УДК 624.012.82:693.22:550.837.76
doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.51-59

Изучение строения и состояния исторической кирпичной кладки методом георадиолокации

Алексей Андреевич ЧУРКИН[1], кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории новых видов свайных фундаментов, chaa92@mail.ru

Юрий Алексеевич СТРОЧКОВ[2], начальник отдела, idw83@mail.ru

[1] НИИОСП им. Н. М. Герсеванова НИЦ «Строительство», 109428 Москва, Рязанский просп., 59, корп. 1

[2] Росгеолфонд, 123007 Москва, ул. 3-я Магистральная, 38

Аннотация. *Рассмотрены некоторые вопросы применения георадиолокационного профилирования при обследовании строения и состояния исторической кирпичной кладки на примере результатов обследования исторических зданий в Москве. Цель работы — проанализировать возможности наземной георадиолокации при оценке состояния каменной кладки. В задачи работы входит анализ результатов натурных исследований по изучению каменной кладки георадиолокацией, применение атрибутного анализа в качестве вспомогательного инструмента для анализа данных. Георадиолокационное профилирование выполнялось с помощью отечественных георадаров. Для обработки данных использовались программа GeoScan32 и модуль атрибутного анализа AtrAnS. Приведены основные подходы к методике проведения полевых исследований. Успешно были выявлены полости (воздуховоды, печные трубы) и закладные детали в обследуемых сооружениях, что подтвердили результаты прямых буровых работ. Показана чувствительность сигналов к состоянию кладки: наличию зон высола, трещин, участков разрушенной кладки. Рассмотрены возможные сценарии применения георадара в процессе обследования и преимущества комплексного подхода, основанного на взаимодействии геофизиков и специалистов обследовательских организаций.*

Ключевые слова: *техническая геофизика, обследование зданий, объекты культурного наследия, кирпичная кладка, георадиолокация, интерпретация данных, атрибутный анализ*

Для цитирования: *Чуркин А. А., Строчков Ю. А.* Изучение строения и состояния исторической кирпичной кладки методом георадиолокации // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 12. С. 51—59. doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.51-59

STUDY OF THE STRUCTURE AND STATE OF THE HISTORICAL BRICK MASONRY BY THE GROUND PENETRATING RADAR PROFILING

Aleksei A. CHURKIN[1], chaa92@mail.ru

Yury A. STROCHKOV[2], idw83@mail.ru

[1] Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N. M. Gersevanov, Research Center of Construction, Ryazanskiy prospekt, 59, korp. 1, Moscow 109428, Russian Federation

[2] Russian Federal Geological Fund, 3-ya Magistral'naya ul., 38, Moscow 123007, Russian Federation

Abstract. *Some issues of the application of ground penetrating radar profiling in the examination of the structure and condition of historical brickwork are considered on the example of the results of the survey of historical buildings in Moscow. The purpose of the work is to analyze the possibilities of ground penetrating radar profiling in relation to assessing the state of masonry. Tasks of the work include the analysis of the results of field studies of masonry by georadiolocation; application of attribute analysis as an auxiliary tool for data analysis. Georadiolocation profiling was performed using domestic ground-penetrating radars. The GeoScan32 program and the AtrAnS attribute analysis module were used for data processing. The main approaches to the methodology of conducting field research are given. Cavities (air ducts, chimneys) and embedded parts in the surveyed structures were successfully identified, which was confirmed by the results of direct drilling operations. The sensitivity of the signals to the condition of the masonry (presence of efflorescence zones, cracks, areas of destroyed masonry) is shown. The possible scenarios of using GPR in the survey process and the advantages of an integrated approach based on the interaction of geophysicists and specialists of survey organizations are considered.*

Keywords: *technical geophysics, building inspection, cultural heritage objects, brick masonry, ground penetrating radar, data interpretation, attribute analysis*

For citation: Churkin A. A., Strochkov Yu. A. Study of the Structure and State of the Historical Brick Masonry by the Ground Penetrating Radar Profiling. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2023, no. 12, pp. 51—59. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2023.12.51-59

© ЧУРКИН А. А., СТРОЧКОВ Ю. А., 2023

Введение

Применение геофизических методов при обследовании состояния несущих конструкций, фундаментов и грунтового основания объектов культурного наследия получило за последнее десятилетие повсеместное признание в России и за рубежом. Использование геофизики при оценке состояния памятников закреплено в положениях ГОСТ Р 56198—2014 «Мониторинг технического состояния объектов культурного наследия. Недвижимые памятники. Общие требования», что является наглядным подтверждением роста популярности и востребованности таких методов.

Необходимость обследования и оценки состояния кирпичной и каменной кладки возникает при ремонтно-восстановительных работах на территории объектов культурного наследия. Требование бережного обращения с историческими памятниками вынуждает исследователей минимизировать испытания прямыми методами (буровые работы) и искать косвенные, неразрушающие способы определения геометрических параметров и свойств строительного материала.

Применение различных по лежащему в их основе физическому принципу методов позволяет решать множество задач [1—11]. Обследование грунтов основания выполняется для определения строения, в том числе локализации коммуникаций и состояния массива (выделение ослабленных и обводненных зон). Для этого применяются поверхностные и скважинные методы электроразведки, сейсморазведки, георадиолокации.

Изучение геофизическими методами фундаментов позволяет определить тип и глубину их заложения, дать оценку сплошности материала, локализовать участки нарушения контакта «фундамент—грунт» и в некоторых случаях обнаружить пустоты. Для решения таких задач традиционно применяются более высокоразрешающие методы георадиолокации, сейсмоакустики, ультразвуковых прозвучиваний, тепловизионных наблюдений [1—2, 10—12]. В основную задачу георадиолокационного обследования несущих конструкций и перекрытий входит определение толщины и конструктивного строения, уточнение шага балок, поиск пустот и закладных элементов, картирование замоченных и разрушенных участков [3].

Георадиолокационное профилирование — один из наиболее распространенных методов, который в зависимости от конфигурации объекта исследования и выбранного частотного диапазона зондирующего импульса применяется для решения данных задач. Технология зарекомендовала себя в качестве производительного и информативного инструмента в руках исследователей [1—6]. Отдельно можно указать на отечественный опыт разработки темы поиска пустот в строительных конструкциях с применением георадара [3—4].

Вопросы использования георадиолокации в комплексе с другими геофизическими методами при изучении кладки (masonry) памятников истории и архитектуры подробно проработаны европейскими специалистами [7—11]. Объектами исследования геофизиков и геотехников из Италии, Франции, Испании становятся постройки, относящиеся к периодам от поздней античности до Нового времени, часто совмещающие материалы и технологии строительства различных архитектурных эпох.

Основной объем исторической кирпичной кладки, с изучением которого с применением неразрушающих методов приходится сталкиваться на территории европейской части России, относится к XVIII—XIX вв. Здания, возведенные из кирпича, включаются в проекты восстановления работоспособности сооружений. Комплекс мероприятий по усилению несущих конструкций (перекладывание, инъектирование, внешнее армирование и т. д.) требует предварительного проведения изысканий, позволяющих на основе информации о внутреннем строении основного массива стен, колонн, перекрытий выбрать технологию и оценить объемы работ.

В статье представлены результаты применения поверхностной георадиолокации для изучения исторической кирпичной кладки на объектах в Москве, позволяющие проиллюстрировать возможности метода для определения строения и диагностики ее состояния. Обсуждаются вопросы оптимизации выполнения полевых работ, обработки и интерпретации данных метода.

Материалы и методы

Метод георадиолокационного профилирования (Ground Penetrating Radar — GPR) основан на явлении изменения кинематических (скорость прохождения) и динамических (амплитудно-частотный состав) характеристик высокочастотных электромагнитных волн в средах в зависимости от их структуры и физико-механических свойств. Применяемые в полевых условиях георадары обеспечивают излучение и прием сверхширокополосных (наносекундных — нс) электромагнитных импульсов. Распространение возбужденных электромагнитных импульсов в среде в общем случае удовлетворяет законам волновой оптики, а именно: при столкновении с участками среды, имеющими различные электрофизические свойства, образуются отраженные и дифрагированные волны. Для интерпретации результатов при решении задач дефектоскопии применяется не только традиционный анализ данных во временной области, но и атрибутный анализ [12—14].

Применительно к обследованию исторической каменной и кирпичной кладки объектами исследования георадиолокации становятся внутренние пустоты (дымоходы и воздуховоды, печи, заложенные проемы), зоны частичного разрушения (деградации) кладки и локальные объекты (армирование, кабели, трубы, закладные детали и др.), визуальное обнаружение и прослеживание которых часто затруднено или невозможно.

Каменная и кирпичная кладка существенно отличается от бетонных и железобетонных сооружений [7, 9] сложностью структуры материала. Объект исследования состоит из отдельных кирпичей/камней, цемента различного типа, включает деревянные и металлические закладные детали. Кладка часто имеет нерегулярную форму поверхности, с которой производятся измерения, и сложную внутреннюю геометрию отдельных элементов конструкции.

В зависимости от выбранной центральной частоты антенны различается физическая модель кладки. Для сравнительно низкочастотных импульсов (с центральной частотой 150—400 МГц) кладку можно рассматривать как гомогенную структуру, имеющую средние значения относительной диэлектрической проницаемости ε_{av} и проводимости σ_{av} в объеме. На более высокочастотные импульсы (1000—2500 МГц) оказывает влияние сложная гетерогенная структура кладки, состоящей из кирпича с ε_{br} и σ_{br} и цементного раствора с ε_{cem} и σ_{cem}.

При работе в низкочастотном приближении интенсивные аномалии будут связаны прежде всего с наличием контрастных отражающих границ (противоположная грань конструкции, изменение материала кладки) и существенно отличающихся по электрофизическим свойствам включений (металлические элементы, воздуховоды) [7]. При работе в высокочастотном приближении данные оказываются осложнены отраженными и дифрагированными волнами, установить природу которых часто не представляется возможным. Аномалии возникают на границах отдельных кирпичей, участках аномального состояния цементного раствора и т. д. [10]. В обоих случаях на регистрируемую волновую картину оказывает влияние наличие участков повышенного увлажнения, проявляющихся в виде высолов на поверхности кладки.

Необходимо отметить, что методика проведения полевых работ и выбор частотного диапазона используемых антенн в полевых условиях зависит от того, каким арсеналом оборудования располагает обследователь. Минимально необходимый набор антенн может состоять из одной антенны из «низкочастотного диапазона» (250—400 МГц) и одной — из «высокочастотного» (1000—2000 МГц). Учитывая, что работы методом профилирования по вертикальным конструкциям с антенными блоками большого размера и веса весьма трудоемкие, на реальных объектах обычно используются антенны с частотами 400—500 и 1500—1700 МГц. Такой комплект позволяет выделять малоразмерные объекты, не теряя приемлемую глубинность исследования.

В связи с указанными трудностями георадиолокация редко применяется в качестве единственного метода контроля. При интерпретации данных используется априорная информация, включающая данные прямых испытаний, консультации со специалистами смежных дисциплин — реставраторами, архитекторами, историками [7]. В комплексе с георадиолокацией выполняют микроклиматические исследования, электро- и георадиолокационную томографию [3, 8], вспомогательное численное моделирование [9], акустическую и ультразвуковую томографию [2, 10], тепловизионную съемку [11]. Использование георадиолокационной томографии по методике, приведенной в [4], для поиска пустот на производственных объектах, малоприменимо из-за сложности в реализации и высоких трудозатрат на полевые работы и обработку данных.

На практике, совместно с георадаром, чаще всего применяют ультразвуковые тестеры, позволяющие количественно оценить степень разрушения кладки, и сейсмоакустические приборы, помогающие определить глубину заложения и качественно охарактеризовать состояние фундаментных конструкций.

Деградация и износ кирпичной кладки связаны с воздействием агентов различной природы, таких как физические, химические, биологические. Длительное действие негативных процессов приводит к нарушению структурных связей и развитию механических деформаций, утрате несущей способности. Поэтому, помимо визуального анализа данных для локализации точечных дефектов, важна возможность получения оценки аномальных свойств (например влажности) отдельных участков кладки.

При известной геометрии конструкции возможно грубо оценить изменение диэлектрической проницаемости среды по изменениям положения синфазных отражающих границ. Для косвенной оценки объемной влажности w по изменению ε могут использоваться различные эмпирические зависимости, вроде формулы Лихтенекера [2]

$$\varepsilon_{gpr} = \varepsilon_{br}^{w} \varepsilon_{water}^{1-w} \quad (1)$$

или формулы Топпа [7]

$$w = -5{,}3 \cdot 10^{-2} + 2{,}92 \cdot 10^{-2} - 5{,}5 \cdot 10^{-4} (\varepsilon_{gpr})^2 + 4{,}3 \cdot 10^{-6} (\varepsilon_{gpr})^3, \quad (2)$$

где ε_{gpr} — диэлектрическая проницаемость по данным георадара; ε_{br} — диэлектрическая проницаемость сухого кирпича и

Рис. 1. ***Проведение полевых исследований с применением георадара «ОКО» с антенными блоками АБ1700 и АБ400***

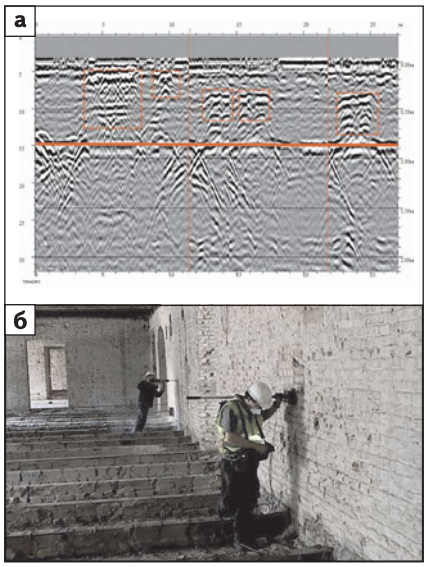


Рис. 2. ***Пример обработанной радарограммы с выделенными воздуховодами и противоположной поверхностью стены (а) и верификация данных георадиолокации бурением в режиме реального времени (б)***

камня (около 4); ε_{br} — диэлектрическая проницаемость воды равная 81.

Представленные в статье результаты получены на различных объектах культурного наследия в ЦАО Москвы. Для проведения исследований использовались георадары семейства «ОКО» (ООО «Логические системы», Россия). Полевой комплект аппаратуры состоял из радарного блока, электронного блока обработки и управления, антенных блоков АБ1700 (центральная частота возбуждаемого сигнала 1700 МГц) и АБ400 (400 МГц соответственно), комплекта соединительных кабелей *(рис. 1)*.

Георадиолокационное профилирование выполнялось вдоль профилей наблюдения, размечаемых исходя из возможности для перемещения антенного блока по поверхности конструкции и необходимости изучения участков кладки, для которых были запланированы или уже начаты ремонтно-восстановительные работы, включающие сплошное инъектирование по сетке. В связи с тем, что целью работ было в основном выявление воздуховодов, идущих внутри конструкций вертикально, чаще всего профили георадиолокации располагались на поверхности стен горизонтально. При обнаружении аномалий на одном горизонтальном профиле параллельно ему выполнялись еще два профиля — выше и ниже первого на 0,5 м.

При использовании АБ1700 запись производилась с разверткой 24 нс без накопления, шаг по профилю составлял 30 мм. На коротких профилях для увеличения количества записанных трасс шаг уменьшался до 25 мм. В случае, если для обследования был доступен только небольшой участок стены, по нему антенна прокатывалась 2—3 раза, в файле между следующими проходами ставилась двойная метка. При работе с АБ400 развертка составляла 50 нс, шаг по профилю — 50 мм. В связи с отсутствием электромагнитных помех накопление также было не нужно.

Обработка данных георадиолокационного профилирования осуществлялась в программном пакете GeoScan-32 (ООО «Логические системы»). Для записанных данных применялись процедуры обработки по следующей схеме: установка уровня “0” (определение положения верхней границы обследуемой поверхности), удаление постоянной составляющей («вычитание среднего»), полосовая и пространственная фильтрация, автоматическая регулировка амплитуд (экспоненциальной функцией). Параметры настройки усиления и фильтров подбирались для каждого профиля индивидуально. Производилась корректировка шкалы глубин в соответствии со значением скорости волны, определенным по форме гиперболы отраженного от локального объекта сигнала, и изменение цветовой палитры радарограмм для более контрастного выделения границ и неоднородностей на радарограммах. Атрибутный анализ данных выполнялся в модуле AtrAnS — расчеты атрибутов нормированного сигнала во временной и частотной области проводились в скользящем окне с шириной $\Delta T = 2$ нс и усреднением по трем трассам.

Результаты исследования

Работы по исследованию исторической кирпичной кладки методом георадиолокации осуществляют по двум основным сценариям. В первом случае от геофизиков требуется оперативно в полевых условиях выявить положение внутренних неоднородностей, армирования и пустот (вентиляционные ходы или дымоходы). Для решения такой задачи необходимо выполнение «экспресс—интерпретации», при которой практически не используется обработка записи, а анализ данных производится на экране блока обработки георадара. Успешность проведения таких работ зависит от контрастности проявления неоднородностей на радарограммах. Наиболее ярко на записях проявляются металлические объекты (стержни арматурной решетки и закладные элементы), а также пустоты и зоны повышенной влажности.

При работе по методике «экспресс—интерпретации» незаменимы данные визуального осмотра. При кажущейся простоте он позволяет быстро получить информацию об особенностях кладки, ее дефектах. Процессы, происходящие со зданием, накладывают свой отпечаток на внешнюю поверхность несущей конструкции. Например, деформации фундамента из-за неравномерных осадок приводят к образованию наклонных и вертикальных трещин. Физическое выветривание, вызванное протечками, изменяет фактуру и цвет кладки. По результатам визуального осмотра можно быстро выделить участки ремонтной кладки, заложенные проемы, изменения в вентиляционной системе и других коммуникациях.

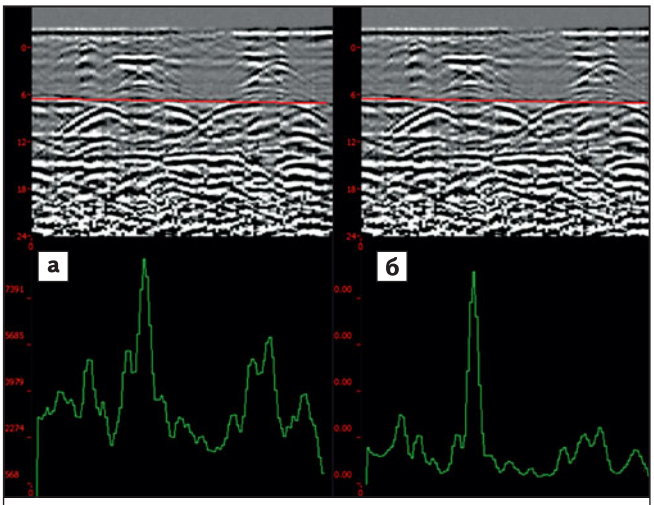
Второй сценарий подразумевает глубокий анализ обработанных радарограмм с выделением слабо проявленных особенностей или сопоставление большого количества однотипных записей, в том числе при создании псевдотрехмерного изображения. Работа осуществляется в камеральных условиях и требует точной привязки положения георадиолокационных профилей на схеме или поэтажном плане здания. Более детальная проработка полевых материалов по сравнению с «экспресс—интерпретацией» позволяет картировать малоконтрастные аномалии и прослеживать плавное изменение электрофизических свойств по профилю. Также при камеральной обработке становится возможным выполнение атрибутного анализа сигнала.

Рассмотрим оба методических подхода на примере результатов полевых работ. Данные, полученные на *первом объекте* (памятник архитектуры XVIII в., ЦАО Москвы), позволяют проиллюстрировать применение георадара для поиска воздуховодов и печных труб. Обследовалась кирпичная кладка толщиной 0,9—1 м. Важной особенностью работ на объекте стало их комплексирование с прямой проверкой обнаружения пустот путем разбуривания кладки. Таким образом, все выделяемые на радарограммах воздушные ходы и печные трубы подтверждались непосредственно после проведения измерений.

Радарограмма по кирпичной стене с выделенными на ней красным пунктиром аномалиями, связанными с воздуховодами исторической системы печного отопления, приведена на *рис. 2а*. Хорошо видно, что аномалии залегают в толще стены на разной глубине, что подтверждается результатами бурения. Точность определения глубины залегания объектов зависит в том числе от влажности вышележащего слоя и оценивается порядка ± 0,05 м. Сплошной красной линией выделена противоположная поверхность стены. Толщина стены, по данным георадиолокации, составляет 0,9 м, что подтверждается результатами визуально-инструментального обследования. Процесс георадиолокационного обследования в варианте «экспресс—интерпретации» и следующее за ним бурение выделенных аномалий показаны на *рис. 2б*.

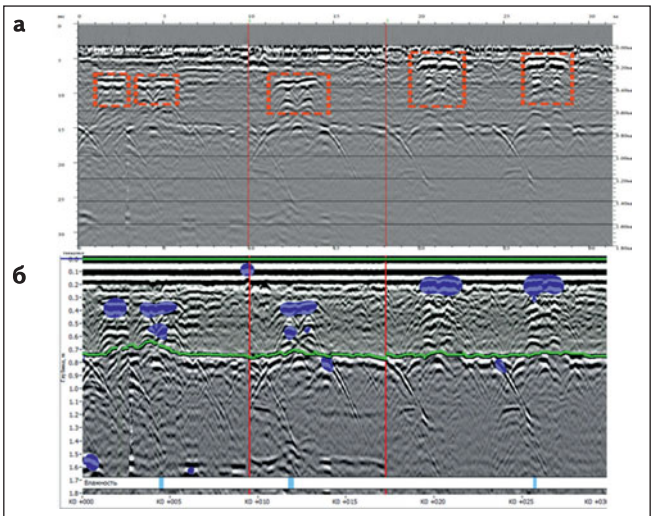
На примере данных, полученных на первом объекте, можно продемонстрировать использование атрибутного анализа для выделения георадиолокационных аномалий, связываемых с особенностями кладки. Расчет атрибутов во временном окне от начала записи до пикировки отражения от противоположной грани конструкции позволяет по заметному изменению амплитудно-частотного состава сигналов выделить участки, соответствующие воздуховодам *(рис. 3)*. Применение автоматического критерия обработки записи с помощью оценки превышения порога амплитуд, при низком уровне фоновых шумов, способно заменить трудоемкую ручную работу по выделению аномалий *(рис. 4)*. Обработка данных выполнена В. В. Капустиным в программном комплексе «Анализ-7» (ООО «НПЦ ГЕОТЕХ»).

На *втором объекте* (объект культурного наследия XIX в., ЗАО Москвы) обследовали на предмет наличия пустот и внутренних включений кирпичную кладку толщиной 0,4, 0,7 и 1,1 м. Основной объем кирпичных конструкций был возведен во второй половине XIX в. Однако на протяжении XX в. здание неоднократно достраивалось и усиливалось. Для усиления несущих конструкций часто используются стальные балки внешнего армирования. При устройстве таких конструкций балки могут заводиться в кладку или устанавливаться враспор. При отсутствии доступа в помещение, где проводилось усиление внешним армированием, тип его связи со стеной можно определить с помощью георадара. Радарограмма по стене, усиленной балками,



а — максимальная спектральная амплитуда; б — энергия сигнала

Рис. 3. ***Применение атрибутного анализа (сплошная красная линия показывает отражение от противоположной поверхности стены)***



а — ручная обработка данных; б — автоматическая обработка данных

Рис. 4. ***Использование автоматического алгоритма обработки данных для выделения пустот в кладке***

приведена на *рис. 5*. Первая из балок заходит в кладку с обратной стороны, вторая — упирается в поверхность стены.

Решая задачи с поиском воздуховодов в стенах для целей инъектирования, важно определить являются ли воздуховоды пустыми или заполненными строительным мусором. На радарограмме *(рис. 6)* выделены два воздуховода: засыпанный строительным мусором и пустой. Такой вывод сделан на основе анализа характера волнового поля — в заполненном воздуховоде выделяется большое количество отражений от крупной фракции кирпичного лома и мусора, в пустом воздуховоде хвосты гипербол отражений от краев не прерываются на всю глубину пустоты. Результат интерпретации подтвержден вскрытием.

Третий объект исследования (ограда особняка XIX в., ЦАО Москвы) позволяет проиллюстрировать применение метода для изучения состояния кладки конструкции, визуальный анализ которой затруднен из-за наличия слоя облицовки. При регулярном обновлении декоративного слоя штукатурки такие дефекты кладки, как трещиноватые, разрушенные участки и участки замокания, могут практически не проявляться на поверхности конструкции. Различные виды дефектов кладки на радарограммах могут быть проявлены по-разному.

Например, замоченные участки выделяются по увеличению амплитуды и уменьшению частоты отраженного сигнала. Сильно трещиноватый или разрушенный участок можно определить по появлению на записи большого количества отражений и уменьшению значений диэлектрической проницаемости. В автоматическом режиме дефектные участки кладки можно выделять по максимумам энергии спектра нормированного сигнала. Пример успешного применения такого алгоритма приведен на *рис. 7*.

Одна из частых практических задач, возникающих при обследовании исторической кирпичной кладки, — поиск армирования и металлических закладных элементов. Просмотр радарограмм в ручном режиме при большом объеме записанного материала очень трудозатратный. Автоматическое выделение гиперболических отражений от локальных объектов в кирпичной кладке даст большое количество ложных целей. На помощь приходит расчет атрибутов сигнала, позволяющий выделить участки радарограмм, которые содержат локальные объекты. На этих участках интерпретатор сможет впоследствии выделить сами объекты. К одному из таких атрибутов можно отнести значение корреляции между соседними трассами. Радарограмма с выделенными на ней локальными объектами — армированием колонн ограды, состоящим из пары стальных труб, и график изменения корреляции между соседними трассами, максимумы которого позволяют выделить области, содержащие локальные объекты, показаны на *рис. 8*.

Пример радарограммы, аномалия на которой в ходе «экспресс—интерпретации» была ошибочно определена как заложенный проем, приведен на *рис. 9*. При толщине стены 0,9 м в верхнем слое штукатурки, на глубине менее 0,05 м залегает участок армирующей мелкоячеистой металлической сетки (на рисунке выделен двумя красными вертикальными линиями). При перемещении антенны АБ400 георадара по поверхности стены без отрыва

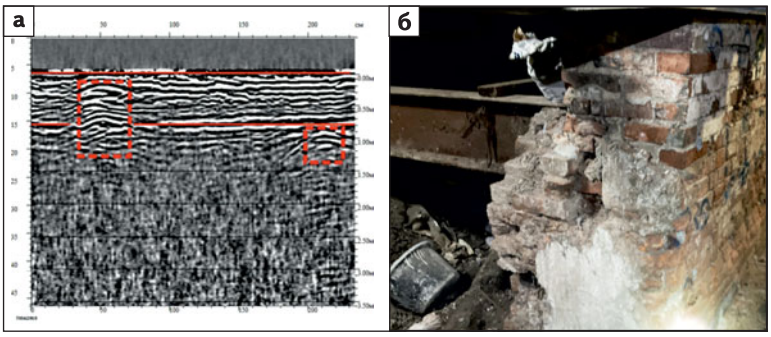


Рис. 5. *Пример проявления на данных металлических распорных балок: заходящей в кладку с обратной стороны и упирающейся в поверхность стены (а). Фотография одной из выделенных на радарограмме балок (б)*

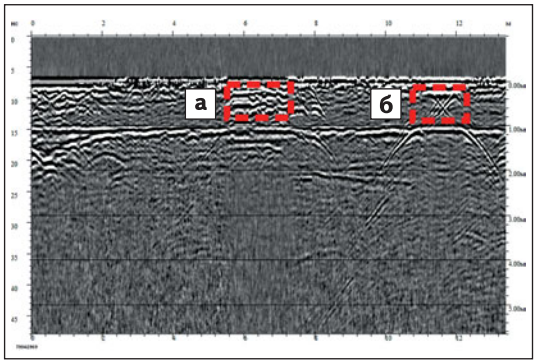
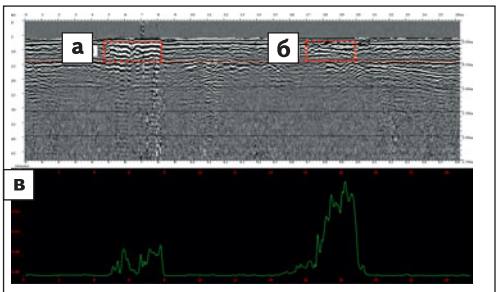


Рис. 6. *На радарограмме выделены воздуховоды: засыпанный строительным мусором (а) и пустой (б)*



а — замоченная зона; б — участок, ослабленный трещинами; в — график изменения энергии спектра нормированного сигнала по профилю (энергия выше красной пунктирной линии)

Рис. 7. *Радарограмма по кирпичной кладке*

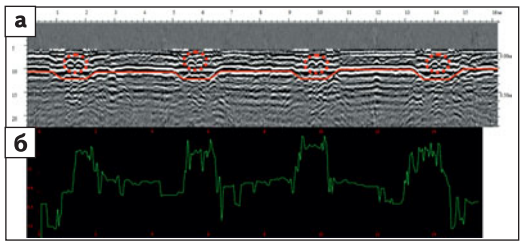


Рис. 8. *Участок радарограммы по кирпичной кладке с выделенными локальными объектами внутри колонн (а), график изменения корреляции между соседними трассами (б)*

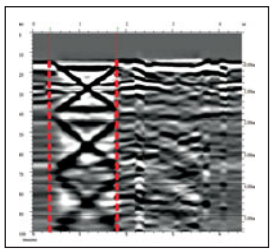


Рис. 9. *Радарограмма с выделенной аномалией от армирующей сетки*

(шаг по профилю — 50 мм, диапазон записи — 100 нс), при попадании армирующей сетки в ближнюю зону источника сетка начинает сама переизлучать сигнал. Таким образом, возникает волновая картина, ошибочно проинтерпретированная как пустота внутри заложенного проема. Результаты контрольного бурения показали сплошность конструкции на данном участке. Наличие сетки бурением не выявлено, она была обнаружена только в результате частичного вскрытия стены.

Оценивая результаты георадиолокационного обследования в различных натурных условиях, можно констатировать, что наиболее информативными становились записи, выполненные по внутренним стенам и внешним стенам в направлении изнутри—наружу, находящимся в сухих или маловлажных условиях. Наружная поверхность внешних стен обычно более выветрелая и рыхлая, часто переувлажненная, поэтому записи, полученные при профилировании такой поверхности, гораздо сложнее в интерпретации. При обследовании кирпичных конструкций разной толщины наилучшие результаты получены при толщине 0,4—1 м. В конструкциях меньшей толщины редко встречались пустоты, а при большей — не всегда хватало глубинности по причине затухания сигнала. В случае, когда кирпичная кладка покрыта толстым слоем штукатурки, качество георадарной записи обычно хуже, чем при работе непосредственно по поверхности кладки. Особенно это заметно, если штукатурка нанесена по металлической армирующей сетке.

Результаты проведенных исследований показывают примеры не только удачного использования георадиолокации для исследования исторической кирпичной кладки, но и случаи ошибочной интерпретации данных. Несмотря на кажущуюся простоту проведения полевой съемки и автоматизированную обработку данных, метод не дает универсальных ответов на некоторые изыскательские вопросы. Интерпретация результатов должна производиться с использованием любой доступной априорной информации об объекте исследования и, по возможности, дополняться применением методов изысканий, использующих другие физические принципы.

Выводы

1. Описаны основные методические подходы к изучению исторической кирпичной кладки с применением георадиолокационного профилирования.

2. Метод георадиолокации успешно применен для локализации пустот и инородных включений в

обследуемой исторической кладке для нескольких объектов культурного наследия на территории Москвы.

3. Показана возможность оценки строения и состояния кирпичной кладки с применением визуального анализа данных во временной области и с помощью атрибутного анализа в частотно-временной области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Капустин В. В., Владов М. Л.* Техническая геофизика. Методы и задачи // Геотехника. 2020. Т. 12. № 4. С. 72–85. doi: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85
2. *Шилин А. А., Кириленко А. М., Знайченко П. А.* Опыт изучения кирпичных и каменных кладок исторических зданий в г. Москве in situ // Сб. докл. 16-й Междунар. конф. «Structural Faults + Repair – 2016» (Эдинбург, Шотландия, 17–19 мая 2016 г.). URL: http://znayugeo.ru/wp-content/uploads/2016/03/1714-Kirilenko.pdf (дата обращения: 30.10.2023).
3. *Судакова М. С., Калашников А. Ю., Владов М. Л.* [и др.] Поиск конструктивных пустот в строительных конструкциях методом георадиолокации // Геотехника. 2017. № 2. С. 30–37.
4. *Судакова М. С., Калашников А. Ю., Терентьева Е. Б.* Исследование возможностей георадарной томографии для поиска воздушных полостей в инженерных конструкциях // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 50–59.
5. *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
6. *Арьков Д. П., Сухов А. А., Беляев А. И.* [и др.]. Обследование ограждающих конструкций насосной станции геофизическими методами // Научно-агрономический журнал. 2021. № 4. С. 35–41. doi: 10.34736/FNC.2021.115.4.006.35-41
7. *Ranalli D., Scozzafava M., Tallini M.* Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy) [Георадарные исследования для реставрации исторических зданий: пример базилики Коллемаджо (Л'Акуила, Италия)] // Journal of Cultural Heritage. 2004. No. 1. Pp. 91–99. doi: 10.1016/j.culher.2003.05.001
8. *Leucci G., Persico R., Soldovieri F.* Detection of fractures from GPR data: the case history of the Cathedral of Otranto [Обнаружение трещин по данным георадара: на примере собора Отранто] // Journal of Geophysics and Engineering. 2007. No. 4. Pp. 452–461. doi: 10.1088/1742-2132/4/4/011
9. *Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.-P. et al.* Numerical simulations and laboratory tests to explore the potential of ground-penetrating radar (GPR) in detecting unfilled joints in brick masonry structures [Численное моделирование и лабораторные испытания для изучения возможностей георадара в обнаружении незаполненных швов в конструкциях из кирпичной кладки] // International Journal of Architectural Heritage. 2012. No. 6. Pp. 648–664. doi: 10.1080/15583058.2011.597484
10. *Santos-Assunzao S., Perez-Gracia V., Caselles O.* et al. Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies [Оценка состояния сложных каменных конструкций с помощью георадара по сравнению с другими исследованиями неразрушающего контроля] // Remote Sensing. 2014. No. 6. Pp. 8220–8237. doi: 10.3390/rs6098220
11. *Ghosh D., Gupta H., Mittal A. K.* Non-destructive evaluation of historic masonry structures using infrared thermography and GPR [*Неразрушающая оценка состояния исторических каменных построек с использованием инфракрасной термографии и георадара*] // Advances in Non-Destructive Evaluation. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore, Springer, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-9093-8_26
12. *Капустин В. В., Чуркин А. А., Широбоков М. П.* Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // Геотехника. 2021. Т. 13. № 1. С. 68–79. doi: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79
13. *Капустин В. В., Строчков Ю. А.* Некоторые особенности обработки георадарных данных при исследовании строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 22–25.
14. *Капустин В. В., Синицин А. В.* Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования // Геофизика. 2018. № 2. С. 17–23.

REFERENCES

1. Kapustin V. V., Vladov M. L. Technical geophysics. Methods and tasks. *Geotekhnika*, 2020, vol. 12, no. 4, pp. 72–85. (In Russ.). doi: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85
2. Shilin A. A., Kirilenko A. M., Znajchenko P. A. Experience in studying brick and stone masonry of historical buildings in Moscow in situ. *Sbornik dokladov dlya 16 Mezhdunarodnoj konferencii "Structural Faults + Repair – 2016"* (Edinburgh, Scotland, May 17–19, 2016). Available at: http://znayugeo.ru/wp-content/uploads/2016/03/1714-Kirilenko.pdf (accessed 30.10.2023). (In Russ.)
3. Sudakova M. S., Kalashnikov A. Yu., Vladov M. L. et al. Detection of voids in engineering structures using GPR method. *Geotekhnika*, 2017, no. 2, pp. 30–37. (In Russ.).
4. Sudakova M. S., Kalashnikov A. Yu., Terentieva E. B. Investigation of the possibilities of georadar tomography to search for air cavities in engineering

structures. *Defektoskopiya*, 2016, no. 9, pp. 50–59. (In Russ.).

5. Dymbrenov T. N., Znaichenko P. A. Georadiolocation survey method for solving various construction tasks. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2019, no. 11, pp. 28–33. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2019.11.28-33
6. Ar'kov D. P., Sukhov A. A., Belyayev A. I. et al. Examination of the pumping station enclosing structures by geophysical methods. *Nauchno-agronomicheskiy zhurnal*, 2021, no. 4, pp. 35–41. (In Russ.). doi: 10.34736/FNC.2021.115.4.006.35-41
7. Ranalli D., Scozzafava M., Tallini M. Ground penetrating radar investigations for the restoration of historic buildings: the case study of the Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 2004, no. 1, pp. 91–99. doi: 10.1016/j.culher.2003.05.001
8. Leucci G., Persico R., Soldovieri F. Detection of fractures from GPR data: the case history of the Cathedral of Otranto. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2007, no. 4, pp. 452–461. doi: 10.1088/1742-2132/4/4/011
9. Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.-P. et al. Numerical simulations and laboratory tests to explore the potential of ground-penetrating radar (GPR) in detecting unfilled joints in brick masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 2012, no. 6, pp. 648–664. doi: 10.1080/15583058.2011.597484
10. Santos-Assunзao S., Perez-Gracia V., Caselles O. et al. Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies. *Remote Sensing*, 2014, no. 6, pp. 8220–8237. doi: 10.3390/rs6098220
11. Ghosh D., Gupta H., Mittal A. K. Non-destructive evaluation of historic masonry structures using infrared thermography and GPR. *Advances in Non-Destructive Evaluation. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-9093-8_26
12. Kapustin V. V., Churkin A. A., Shirobokov M. P. Experience of ground penetrating radar application for foundation slabs quality control. *Geotekhnika*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 68–79. (In Russ.). doi: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79
13. Kapustin V. V., Strochkov Yu. A. Some features of GPR data processing in the study of building structures. *Razvedka i ohrana nedr*, 2008, no. 1, pp. 22–25. (in Russ.).
14. Kapustin V. V., Sinitsin A. V. The application of attribute analysis for the solution of applied problems of GPR profiling. *Geofizika*, 2018, no. 2, pp. 17–23. (in Russ.).