

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕН НОВГОРОДСКОГО КРЕМЛЯ

При решении задач изучения, реставрации и реконструкции исторических зданий и сооружений не всегда удается использовать в полном объеме традиционные приемы обследования (зондажи, раскрытия, раскопки и т. п.). Это обусловлено высокой историко-культурной ценностью уникальных объектов, а в случае такого памятника, как Новгородский кремль, также его размерами и аварийным состоянием многих частей. Поэтому для получения информации о внутренней структуре и скрытых дефектах применяют методы неразрушающей диагностики.

К их числу относится и метод подповерхностного радиолокационного зондирования (ПРЛЗ). Необходимо отметить, что ПРЛЗ-метод в силу ряда причин в задачах архитектурно-исторических исследований стал применяться сравнительно недавно и не нашел еще в этом плане отражения в общедоступной отечественной литературе. Общие же сведения по теории и технике подповерхностной радиолокации, а также разнообразные примеры использования ПРЛЗ имеются.\*

Радиолокационный метод, как и многие другие неразрушающие методы, имеет определенные особенности и ограничения. Данные измерений, как правило, не сводятся к легко воспринимаемым единичным параметрам и зачастую допускают различные варианты интерпретации. Опыт показывает, что ценность результатов существенно возрастает, если при их анализе используются исторические материалы, а также контрольные сравнения с данными прямых измерений. Весьма эффективным может оказаться комплексный подход к изучению памятников архитектуры, сочетающий применение различных физических методов. С учетом сказанного представляется целесообразным познакомить специалистов архитектурного, историко-археологического, строительного профилей как с возможностями ПРЛЗ, так и с опытом и результатами работ по радиозондированию стен Новгородского кремля.

Принципиально метод основан на способности электромагнитных волн распространяться в диэлектрических средах и отражаться от границ раздела сред с разными электрическими характеристиками (кирпич — воздух, камень — песок и т. п.). Время запаздывания принятого сигнала пропорционально расстоянию от поверхности, где располагаются излучающая и приемная антенны, до внутреннего отражающего объекта и зависит от свойств вещества на пути распространения волн. Отсюда ясно, что для определения глубины залегания объекта нужно знать характеристики среды. В данном случае здесь присутствует элемент приближенности, поскольку электрические параметры материалов, входящих в состав стены, точно

\* Финкельштейн М. И. и др. Применение радиолокационного зондирования в инженерной геологии. М., 1986; см. также: IEE Proc. 1988. Vol. 135, part F, N 4. (Темат. выпуск).

неизвестны. Однако оценки, проведенные на основе контрольных экспериментов, дают основание считать, что ошибки в определении глубины не превышают 30 %.

Интенсивность отраженного сигнала позволяет судить о степени различия свойств граничащих материалов, форме и шероховатости границ. Что касается минимальных размеров объектов, которые можно обнаружить, то они приблизительно оцениваются средней длиной волны электромагнитного излучения. Необходимо отметить, что эффективность метода ПРЛЗ снижается с увеличением влажности сред, а также при наличии в них случайных неоднородностей. Указанные факторы могут приводить к уменьшению дальности зондирования, к эффектам затенения, а также к ошибкам измерений.

Радиолокационное зондирование стен Новгородского кремля проводилось летом 1992 г. В исследованиях применялся комплекс непрерывного излучения дециметрового диапазона, разработанный на кафедре радиофизики С.-Петербургского государственного технического университета. Специально сконструированная приемно-передающая антенная система позволяла проводить интроскопию кремлевской стены со стороны наружной поверхности. Были разработаны также устройство для перемещения антенн по этой поверхности и система автоматической фиксации координат. В процессе работы антенны перемещались вдоль поверхности по вертикальным трассам от основания стены до уровня площадки боевого хода, при этом с помощью двухканального магнитофона осуществлялась регистрация отраженных сигналов. Каждая трасса включала 60—70 точек зондирования (в зависимости от высоты прясла), с расстоянием между ними в 10 см. В качестве реперов для координатной привязки положения трасс использовались центры зубцов и промежутков между ними. Таким образом, расстояние между соседними трассами составляло приблизительно 1 м.

Работы проводились на шести пряслах кремля; были получены данные зондирования по 300 трассам (более 20 000 точек). При анализе такого объема материала большую роль играют способы и формы представления информации. Так как результаты обработки измерений в отдельных точках (глубина и интенсивность отражений) могут быть связаны со случайными локальными неоднородностями, в качестве базового элемента представления используется совокупность данных, полученных по всей вертикальной трассе, носящая интегральный характер. На их основе формируется графическое изображение, на котором по одной координате откладывается расстояние вдоль трассы, а по другой — условная глубина залегания отражающих фрагментов структуры. Получается так называемый радиопрофиль (радиоразрез), имеющий определенное сходство с тем, что можно было бы наблюдать на настоящем разрезе. Следует, однако, отметить, что это сходство очевидно лишь для простых слоистых структур.

Во многих случаях более наглядным является представление в виде синтезированных горизонтальных сечений (радиоразрез) стены по разным высотам. (Эти и другие операции, включая первоначальную обработку данных, выполняются с использованием IBM совместимого ПК со специально разработанным программным обеспечением).

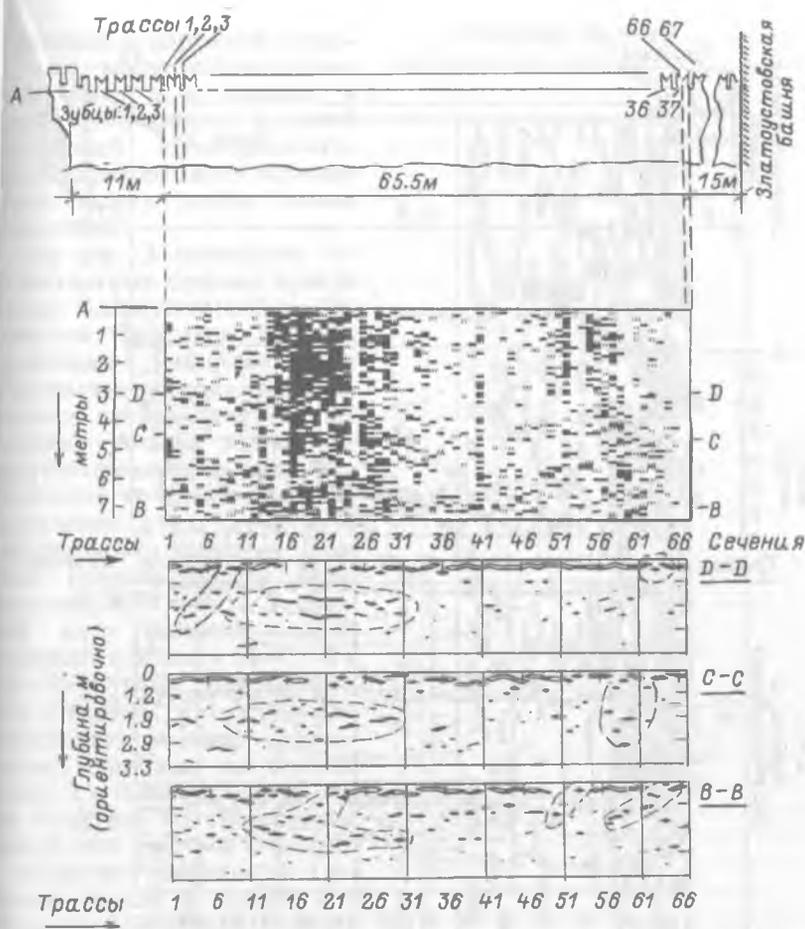


Рис. 1. Радиокарта и горизонтальные сечения прясла между Воскресенскими воротами и Златоустовской башней.

На рис. 1 представлены три горизонтальных сечения прясла между Воскресенскими воротами и Златоустовской башней. Обращает на себя внимание наличие крупной неоднородности в области 11—30-й трасс (9—19-й зубцы). По вертикали она распространяется на всю высоту стены, приобретая в верхней ее части некоторую четкость формы. В нижней же части область, занимаемая неоднородностью, расширяется в поперечном направлении и, по-видимому, связывается с трещиной с облицовочным слоем (20—22-я трассы). Именно в этом месте под пояском в натуре наблюдается заметная вспученность.

Наличие участка с четкими, достаточно протяженными параллельными границами (сечение Д-Д) позволяет допустить, что основной неоднородности могло послужить внутрестенное сооружение, вокруг которого со временем возникла область разрушений. Если считать, что между отмеченными границами на этом сечении на-

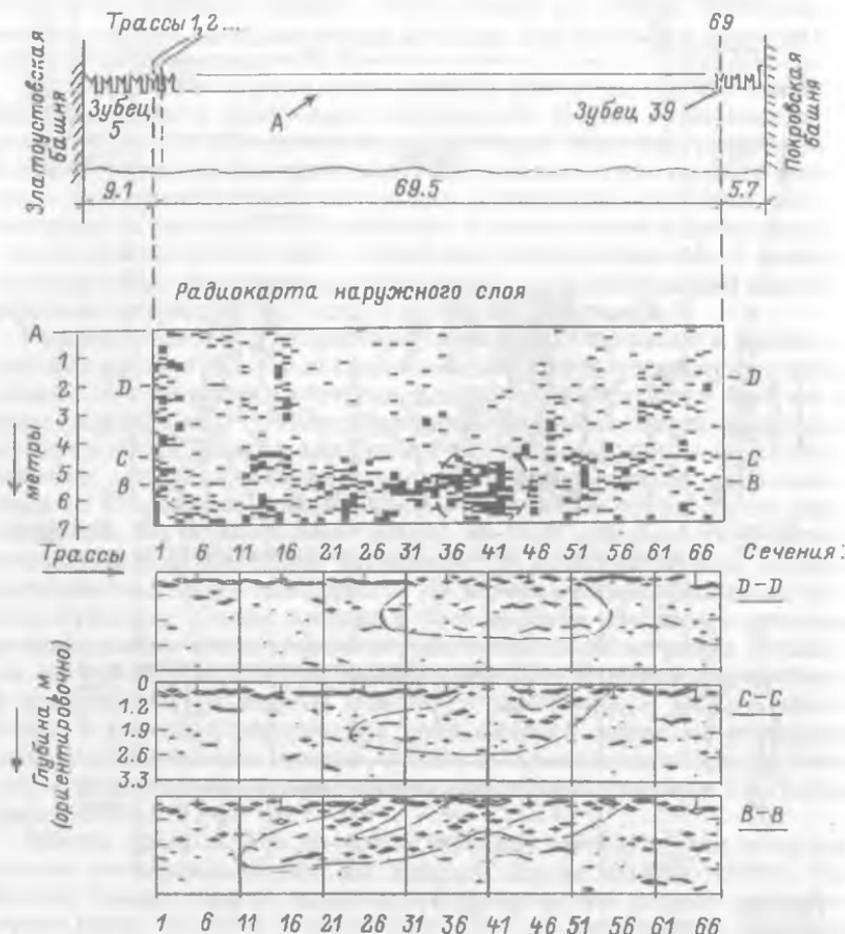


Рис. 2. Радиокарта и горизонтальные сечения прясла между Златоустовской и Покровской башнями.

ходится воздух, то расстояние между ними должно составить примерно 1,5 м. В любом случае этот объект заслуживает серьезного внимания. На рис. 1 приведено графическое изображение иного рода, представляющее собой синтезированную радиокарту отражений, возникающих на глубинах от 1,5 м до 2,5 м, где явно выделяется отмеченная выше область.

На рассматриваемом прясле было произведено также локальное зондирование вдоль трех пилостр аркады с внутренней стороны. Результаты обработки показали наличие в межрочной области пятой от ворот пилостры очень сильных отраженных сигналов, соответствующих малым глубинам. Они легко селективируются по интенсивности, образуя на разрезе характерную лунку. Такие сигналы могут создаваться либо воздушной полостью, либо крупным металлическим телом, наличие которого в стене маловероятно.

Поскольку с наружной стороны это место соответствует 25-й трассе, т. е. попадает в зону отмеченной крупной внутренней неоднородности, можно предположить наличие связи между двумя этими объектами.

На рис. 2 приведены горизонтальные сечения прясла между Златоустовской и Покровской башнями. На них привлекают внимание лучеобразные структуры, развивающиеся сверху вниз (по сечениям). Анализ полной совокупности данных позволяет высказать гипотезу об отождествлении этих структур с внутренними трещинами. Центром неоднородностей является зона 40-й трассы, от которой идет развитие линий (трещин) в области 21—31-й и 51—56-й трасс. Небезынтересно отметить, что эти линии постепенно меняют направление, становясь на глубине около 2 м параллельными стене. Отметим, что структурный центр этой системы совпадает с областью наибольшей кривизны прясла в плане, а в областях 25—31-й, 37—44-й и 51—56-й трасс трещины и вспученности наблюдаются в натуре. Аналогичные особенности заметны и на рис. 1 в районах 7—9-й и 51—65-й трасс. Здесь в местах, соответствующих 64—65-й трассам, можно также заметить трещины на облицовке.

Приведенные на рис. 1 и 2 радиокарты по вполне понятным причинам имеют неодинаковый масштаб по вертикали и горизонтали (соотношение 1:4). На рис. 3 представлена радиокарта наружного слоя прясла между башнями Кокуй и Княжая, где

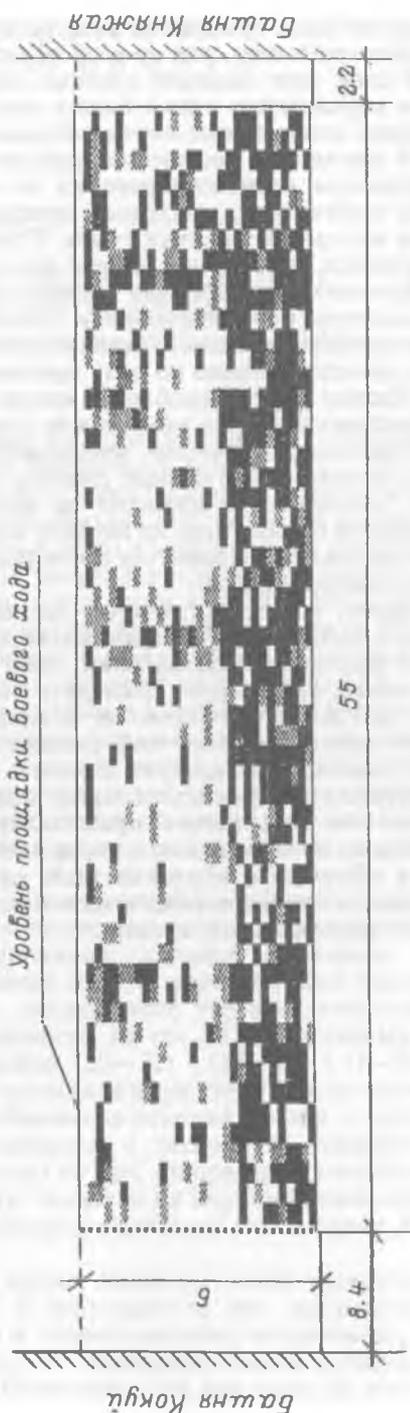


Рис. 3. Радиокарта наружного слоя стены (0—1 м) между башнями Кокуй и Княжая.

масштаб более приближен к реальности (1 : 2). Привлекает внимание то обстоятельство, что во всей области ниже пояска подповерхностный слой дает высокий уровень отраженных сигналов. Это может быть обусловлено отслоением и расслоением облицовки: на других пряслах аналогичные карты выглядят иначе.

В настоящем сообщении, разумеется, не могут быть приведены результаты радиозондирования по всем обследованным пряслам, хотя особенности, способные заинтересовать специалистов, отмечаются на многих участках стены. Приведенные результаты, как представляется, достаточно хорошо иллюстрируют возможности и целесообразность применения специализированной радиолокационной аппаратуры при обследовании такого памятника архитектуры, как Новгородский кремль. Однако окончательную оценку работе давать еще преждевременно по ряду причин.

Прежде всего, проблему интерпретации результатов и идентификации объектов невозможно решить удовлетворительно без сопоставления результатов зондирования с натурой. Для этого могут быть использованы разные способы: бурение (обязательно колонковое), контрольные вскрытия по археологическим методикам с поверхности боевого хода на глубину хотя бы 1 м, обращение к данным, которые могли сохраниться после разновременных ремонтных и реставрационных работ.

Далее, объем полученных данных настолько велик, что с ним можно работать либо ограничиваясь достаточно грубыми обобщенными формами представлений, либо сосредоточивая внимание лишь на мелких фрагментах. Последнее слово здесь остается за потребителем, тем более что далеко не исчерпан круг возможностей по получению дополнительной информации из накопленных данных.

И наконец, не следует забывать о том, что в настоящее время радиолокационные исследования проведены не на всех пряслах. В случае их завершения представляется целесообразным создание электронной базы данных, содержащей в себе все файлы результатов и оболочку с возможностями удобного их поиска и просмотра, которая могла бы наращиваться и быть встроена в общую базу данных о Новгородском кремле.