

Д.Л. Шишков, А.А. Клочко

георадарные исследования на бородинском поле

Геофизические исследования на изучаемом памятнике позволяют наиболее оптимально выбрать участки для археологических раскопок и последующей музеефикации выявленных объектов. Особенности Бородинского поля с точки зрения использования геофизики заключаются, во-первых, в довольно сложных грунтах, подвергавшихся в течение последних 200 лет неоднократной планировке, во-вторых, в наличии всевозможных археологических объектов других эпох (можно привести в пример выявленное нами жилище XIV-XV вв. в районе д. Семеновское), в-третьих, в замусоренности территории металлическими объектами времен Великой Отечественной войны и более позднего времени, в-четвертых, в наличии сильных источников внешних электромагнитных помех. Все это накладывает определенные ограничения на выбор методики исследования.

Девиз, взятый на вооружение георадарной фирмой Geophysical Survey System Inc., «The Difference is the data», который переводится как «Различие есть информация», в полной мере отражает суть нашего подхода к выявлению археологических объектов в контексте геологической среды. В этой ситуации совершенно необходимо, чтобы выявленные аномалии классифицировались и заверялись прямыми методами.

Предметом поиска на Бородинском поле являются отдельные захоронения, некрополи и их планировка, элементы фортификации, осевшие или спланированные за последние 200 лет овраги, которые могли быть использованы для массовых захоронений погибших воинов.

Физические основы георадиолокационного метода. В основе георадиолокационного метода малоглубинной геофизики, известного еще как подповерхностная радиолокация, лежит явление отражения высокочастотного электромагнитного сигнала от границ раздела в верхней части разреза - от стратиграфических границ, уровней во-донасыщения, контуров захороненных объектов, фундаментов и т.п.

Наносекундный электромагнитный радиопульс с частотой в диапазоне от 50 до 500 МГц генерируется в антенне, являющейся устройством, одновременно излучающим и улавливающим отраженный сигнал. В толще горных пород и рыхлых отложений радарный импульс частично отражается от серии разноглубинных границ, формируя улавливаемый антенной сложный эхосигнал. Серия таких отраженных сигналов, получаемая при перемещении прибора (радарный профиль или радарограмма), дает представление о неоднородности верхней части геологического разреза.

Основными параметрами радиолокации являются глубина зондирования и детальность расчленения разреза, оптимальные соотношения которых задаются варьированием частоты и длительности рабочего сигнала при решении каждой конкретной задачи.

На радарограмме контрастность выделенных границ определяется коэффициентом отражения от них сигнала и зависит главным образом от разности диэлектрической проницаемости контактируемых объемов пород (или, иначе говоря, от разницы скоростей распространения электромагнитной волны по обе стороны от контакта, отнесенной к скорости света).

Большинство рыхлых горных пород имеют диэлектрическую проницаемость от 3 до 15 и, как правило, малую контрастность отраженного сигнала. В таких отложениях большая часть отражающих границ и фиксируемых на радарограммах аномалий в значительной степени определяется неравномерной обводненностью изучаемого разреза. Характер же увлажнения зависит от минерального и гранулометрического состава, пористости, трещиноватости и других литологических и структурно-текстурных особенностей отложений.

Глубина проникновения сигнала составляет от десятков метров в сухих песчаных грунтах до первых метров в сильно обводненных глинистых отложениях, а разрешающая способность метода варьируется от единиц до десятков сантиметров в зависимости от контрастности свойств объекта, глубины его залегания и параметров сигнала.

С помощью георадара возможно обнаружение подповерхностных структурно-вещественных неоднородностей разнообразной природы, связанных с различным составом исследуемых пород и материалов, особенностями структуры и текстуры отложений (пористостью, слоистостью), их неравномерным увлажнением, трещиноватостью или деформированностью среды, включением инородных объектов (как металлических, так и неметаллических), пустот и т.п.

Задачи, решаемые с помощью георадара, при изучении объектов наследия разнообразны. С помощью георадара особенно эффективен оперативный анализ археологического потенциала территории - поиск новых и точное определение границ уже известных объектов, а также картирование погребенной структуры на большой площади. Конечно, в идеальном случае желательно сплошное исследование памятника, что удается достаточно редко.

Оборудование для георадиолокационной съемки. Мы используем при обследовании территории следующее оборудование, снаряжение и лицензионное программное обеспечение, позволяющее выполнять полный цикл площадного геофизического обследования территории.

1. Георадар SIR-3000 фирмы Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI, США) с антеннами 5103, 5104 и 5106 и

центральной частотой рабочего сигнала 400, 270 и 200 МГц соответственно.

2. Программное обеспечение Radan 6 для обработки георадиолокационных данных, а также авторский программный продукт для обработки и визуализации 3D данных и авторскую технологию объединения большого числа площадных проектов, посредством которой данные, собранные в течение длительного времени, могут быть представлены в обобщенном виде.

3. Геодезические тележки с датчиком перемещения для нормирования сканирования по пройденному антенной пути.

Методика георадиолокационного обследования территории. На полевом этапе работ проводилась площадная съемка участков по системе параллельных профилей антеннами 5103, 5104 и 5106 с центральными частотами 400, 270 и 200 МГц.

Плотность съемки определяется задачами и размерами искомых объектов; в данной работе она составляла от 0,5 м до 1 м. Границы участков привязывались к реперам на местности или элементам планировки территории. Положение границ участков съемки фиксировалось на фотографиях. Отмечались также все особенности поверхности - ямы, глыбы известняка, насыпи и т.п.

Интерпретация георадиолокационных данных. Обработка и интерпретация материалов георадиолокационных съемок производилась с помощью программы Radan 6 и специального геофизического трехмерного модуля. В данных программах предусмотрены возможности самых разнообразных способов визуализации массива цифровых данных с заданными соотношениями параметров, таких как диапазон интенсивности отраженного сигнала, интервала глубины залегания отражающих слоев и т.п.

Основной характеристикой среды в смысле георадиолокации является отраженный сигнал. Совокупность отраженных сигналов, снятых вдоль прямой линии, образует георадарный профиль, обычно рассматриваемый в виде контурного графика, в котором соединены одинаковые амплитуды сигнала.

При анализе типов волновой картины учитываются следующие ее параметры:

- а) форма границ радарограммы (параллельные, волнистые, хаотичные и т.п.);
- б) интенсивность границ (амплитуда отражения) визуализируется на радарограммах в виде той или иной цветовой гаммы (например, белый и серый цвета - максимальные амплитуды отражения, темно-красный - минимальные);
- в) протяженность соответствует выдержанности отражающих границ по площади (как правило, геологические объекты имеют существенно большие размеры, чем археологические, и, соответственно, лежат глубже, чем поверхностный мусор).

На основании этих критериев выделяются типы волновых картин, характеризующие различные слои и структуры геологического разреза.

При сопоставлении обнаруженных георадиолокационных аномалий с погребенными объектами был полезен имеющийся у авторов опыт применения георадара на территории Троице-Сергиевой лавры, где облик погребенных объектов - захоронений, надгробных плит, склепов, фрагментов старых фундаментов и т.п. достаточно хорошо известен благодаря неоднократным археологическим раскопкам.

Вопрос о глубине залегания выявленных элементов подповерхностной структуры решается сопоставлением с данными сканирования объектов, расположенных на известных глубинах, или, в наиболее ответственных случаях, с помощью измерений с двумя антеннами.

3D-проекты. Анализ структуры верхней части геологического разреза территории осуществляется путем построения его цифровой трехмерной (3D) модели на основе данных георадиолокационного обследования.

В зависимости от размеров объектов поиска, сложности среды и ряда других параметров осуществляется площадная съемка (как правило, по системе параллельных профилей, иногда в двух направлениях). Отснятые участки объединяются в компьютере в единый проект.

В представленных материалах 3D-модель визуализируется следующими способами:

- набором последовательных разноглубинных срезов, т.е. георадиолокационными планами территории (слайсами), показывающими локализацию на той или иной глубине разнообразных погребенных объектов или неоднородностей грунта;
- * примерами фрагментов георадиолокационных профилей, на которых обнаружены аномалии;
- * видеофайлами, фиксирующими изменение структуры разреза по глубине. Ни один из перечисленных способов визуализации в отдаленности не несет исчерпывающей информации о подземной структуре территории.

Интерпретация георадиолокационных материалов. Все участки георадиолокационной съемки привязывались к планировке местности. Для точного позиционирования рекомендуется выбирать в качестве реперов элементы планировки, четко фиксирующиеся на верхних слайсах 3D-проектов (границы и углы дорожек, углы построек и т.п.).

Наиболее эффектные результаты получены при исследовании некрополя, расположенного на территории

Спасо-Бородинского монастыря на одном из Багратионовых укреплений. На старых фотографиях и планах видны кресты и памятники в большом количестве.

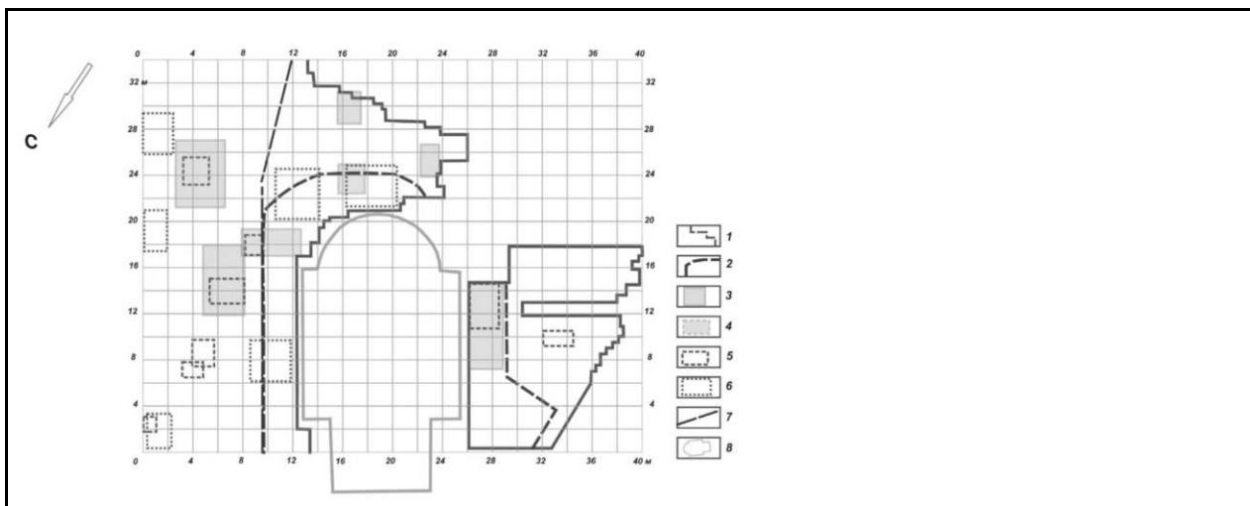
В силу разных причин планировка старых некрополей нередко претерпевала изменения. В такой ситуации наши исследования позволяют восстановить утраченную картину.

Поводом для проведения георадарного сканирования послужило обнаружение при проведении инженерно-геологических работ с внешней стороны часовни Спаса Нерукотворного (усыпальницы Тучковых) кирпичного склепа.

Территория вокруг усыпальницы, доступная для площадного обследования, накрыта двумя 3D-проектами, совмещенными в супер3D-проект. Внутренние контуры закартированной территории отстоят от стен усыпальницы на 0,5 м. Направление съемки - юго-западное. Участок насыщен геофизическими аномалиями, среди которых отмечено и несколько достаточно крупных. Плотное скопление аномалообразующих объектов наблюдается юго-восточнее храма. Часть из них отличается волновым обликом, характерным для склепов монастырских кладбищ. Это небольшие, вероятно, полые погребенные конструкции. Крупные малоконтрастные аномалии могут соответствовать местам разрушенных захоронений.

Следует отметить наиболее контрастную аномалию, которая нами интерпретируется на основании старых планов как фамильный склеп князей Волконских.

На поверхности места выявленных геофизических аномалий ничем не примечательны. Итоговая картина представлена на рис. 1.



Исследования других участков внутри ограды Спасо-Бородинского монастыря позволили выявить ряд аномалий, существенных для проведения инженерно-геологических исследований в целях восстановления первоначального облика планировки обители.

Был также исследован прилегающий к монастырю некрополь, расположенный за пределами ограды. Здесь можно выделить аномалию на самой границе заасфальтированной площадки.

Исследование окрестностей батареи Раевского. При изучении территории севернее монумента на батарее Раевского, было выделено несколько многообещающих аномалий. Соображения в пользу выбора этих участков как объектов исследования были основаны, во-первых, на свидетельствах об использовании для захоронений так называемых волчьих ям - системы выкопанных препятствий в виде глубоких траншей, опоясывающих центральный люнет, во-вторых, на информации А.В. Горбунова о том, что севернее батареи Раевского на старой французской карте, сделанной сразу после наполеоновского нашествия, находился небольшой овраг, который отсутствует на более поздних картах, что позволяло надеяться на его использование в качестве места захоронения погибших французских воинов, наступавших с этой стороны на батарею. К сожалению, две раскопанные в окрестности Главного монумента аномалии не дали положительного результата, и их можно отнести к особенностям геологического строения камового холма и окружающего его ландшафта. Неудача в данном случае является стимулом для дальнейших исследований и применения новых методов поиска.

Разработка технологии автоматизации площадной георадарной съемки. Идея объединить в одной системе высокоточный GPS/ Глонасс-приемник и георадар (равно как и магнитометр или другое оборудование) давно успешно реализуется для получения качественных геофизических данных на археологических памятниках.

В рамках наших исследований на Старо-Рязанском археологическом комплексе нами в сотрудничестве с компанией «АТВ Алексарт» создается Георадарный роботизированный комплекс для автоматизации площадной съемки.

1. Компоненты системы.

Комплекс включает в себя следующее оборудование:

а) георадар SIR-3000 с набором антенн 5103, 5104 и 5106, которые каждая в отдельности могут быть задействованы при георадарной съемке;

б) два GPS/Глонасс-приемника Махог, один из которых устанавливается стационарно и посредством радиомодема передает дифференциальные поправки второму (подвижному), который располагается на самоходном шасси вместе с георадаром и антенной. При этом, если местность открытая и незалесенная, обеспечивается сантиметровая точность позиционирования системы;

в) собственно самоходное шасси (на базе квадрантика) с бензиновым мотором, большим запасом хода, бортовым компьютером и блоком радиуправления. Предполагается исследовать относительно ровную поверхность;

г) внешний компьютер, на который по WI-FI передается информация о положении прибора и видеокартинка с экрана георадара.

2. Функциональное назначение.

Прибор осуществляет георадарную съемку с помощью георадара SIR-3000 и антенн с частотой сигнала 200, 270, 400 МГц. При этом управление осуществляется по двум схемам: 1) управление с помощью джойстика, с записью георадарных данных и координат местонахождения в память блока управления георадара SIR-3000. Процесс управления обеспечивается с помощью связи WI-FI. В этой ситуации совершенно необязательно, чтобы оператор находился в непосредственной близости от прибора. Он может быть далеко и управлять роботом посредством интернета;

2) полностью автоматизированная площадная съемка, когда управление движением прибора осуществляет бортовой компьютер, в который подаются данные высокоточного GPS/Глонасс-приемника. Бортовой компьютер обеспечивает зигзагообразное перемещение антенны георадара и включение режима георадарной съемки на прямых участках траектории.

При этом можно задавать программно расстояния между георадарными профилями, их длину и все параметры качества съемки.

При такой съемке посредством WI-FI мы получаем на удаленном компьютере траекторию движения робота и видеокартинку с прибора.

В этой ситуации оператор также может находиться на значительном расстоянии.

По результатам такой съемки строится трехмерная модель геомассива исследованной территории с точной (до сантиметров) привязкой выявленных объектов к местности и создается высокоточная карта микрорельефа местности.

Траектория движения прибора обладает свойством повторяемости в том смысле, что, если мы захотим ее воспроизвести через некоторое время в целях реализации полученных аномалий, мы легко можем это сделать. Используемый нами GPS/Глонасс-комплект приемников позволяет обеспечить сантиметровую точность позиционирования в режиме RTK.

3. Предполагаемые области применения.

а) для автоматизации поиска погребенных под землей археологических объектов (Старая Рязань и Бородинское поле);

б) для картирования неглубоких (до 4-7 м) рек и озер со льда.

Дело в том, что в водоемах с не очень грязной водой георадар видит, во-первых, толщину льда, во-вторых, стратифицирует донные отложения, в-третьих, различает инородные объекты в донных отложениях.

В первую очередь речь идет о затонувших старых ладьях и крупных металлических объектах на дне водоемов, в частности в местах переправы Нея через Днепр, а также Наполеона и его войск через Березину.

В силу повторяемости результатов позиционирования возможен выход на места аномалий в теплое время года для прямого исследования и подъема на поверхность предметов.