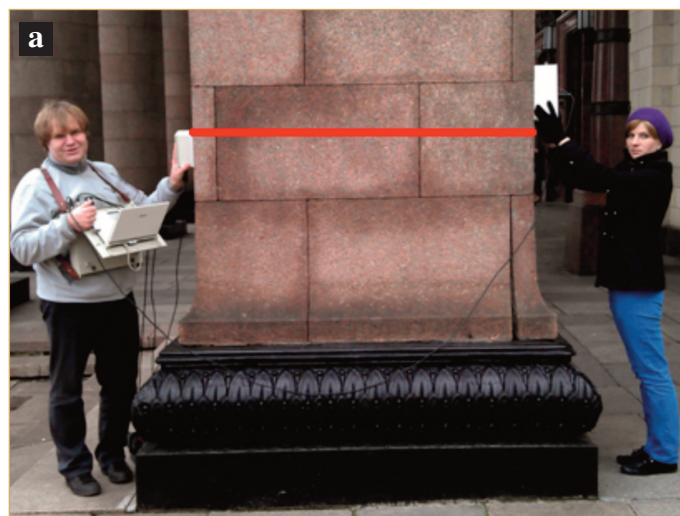


Рис. 2. Объекты исследования. Колонны главного здания МГУ им. М. В. Ломоносова: квадратная (а). круглая (постамент фонаря) (б). Красной линией показана проекция плоскости просвечивания

Поиск пустот в колоннах комплекса главного здания МГУ им. М. В. Ломоносова. Фото колонн приведены на рис. 2. Данные исследования были выполнены с целью опробования и разработки методики георадиолокационной томографии на объектах известного строения [3]. Здесь стояли задачи не только поиска и определения размеров воздушных полостей, но и измерения скорости электромагнитных волн в твердой части колонн.

Согласно сведениям, представленным инженерной службой МГУ им. М. В. Ломоносова, обе колонны главного входа

имеют симметричное строение. Под гранитной облицовкой квадратной колонны находятся несколько слоев бетона различной прочности, возможно с металлическими армирующими конструкциями. Сечение колонны в горизонтальной плоскости — квадрат со сторонами 1,5 м, по центру которого квадратная пустота со сторонами по 70 см. Таким образом, толщина гранитно-бетонного слоя около 40 см со всех сторон. Радиус круглой колонны (постамент фонаря) — около 70 см, она состоит из восьми гранитных блоков и имеет конструктивную полость по центру диаметром 30 см, с железными стенками (фонарный столб). Их схематичное строение в горизонтальной плоскости вместе с расположением источников и приемников показано на рис. 3. Серым цветом показана гранитно-бетонная часть, белым — пустота, черным цветом — железные стенки.

Ввиду того что железо играет роль абсолютного отражателя [4], волны не будут распространяться в пустоте в случае наличия железных стенок (круглая колонна). В результате получаемая при расчете скорость будет иметь или аномально низкие значения, или не изменится по сравнению с начальной моделью. Тогда как в квадратной колонне с пустотой без железных стенок в области пустоты должны получиться высокие значения скоростей (скорость в воздухе — 30 см/нс).

При томографическом просвечивании пункты излучения и приема располагаются на разных сторонах исследуемого объекта так, чтобы волны проходили сквозь него. В данном случае пункты излучения располагались с интервалом 10 см по половине периметра колонн, а приемная антенна перемещалась в режиме непрерывной съемки по всему периметру колонн, что обеспечивало полное лучевое покрытие колонн во всех направлениях.

Разбивка и привязка профилей во всех случаях осуществлялась с помощью рулетки, привязка точек наблюдения (георадарных трасс) осуществлялась с помощью одометра. Детальность наблюдений, то есть распределение точек регистрации электромагнитных волн по профилю, составила порядка 1–2 см.

Аппаратура

При исследовании строительных конструкций толщина стен, перекрытий и прочих конструкций обычно не превышает 1 м, а требуемая разрешающая способность исследования составляет первые сантиметры, поэтому здесь используются самые высокочастотные антенны георадаров с центральной частотой в воздухе 1–3 ГГц.

При проведении описываемых работ были использованы георадар «Око-2» (ООО «Логис-Геотех», г. Москва, Россия) с антенной, центральная частота в воздухе которой равна 1700 МГц (поиск воздуховодов), и георадар «Зонд-12е» (ООО «Radar Inc.», г. Рига, Республика Латвия) с антенной 1500 МГц для поиска пустот под бетонной плитой в типографии.

Для проведения томографического просвечивания колонн также был использован георадар «Зонд-12е» с двумя антен-

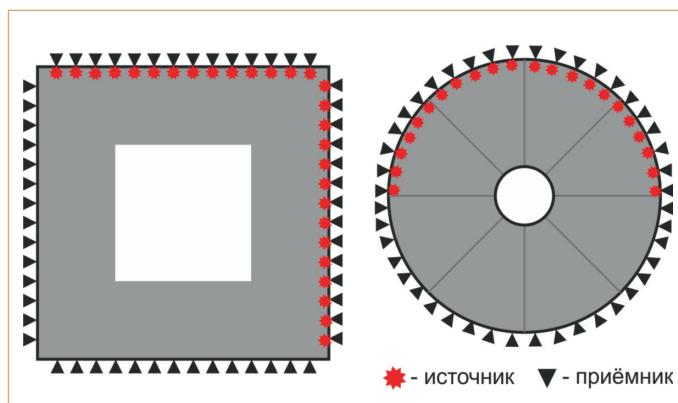


Рис. 3. Расположение источников и приемников на колоннах в горизонтальной плоскости

нами 2 ГГц. Георадар работал в двухканальном режиме, одна антенна использовалась как излучающая, другая как приемная (см. рис. 2).

Обработка данных

Для обработки данных профилирования использовались специализированные программы. Данные, полученные с помощью георадара «Око-2», обрабатывались в программе «Geoscan», разработка «Логис-Геотех». Данные, полученные с помощью георадара «Зонд-12е», обрабатывались в программе «Radexplorer», «Деко-Геофизика». Граф обработки данных состоял из следующих процедур: ввод данных, пространственная интерполяция, коррекция времени начала записи, удаление звона антенны, полосовая фильтрация, амплитудная коррекция, двумерная фильтрация. Для определения глубины отражающих объектов на радарограммах была использована скорость, найденная по гиперболам дифракции. Более подробное описание данных процедур приведено в работах [1, 7].

Интерполяция между профилями, полученными на втором объекте (типография), по методике «псевдо-3D» и построение куба данных было выполнено в программе «RadexPro» «Деко-Геофизика». Также в этой программе проводилась пикировка времен вступлений прямых волн, прошедших через колонны, которые были использованы для томографического обращения.

Для пересчета времен вступлений прямых волн в скорости использовалась программа «GeoTomCG» (GeoTom, LLC). Основные принципы и алгоритмы расчетов изложены в статье [13]. Программа подразумевает расчет по регулярной сетке с использованием прямоугольных ячеек. Начальная модель задавалась с постоянной скоростью 17 см/нс в случае квадратной колонны и 12 см/нс в случае круглой колонны. Скорость рассчитывалась как среднее арифметическое из скоростей, полученных путем деления расстояния между источником и приемником (длины прямого луча) на время первого вступления. Размер ячейки сетки, по которой считалось томографическое обращение, был 5x5 см в обоих случаях. Скоростной разрез для квадратной колонны

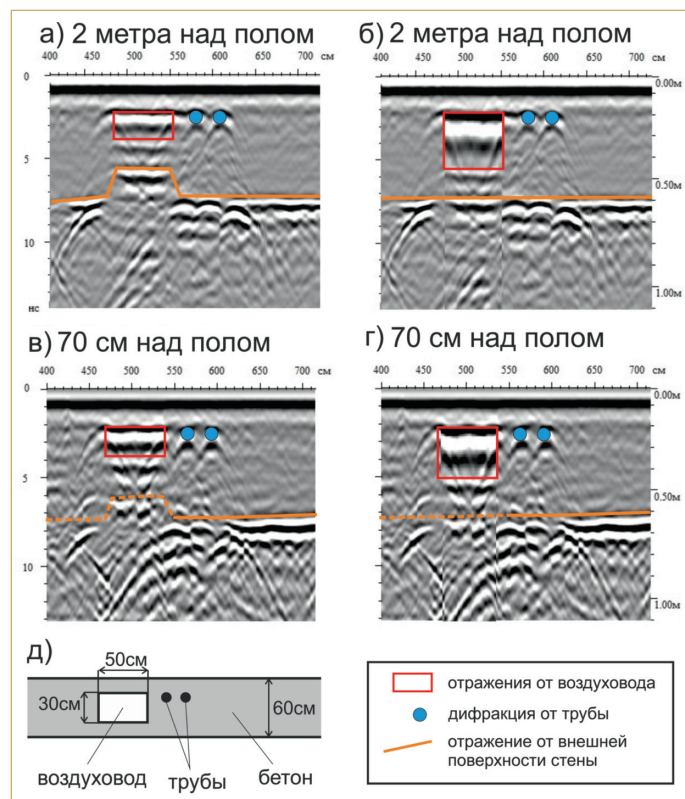


Рис. 4. Фрагменты радарограмм (а, в), полученных в здании Станции Датско-шведско-русского Телефонного Общества; соответствующие глубинные разрезы (б, г); схема разреза конструкции (д)

считался более чем по 2500 независимым лучам, для круглой — по 1500.

Результаты

Поиск воздуховодов в стенах здания

На рис. 4, а, в представлены фрагменты радарограмм по профилям, полученным на одной стене на разных высотах (2 м и 70 см), после обработки и интерпретации. Радарограммы, полученные на разных высотах, практически идентичны. Данные, соответствующие высоте 70 см (см. рис. 4, в, г), хуже по качеству, чем данные, полученные выше (см. рис. 4, а, б). Это, возможно, связано с тем, что оператору физически было сложно ровно двигать антенну на высоте 70 см.

На обеих радарограммах отчетливо выделяются высокоамплитудные отражения, соответствующие верхней и нижней границам воздуховода (показан красной рамкой). За воздуховодом, на более позднем времени, находится отражение от внешней поверхности стены (показано оранжевым цветом). При этом непосредственно под воздуховодом отмечается уменьшение времени прихода этого отражения, что связано со скоростной аномалией: скорость в стене равна 16 см/нс, в воздухе — 30 см/нс. Соответственно, путь электромагнитной волны только внутри стены занимает больше времени, чем если внутри стены находится пустота. Разница времен прихода между отражением от верха воздуховода

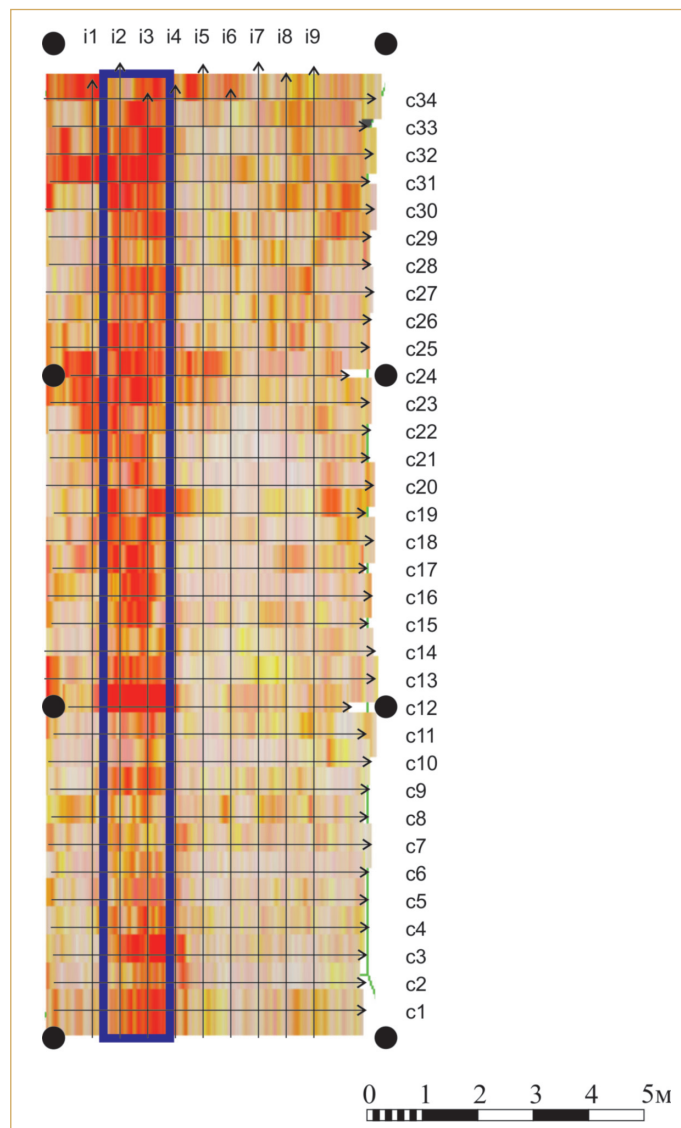


Рис. 5. Поиск пустот под плитой основания. Срез на времени, соответствующем глубине около 30 см. Синей рамкой показана область повышенных амплитуд, соответствующая линейно-вытянутому объекту под железобетонной плитой — водостоку

и низа составляет 2 нс, что соответствует 30 см — глубине воздуховода. Справа от воздуховода на радарограммах выделяются гиперболы дифракции от локальных объектов, предположительно труб.

На рис. 4, б, г приведены глубинные разрезы, полученные после введения в радарограммы скоростного закона: в области, соответствующей пустоте, введена скорость 30 см/нс, в остальной части радарограммы — 16 см/нс. Положение отражений соответствует внутреннему строению стены, показанному на рис. 4, д.

Поиск пустот под плитой пола

Схема расположения профилей на участке исследования показана на рис. 5. Направление движения по профилям ука-

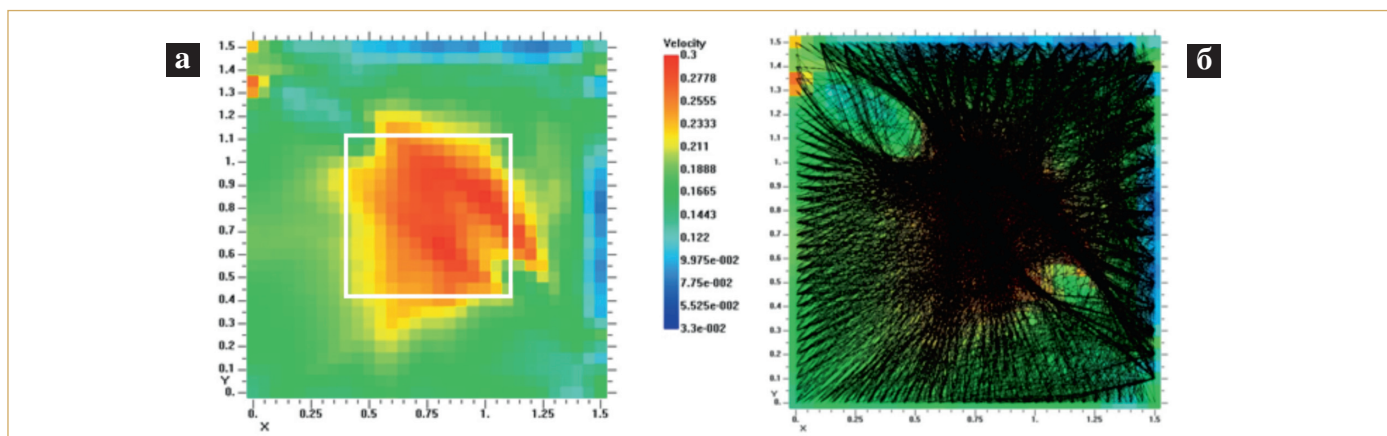


Рис. 6. Результат томографического обращения (а) и траектории распространения лучей (б) в квадратной колонне. Белой рамкой показана конструктивная пустота

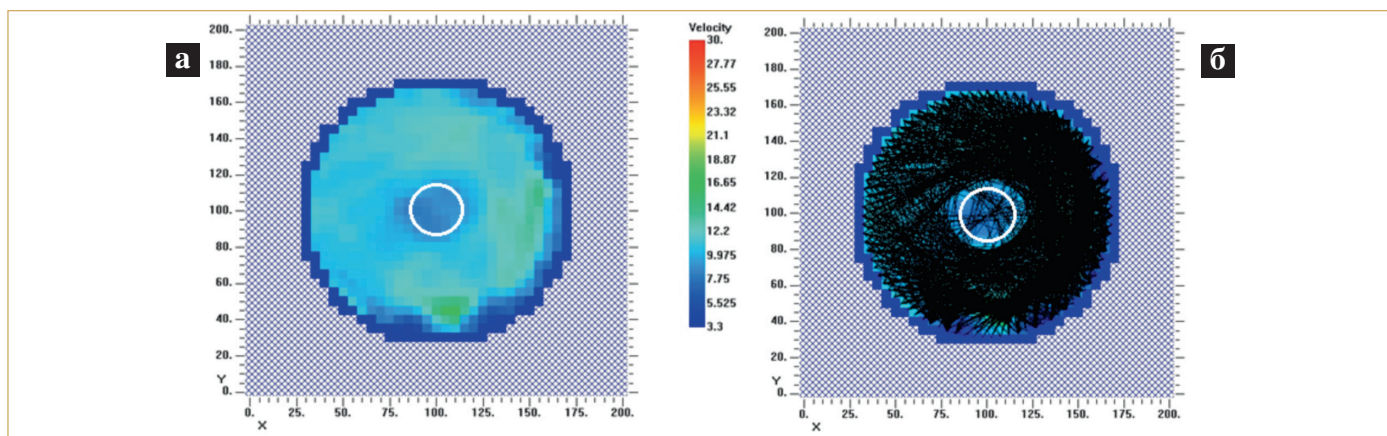


Рис. 7. Результат томографического обращения (а) и траектории распространения лучей (б) в круглой колонне. Белой рамкой показана конструктивная пустота

зано стрелками. Черными кружками показаны колонны, расстояние между которыми 6 м. По результатам георадиолокации было определено, что внутри плиты находятся 2 слоя армирования с шагом 20 см. Скорость в плите 10-12 см/нс, толщина плиты по данным георадиолокации на все площади исследования выдержанна и составляет около 30 см.

На всех поперечных и нескольких продольных профилях на времени около 5 нс, что примерно соответствует 30 см (нижняя граница бетонной плиты), был выделен объект шириной около 1-1,3 м с плоской верхней кромкой. С учетом допущения постоянной скорости около 12 см/нс, что соответствует ситуации на участке работ, времена могут быть пересчитаны в глубины. На рис. 5 представлен срез на времени, соответствующем глубине около 30 см (толщина плиты). Синей рамкой обведена область повышенных амплитуд — отражение от верхней кромки линейно-вытянутого объекта под железобетонной плитой. Этот объект был интерпретирован как водосток или как коллектор с трубами или с кабелями.

После вскрытия плиты аномальным объектом оказался водосток шириной 40 см. Ошибка в определении ширины водостока связана с неточной привязкой трасс по горизон-

тали и погрешностями в определении скорости в пределах 10%. В итоге методика «псевдо-3D» позволила обнаружить водосток под плитой и определить его положение в пространстве.

Поиск пустот в колоннах

Полученные скоростные разрезы и траектории лучей показаны на рис. 6 и 7. Белыми рамками показаны известные границы пустот. В центре скоростного разреза квадратной колонны отчетливо выделяется высокоскоростная аномалия со скоростями 25-30 см/нс, которая может быть проинтерпретирована как воздушная полость. Появление этой аномалии свидетельствует о том, что задача обнаружения воздушной полости решается уверенно. На границе твердая часть/воздух скорость составляет 20 см/нс и внутри почти всей твердой части равна полученной ранее — 15 см/нс.

Как и ожидалось, средняя скорость в пустоте с железными стенками (круглая колонна, см. рис. 7) отличается от скорости в твердой части всего на 3 см/нс. Однако лучевое покрытие гранитной части и пустоты отличается принципиально: полость пересекает менее 10% лучей, являющихся резуль-

Результаты томографического обращения				
	Квадратная колонна		Круглая колонна	
	Значение	Погрешность абсолютная (относительная)	Значение	Погрешность абсолютная (относительная)
Скорость в твердой части	15,5 см/нс	0,5 см/нс (3,3%)	11 см/нс	2 см/нс (15%)
Скорость в воздушной полости	25 см/нс и выше	От 0 до 5 см/нс (от 0 до 17%)	8 см/нс	21 см/нс (70%)
Размер воздушной полости	Площадь — 52 см ²	3 см (6%)	Радиус — 37 см	7 см (23%)

татом ошибки алгоритма расчета. По лучевому покрытию можно оконтурить область круглой формы с минимальным количеством лучей: радиус этой области равен 37 см. Скорость в твердой части меняется от 9 до 16 см/нс, средняя скорость — 11 см/нс, что соответствует скорости в бетоне и на 2 см/нс меньше определенных ранее 13 см/нс.

Результаты георадиолокационной томографии с абсолютными и относительными ошибками определения приведены в таблице.

В случае квадратной колонны все задачи, кроме точного определения формы, были решены успешно — ошибки в определении скорости в твердой части и площади пустоты не превышают 6%, максимальная ошибка в определении скорости в воздухе — 5 см/нс (17%).

В случае круглой колонны, как и ожидалось, скорость в пустоте не была определена верно из-за железных стенок, наличие которых увеличивает длину лучей, а следовательно, уменьшает получаемую скорость. При этом по анализу лучевого покрытия была выделена аномалия, форма и положение которой точно соответствуют конструктивной пустоте, а радиус отличается в большую сторону на 7 см (23%). Скорость в граните отличается от определенной ранее на 2 см/нс (15%).

Заключение

Приведенные исследования показали высокую эффективность георадиолокации для поиска, оконтуривания и определения размеров конструктивных пустот внутри строительных конструкций.

При наличии априорной информации о внутреннем строении сооружения для поиска конструктивных пустот целесообразно использовать методику с совмещенным источником и приемником. Такая методика является наименее трудоемкой и наиболее выгодной с экономической и производственной точек зрения.

В случае отсутствия информации о внутреннем строении конструкций необходимо использовать более сложные методики. Если есть доступ к одной стороне объекта исследования, тогда он покрывается частой сетью профилей для последующей интерполяции в горизонтальной плоскости. Такая интерполяция позволяет выделять особенности конструкции, в том числе пустоты, по характерной геометрической форме на горизонтальных срезах.

Наличие доступа к нескольким поверхностям исследуемого объекта позволяет использовать томографическое просвечивание. В данном варианте георадиолокации удастся полностью решить поставленную задачу и получить данные не только о наличии и размерах пустот, но и о физических свойствах исследуемого объекта. Получаемая с помощью георадиолокационной томографии информация является более достоверной, чем полученная при работе с совмещенными источником и приемником.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что метод георадиолокации необходимо использовать при реконструкции и ремонте сооружений для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных и гражданских объектов. 

Список литературы

1. Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. М.: Геос, 2017. 240 с.
2. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 191 с.
3. Судакова М. С., Калашиников А. Ю., Терентьева Е. Б. Исследование возможностей георадарной томографии для поиска воздушных полостей в инженерных конструкциях // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 50–59.
4. Annan A. P. Ground penetrating radar workshop notes. Ontario, Sensors & Software Inc, 2001. 192 p.
5. Barrile V. and Pucinotti R. Application of radar technology to reinforced concrete structures: A case study // NDT & E International. 2005. № 38(7). P. 596–604.
6. Grasmueck M., Weger R., Horstmeyer H. Three dimensional ground-penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution // Geology. 2004. № 32. P. 933–936.
7. Ground penetrating radar theory and applications (Edited by Harry M. Jol. Elsevier). 2009. 523 p.

8. *Hugenschmidt J.* Concrete bridge inspection with a mobile GPR system // *Construction and Building Materials*. 2002. № 16. P. 147–154.
9. *Hugenschmidt J., Loser R.* Detection of chlorides and moisture in concrete structures with Ground penetrating radar // *Materials and Structures*. 2008. № 41. P. 785–792.
10. *Maierhofer C. and Leipold S.* Radar investigation of masonry structures // *NDT & E International*. 2001. № 34(2). P. 139–147.
11. *Santos-Assunção S., Perez-Gracia V., Caselles O., Clapes J. and Salinas V.* Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies // *Remote Sensing*. 2014. № 6. P. 8220–8237.
12. *Starovoytov A. V., Romanova A. M., Kalashnikov A. Yu.* GPR study of depressed areas in the upper cross-section. EAGE Near Surface. Manchester, UK. 2011.
13. *Tweeton D. R., Jackson M. J. and Roessler K. S.* BOMCRATR — A Curved Ray Tomographic Computer Program for Geophysical Applications // *USBM RI 9411*. 1992. № 39. P. 1992.
14. *Wenfrich A., Trela Ch., Krause M., Maierhofer Ch., Effner U., Wostmann J.* Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography // Berlin: ECNDT Tu.3.2.5 Bundesanstalt für Materialforschung und -- prüfung (BAM), Berlin, Germany, 2006.

