

УДК 550.372

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРА В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ БОЛГАРСКОГО  
ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО МУЗЕЯ-ЗАПОВЕДНИКА***К.И. Бредников, Д.И. Хасанов***Аннотация**

Описаны результаты применения георадара для изучения погребенных памятников архитектуры на примере археологических исследований Болгарского государственного историко-архитектурного музея-заповедника (Республика Татарстан). Выделенные на радарограммах и амплитудных срезах аномалии волнового поля сопоставлены с трехмерными моделями археологических раскопов. Показана возможность выделения не-контрастных аномалий, связанных с элементами архитектурной планировки размерами до полуметра. На примере нескольких объектов выработана оптимальная методика полевых георадиолокационных работ.

**Ключевые слова:** георадар, подповерхностная радиолокация, радарограмма, амплитудный срез, волновое поле, преобразование Гильберта, относительная диэлектрическая проницаемость, центральная частота.

**Введение**

На сегодняшний день практически все крупные зарубежные археологические исследования не обходятся без применения георадиолокации. Причина такой популярности кроется в том, что по сравнению с другими геофизическими методами (электротомографией, магнитометрией, и пр.), применяя георадар, возможно получать информацию о подповерхностном строении с очень высоким разрешением [1–4]. Кроме того, раскопки археологических памятников обычно приводят к частичному разрушению остатков древних архитектурных конструкций, или вскрытию нежелательных объектов (современных инженерных коммуникаций, кабелей, и трубопроводов), в то время как дистанционные геофизические методы исследования позволяют избежать этого [5–7].

Болгарский государственный историко-архитектурный музей-заповедник является объектом исторического и культурного наследия федерального (общероссийского) значения и особо ценным объектом культурного наследия Республики Татарстан.

На территории заповедника при археологических изысканиях георадар использовался в режиме площадной съемки. А именно, производились измерения по серии параллельных профилей, а затем, программно восстанавливался геомассив информации (трехмерный георадиолокационный куб данных).

Исходя из размеров объектов поиска (5–10 м в длину и ширину), средний размер рядового участка георадиолокационных исследований составил 4200 м<sup>2</sup> (70 × 60 м).

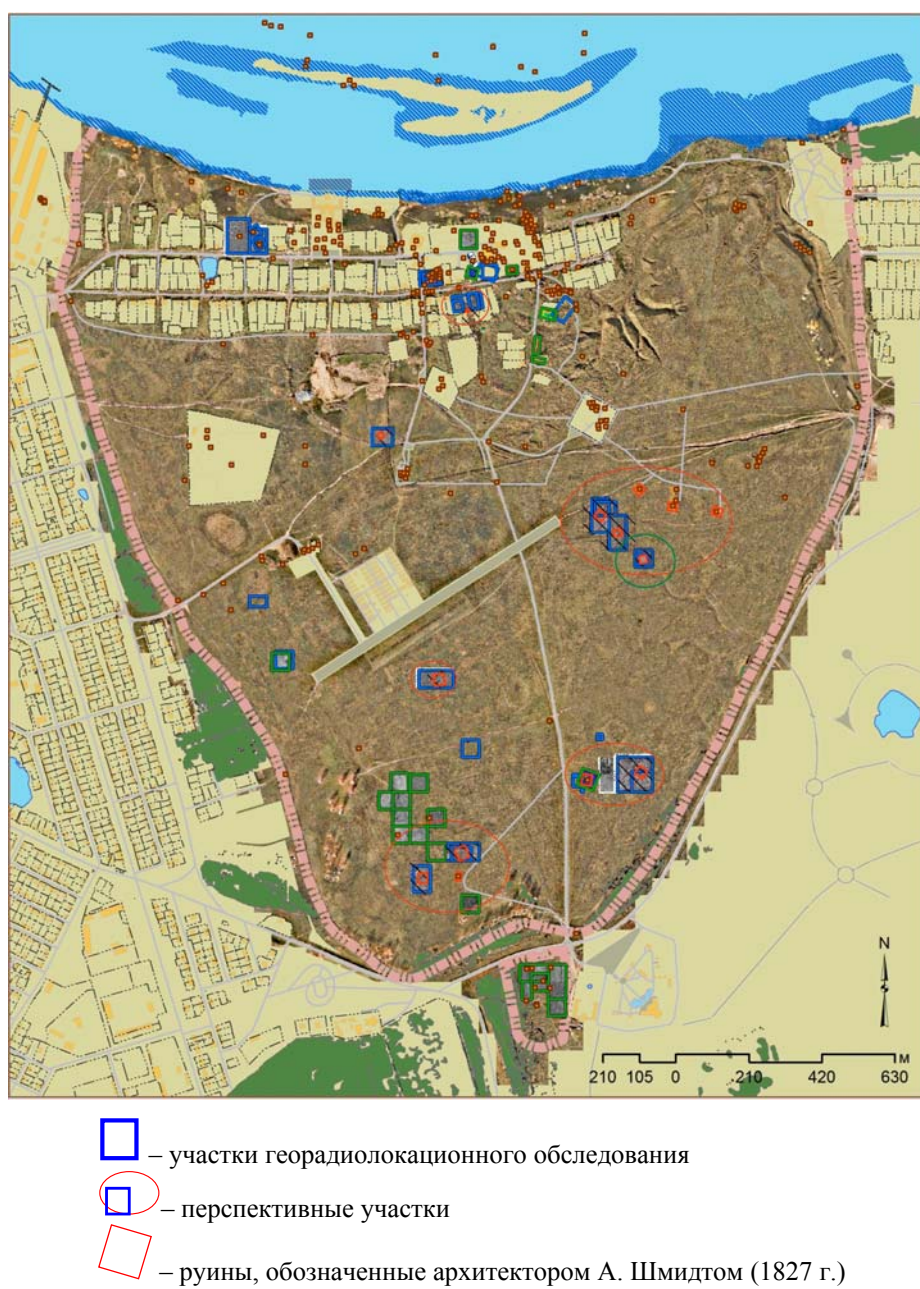


Рис. 1. Схема участков георадиолокационных исследований за 2013 год

Всего в 2013 г. было исследовано порядка 82000 м<sup>2</sup> территории заповедника. Обнаружен ряд объектов, которые по косвенным признакам можно отнести к погребенным архитектурным строениям или следам застройки, часть из объектов была вскрыта раскопами. В дальнейшем с помощью фотограмметрии построены трехмерные модели раскопов. Границы слоев и строений, выделенные на моделях, сопоставлены с границами аномалий по результатам георадиолокационных исследований.

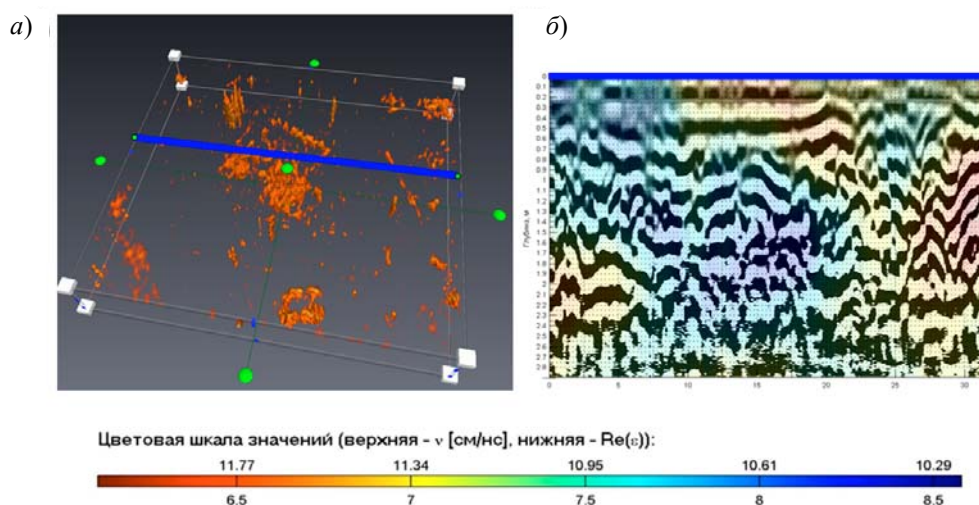


Рис. 2. Изоповерхности, построенные по максимумам относительной диэлектрической проницаемости (а); разрез расчетной относительной диэлектрической проницаемости, наложенный на вертикальный волновой срез (б)

### Техника и методика проведения работ

Георадиолокационные исследования производились георадаром ProEx фирмы MALA GeoScience Inc. по системе профилей над экспериментальным участком работ. Привязка профилей на местности осуществлялась с помощью одометра. Выбор антенн был продиктован глубиной исследований, а также мощностью культурного слоя. Использовались экранированные щелевые антенны с центральной частотой 250 МГц. Шаг между точками записи был выбран равным 10 см. В ходе опытных работ для повышения информативности записи была выбрана оптимальная сеть наблюдений для набора массива георадиолокационных данных. Шаг между профилями составил 50 см [5, 8, 9].

Поскольку погребённые останки культурного наследия являются трехмерными объектами, наиболее предпочтительной при археологических исследованиях является плановая съёмка. Георадиолокация с одним антенным блоком производилась по отдельным перспективным площадкам и участкам, намеченным для проведения раскопок (рис. 1) [5].

Зачастую неразрешенная картина волнового поля над объектом и отсутствие четких границ связаны с неправильным выбором сети наблюдения. Для антенн с центральной частотой 250 МГц глубина исследований неконтрастных границ в суглинистом разрезе составляет порядка 2–3 м. Длина волны в среде составляет первые десятки сантиметров.

Соответственно, для обеспечения максимальной разрешенности волновой картины достаточно проводить георадиолокационную съёмку с одноволновым или полуволновым шагом между профилями, в 30–50 см. Такая плотность сети наблюдений несколько увеличивает время работы, однако разрешенность горизонтальных амплитудных срезов существенно повышается.

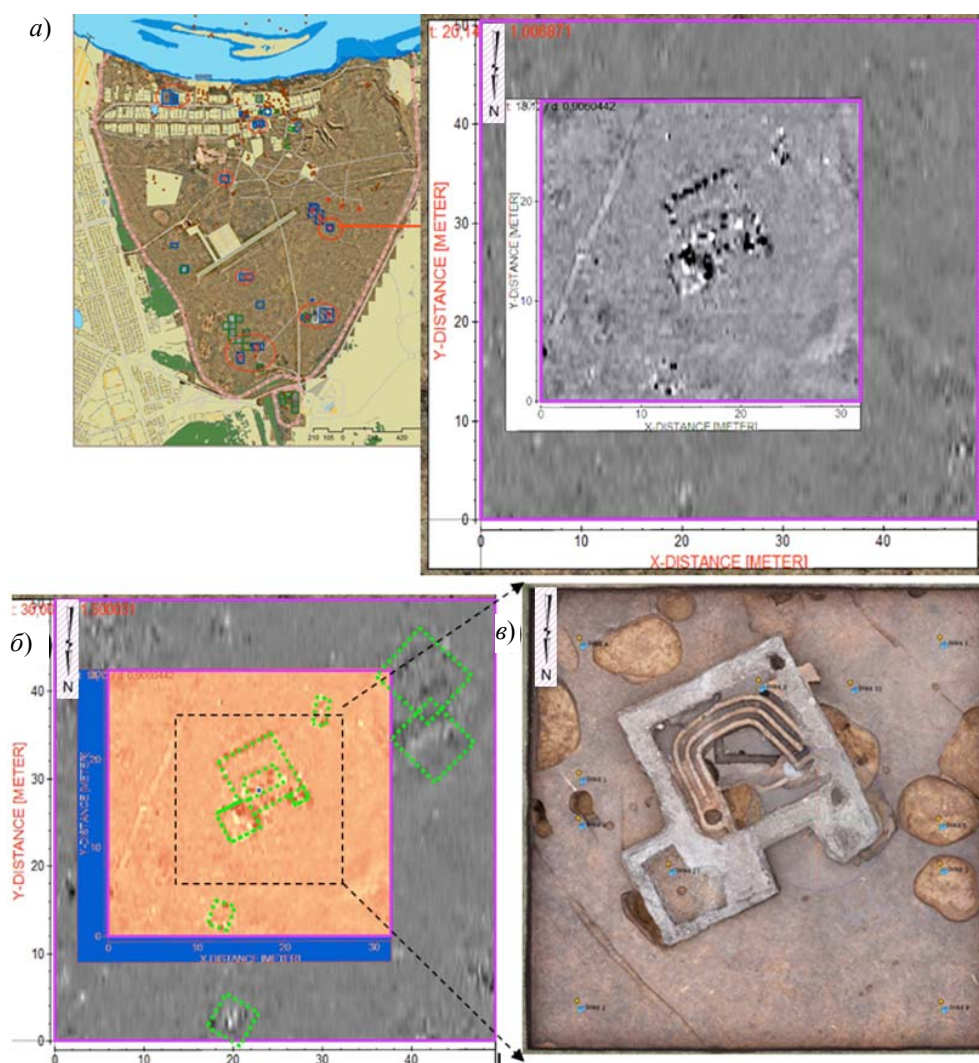
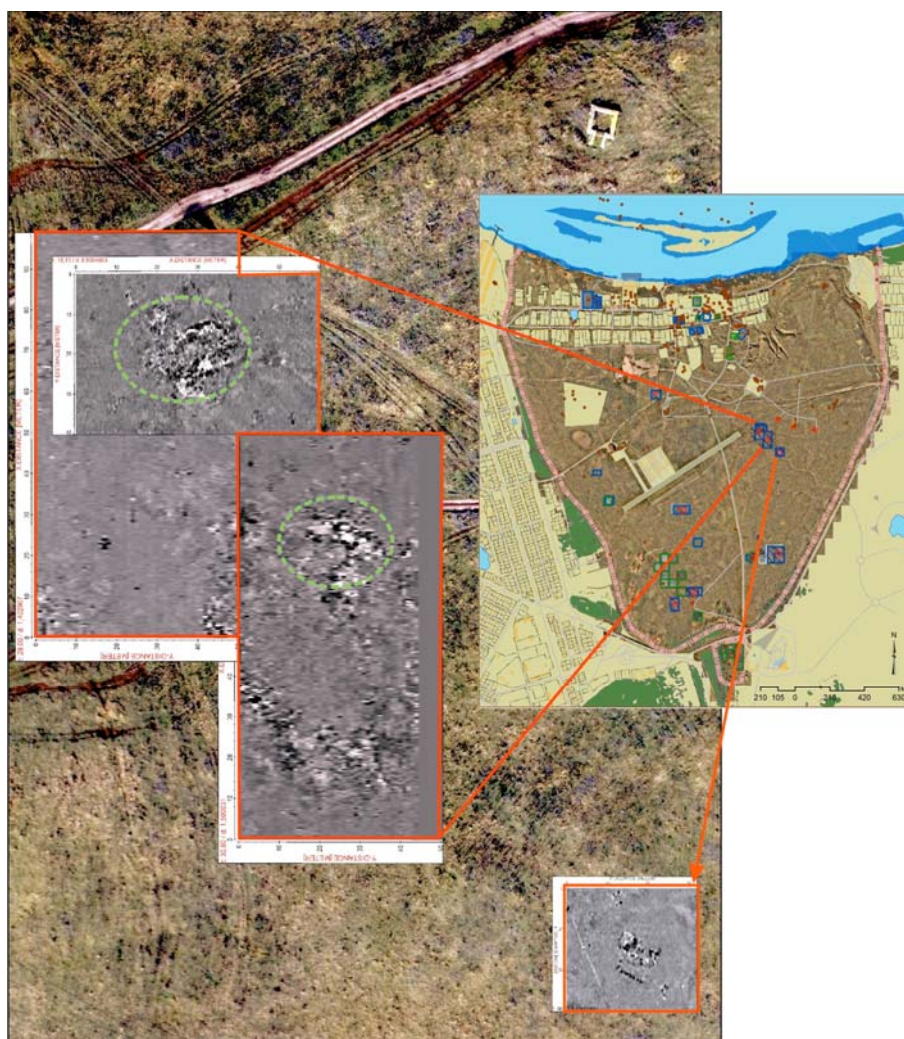


Рис. 3. Выделенное по результатам георадиолокации строение. Амплитудные срезы на глубине 0.2 м (а), на глубине 0.5 м (б). Результат фотограмметрической обработки (ортофотоплан) раскопа СХСIV на уровне материка (в). Шаг между профилями 0.5 м [14]

Обработка радарограмм их сборка в геомассивы данных и последующая интерпретация производились в полуавтоматическом режиме в ReflexW 7.0, частично в RadExplorer, визуализация и постобработка в VSG Avizo Fire 7 [10, 11].

Изучались горизонтальные волновые и амплитудные (после преобразования Гильберта) срезы георадиолокационных массивов данных на предмет наличия аномалий волнового поля с косвенными признаками архитектурной планировки. Перспективные объекты выделялись на различной глубине по форме аномального поля, относительному понижению диэлектрической проницаемости и затуханию сигнала [1, 2, 5, 6, 12].

Использовавшийся строительный материал (известняк) во влажном состоянии по диэлектрическим характеристикам в некотором диапазоне сопоставим с вмещающими их породами – супесями и суглинками, что усложнило интерпретацию




 – перспективные объекты по результатам георадарной съемки, предположительно, остатки руин, выделенных А. Шмидтом.

Рис. 4. Поиск руин, обозначенных историком археологом А. Шмидтом в конце XIX в.

полученных радарограмм и определение природы получаемых аномалий. Глубины исследования находились в интервале от 0.2 до 1.2 м. Хозяйственные ямы, остатки деревянных конструкций и сильно разрушенных каменных строений, все эти объекты сходны по электрофизическим характеристикам с вмещающими их породами. Поэтому предпочтение отдавалось выявлению аномалий на горизонтальных амплитудных срезах и определению их природы, рассчитывая количественные характеристики по вертикальным волновым срезам, секущим аномалии (рис. 2) [2, 8, 9–13].

Как видно из рис. 2 и 3, направление стен предполагаемого строения – с юго-запада на северо-восток. Строение в длину 8 м, в ширину 6–7 м (рис. 3). Вокруг руин отмечено еще несколько объектов, которые, возможно, являются захоронениями или хозяйственными постройками.

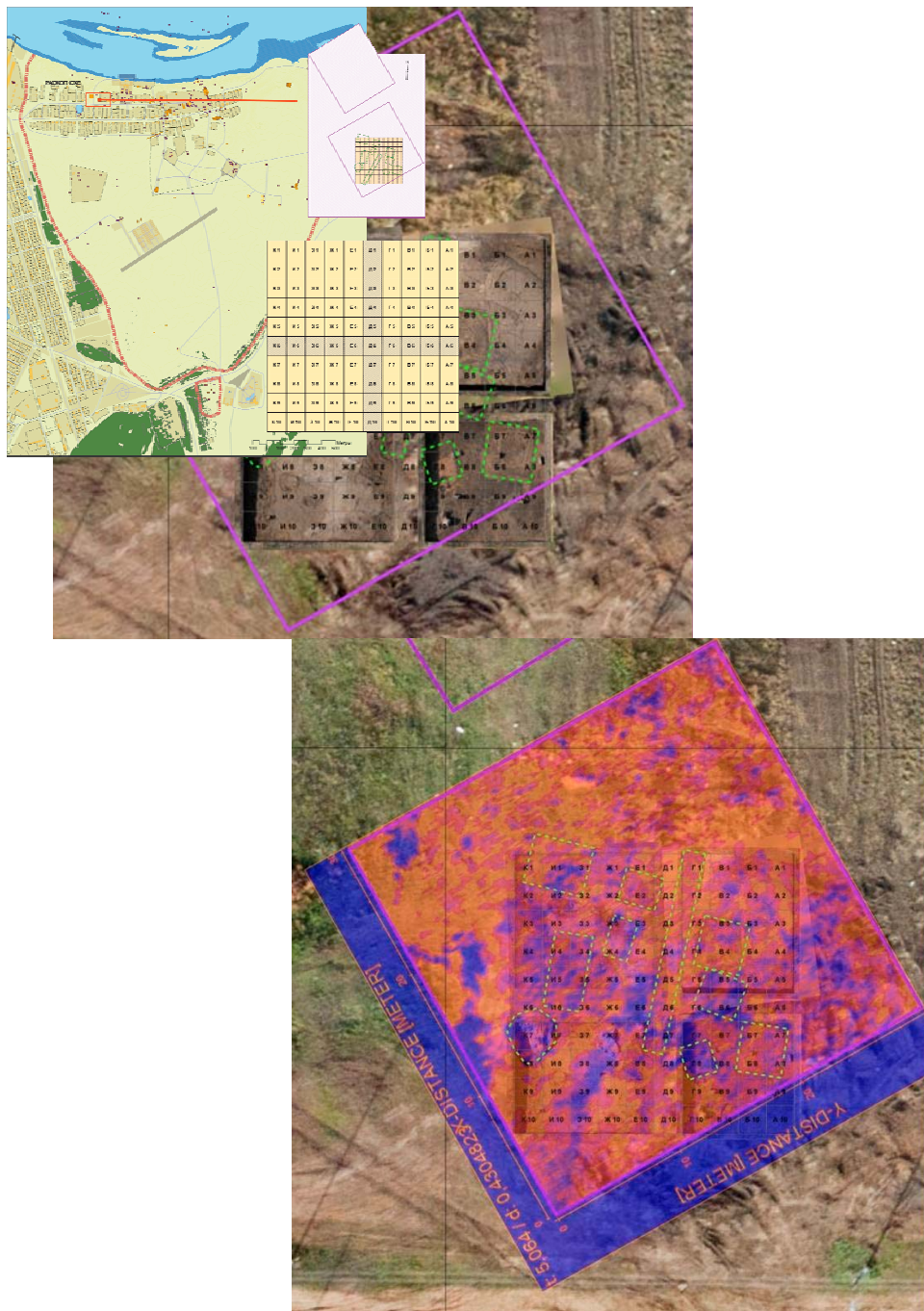


Рис. 5. Раскоп СХСИ, глубина среза 0.5 м, сопоставление с выделенными границами объектов по результатам детализационной георадиолокационной съемки

По описанию эти объекты совпадают со вскрытыми во время археологических раскопок, выполненных в 2013 г. Институтом истории АН РТ на территории Болгарского историко-архитектурного музея-заповедника: «Остатки монументального здания в плане квадратной формы  $7 \times 7$  м с северо-западного угла

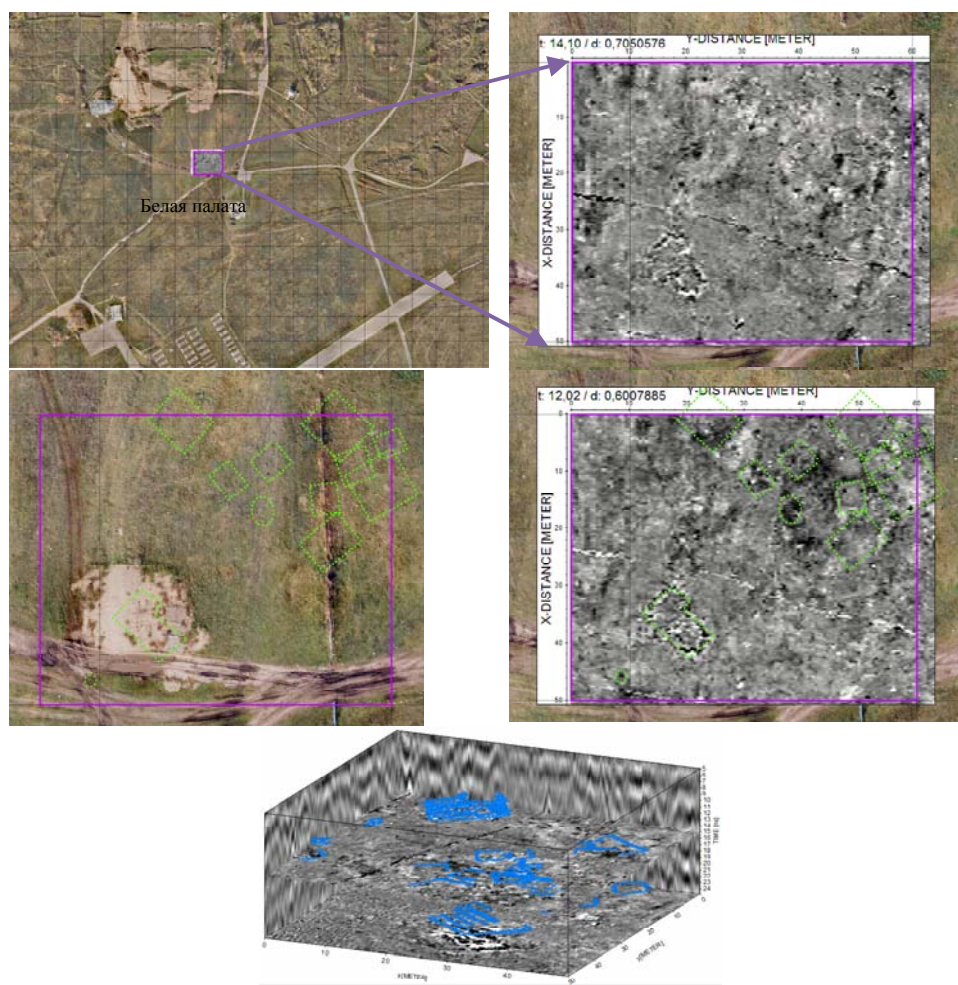


Рис. 6. Элементы жилой застройки 50 м севернее Белой палаты

имеют дополнительное строение квадратной формы  $3 \times 3$  м. Здание имело канную отопительную систему, проходящую вдоль западной, южной и восточной стенок, печь располагалась с западной стороны входа, устроенного в северной стене. Каналы кана и печь сложены из сырцовых кирпичей, скрепленных глинистым раствором. Здание предположительно является мечетью, функционировавшей в 50–60-е гг. XIV в. До строительства каменного здания на этом же месте располагалось другое наземное деревянное сооружение, также с канной отопительной системой. Оно являлось центральной постройкой усадьбы, огороженной деревянной оградой» [14].

На двух смежных площадях ( $50 \times 100$  м) также обнаруживаются сходные аномалии, предположительно, остатки каменных строений, видимо, плохо сохранившиеся, в сильно разрушенном состоянии (рис. 4). Они прослеживаются в интервале глубин 0.2–0.5 м и имеют довольно нечеткие границы и сравнительно малую мощность (0.2–0.4 м).

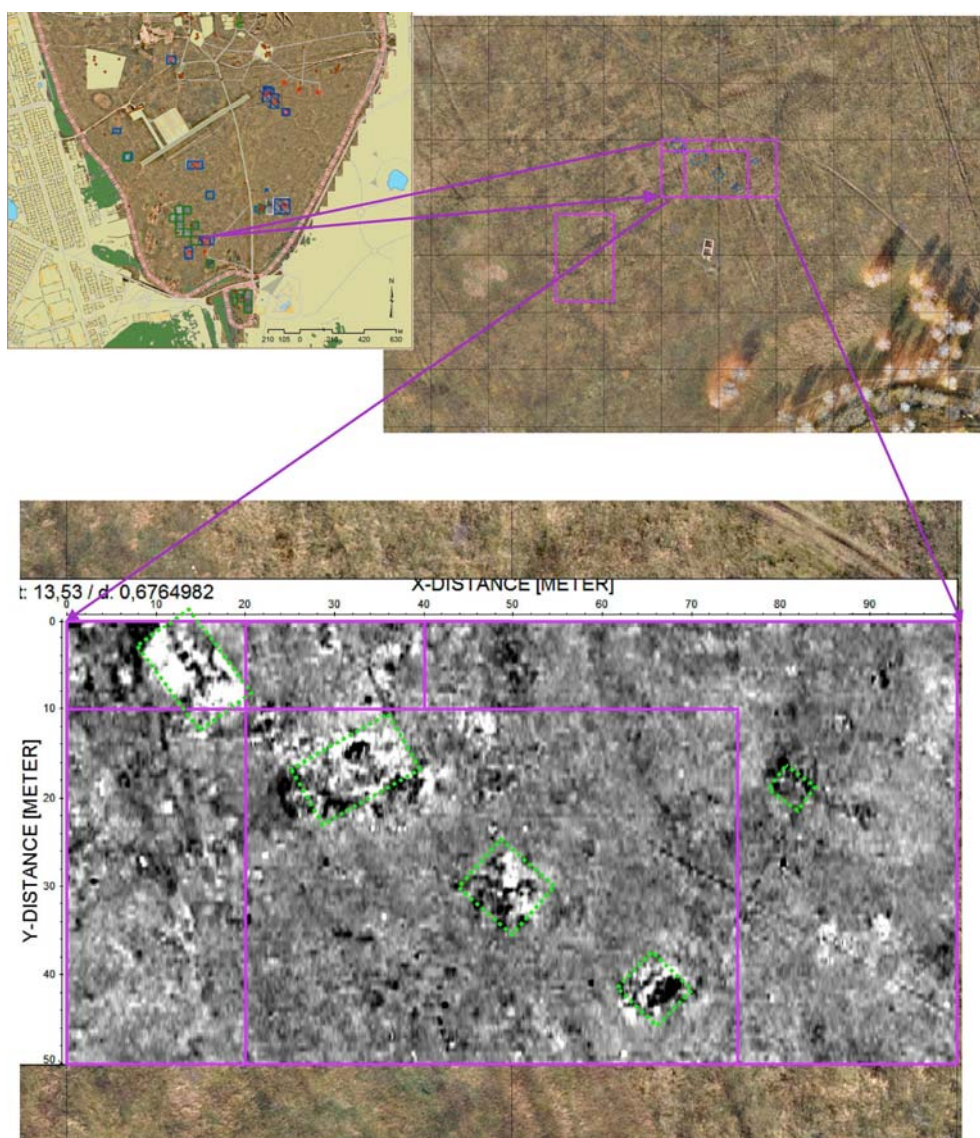


Рис. 7. Участок в 40 м на север от законсервированного мавзолея

Еще на одном участке исследований (месте раскопа будущего СХСИ) удалось проследить ряд объектов правильной геометрической формы с элементами архитектурной планировки (подклети). Было отмечено также большое количество ям и неоднородностей, связанных с разуплотнением грунта неизвестного происхождения (рис. 5).

По глубине залегания большинство перспективных объектов, вероятно, относятся к золотоордынскому периоду.

Объекты, близкие к прямоугольной форме, вероятнее всего, являются подклетами древних строений и имеют сравнительно небольшую мощность. (0.2–0.4 м) Объекты неправильной округлой формы имеют различную мощность (0.2–1.2 м), скорее всего, соответствуют хозяйственным ямам и погребам.



### **Обнаруженные неизвестные археологические объекты, которые пока не вскрывались раскопами**

В ходе полевых исследований было обнаружено несколько перспективных подземных объектов с архитектурными признаками, которые пока решено было не вскрывать.

Это участок 50 м севернее Белой палаты. Перспективный участок поиска археологических объектов расположен севернее руин Белой палаты. Площадь георадиолокационных исследований составила 3100 м<sup>2</sup> (рис. 6). Здесь явно прослеживаются следы застройки. На юго-западе планшета георадиолокационной съемки отчетливо видны правильные контуры аномального объекта, 12 м в длину и 9 в ширину, на глубине 0.5–1.1 м.

Отдельно от постройки на северо-востоке участка на различных глубинах располагается множество правильной формы следов вероятной застройки (подклеты).

Интерес представляет также площадь, обследованная на юге городища, в 40 м от законсервированного мавзолея. Площадная съемка на данном участке показала наличие регулярных аномалий, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга (12–14 м) в одном направлении на глубинах 0.6–1.1 м. Однако ввиду наличия рядом следов водовода и большой амплитуды отраженных сигналов весьма вероятно, что данные объекты могут являться остатками современного строительства (рис. 7).

### **Выводы**

В ходе работ была отработана методика полевых исследований с использованием георадара. Оптимальный для поисковых объектов (погребенных строений) шаг между профилями составил 0.5 м. При интерпретации радарограмм показана необходимость как анализа информации об одиночных профильных измерениях, так и планового изучения горизонтальных амплитудных срезов для поиска погребенных останков зданий.

Произведено также сравнение выделенных аномалий волнового поля с объектами, полученными по результатам вскрытия археологическими раскопами. На примере выполненных работ показана эффективность проведения георадиолокационных исследований непосредственно перед проведением раскопок. Большая часть выделенных аномалий совпала с положением вскрытых археологических объектов. Намечен ряд перспективных участков для проведения дальнейших археологических исследований.

### **Литература**

1. *Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. – 153 с.
2. *Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С.* Теория и методы георадиолокации. – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2008. – 196 с.
3. *Маништейн А.К.* Малоглубинная геофизика. – Новосибирск: НГУ, Геол.-геофиз. фак., 2002. – 135 с.

4. Золотая Л.А., Бобачев А.А., Модин И.Н., Хмелевской В.К. Основные задачи и подходы в отечественной инженерной геофизике // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 2. – С. 2–5.
5. Kim J.-H., Yi M.-J., Son J.-S., Cho S.-J., Park S.-G. Effective 3-D GPR Survey and Its Application to the Exploration of Old Remains. – URL: [http://geoelectra.kigam.re.kr/v2/publication/file2/IGARSS\\_ЖНКiim.pdf?](http://geoelectra.kigam.re.kr/v2/publication/file2/IGARSS_ЖНКiim.pdf?), свободный.
6. Ключко А.А., Шишков Д.Л., Чернецов А.В. Георадиолокационные исследования на Старорязанском городище // Труды II (XVIII) Всерос. археол. съезда в Суздале. – М.: ИА РАН, 2008. – Т. III. – С. 270–272.
7. Разработка методики георадиолокационных поисков, обследования и реконструкции объектов наследия – URL: <http://www.geog.ru/>, свободный.
8. Гайкович К.П., Максимович Е.С., Бадеев В.А. Микроволновая подповерхностная голография сплошных диэлектрических объектов // Журн. радиоэлектроники. – 2012. – № 6. – URL: <http://jre.cplire.ru/koi/jun12/2/abstract.html>, свободный.
9. Valle S., Friborg J. Ground penetrating radar antenna characterization // Convegno Nazionale di Geofisica della Terra Solida. – 1998. – URL: <http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegniprecedenti/1998/Contents/ordinari/13/svalle.pdf>, свободный.
10. Sandmeier Scientific Software. – URL: <http://www.sandmeier-geo.de/>, свободный.
11. Программа автоматизированной обработки георадиолокационных данных «Георадар-эксперт» – URL: <http://www.georadar-expert.ru/>, свободный.
12. Klochko A., Shishkov D. Development of new technology for virtual georadar modeling of archaeological memorials // “Making History Interactive” 37th Annual Int. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archeology (CAA). Abstr. – Williamsburg, Virginia, USA, 2009.
13. Копейкин В.В. Обратная задача георадиолокации // Фонд подводных геофизических исследований. – URL: <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>, свободный.
14. Волков И.В., Лопан О.В., Ситдииков А.Г. Раскоп СХСIV // Археологические исследования 2013 г.: Болгар и Свияжск. – Казань: ИА АН РТ, 2014. – С. 20–21.

Поступила в редакцию  
24.01.14

---

**Бредников Константин Игоревич** – инженер кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.  
E-mail: [b\\_kon@mail.ru](mailto:b_kon@mail.ru)

**Хасанов Дамир Ирекович** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.  
E-mail: [damir.khassanov@mail.ru](mailto:damir.khassanov@mail.ru)

\* \* \*

#### RESULTS OF GPR SURVEYS IN THE BOLGAR STATE HISTORICAL AND ARCHITECTURAL MUSEUM RESERVE

*K.I. Brednikov, D.I. Khasanov*

#### Abstract

The paper describes the results of using ground-penetrating radar (GPR) to study buried architectural monuments based on the example of the archaeological research conducted in the Bolgar State Historical and Architectural Museum Reserve (Republic of Tatarstan). The wavefield anomalies identified on the

radargrams and amplitude slices are compared with the 3D models of the archaeological excavation sites. The possibility to identify un-enhanced anomalies associated with the elements of architectural planning, up to half a centimetre in size, is shown. Using the example of several archaeological sites, an optimal method of field GRP investigation is chosen.

**Keywords:** ground penetrating radar, subsurface radio positioning, radargram, amplitude slice, wave field, Hilbert transform, relative dielectric permittivity, central frequency.

#### References

1. Vladov M.L., Starovoitov A.V. Introduction to Ground-Penetrating Radar. Moscow, Izd. Mosk. Univ., 2004. 153 p. (In Russian)
2. Izyumov S.V., Druchinin S.V., Voznesenskii A.S. Theory and Methods of Ground Penetrating Radar. Moscow, Izd. Mosk. Gos. Gornogo Univ., 2008. 196 p. (In Russian)
3. Manshtein A.K. Near-Surface Geophysics. Novosibirsk, NGU, Geol.-Geofiz. Fakultet, 2002. 135 p. (In Russian)
4. Zolotaya L.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Khmelevskoi V.K. Basic problems and approaches in engineering geophysics of our country. *Razvedka i okhrana nedr*, 2005, no. 2, pp. 2–5. (In Russian)
5. Kim J.-H., Yi M.-J., Son J.-S., Cho S.-J., Park S.-G. Effective 3-D GPR Survey and Its Application to the Exploration of Old Remains. Available at: [http://geolectra.kigam.re.kr/v2/publication/file2/IGARSS\\_JHKiim.pdf?](http://geolectra.kigam.re.kr/v2/publication/file2/IGARSS_JHKiim.pdf?)
6. Klochko A.A., Shishkov D.L., Chernetsov A.V. Ground penetrating radar investigations in the Old-Ryazan ancient settlement. *Trudy II (XVIII) Vseros. arkheol. siezda v Suzdale* [Proc. II (XVIII) All-Russ. Archaeol. Congress in Suzdal], Moscow, IA RAN, 2008, vol. III, pp. 270–272. (In Russian)
7. Development of methodology for the ground-penetrating radar search, survey and reconstruction of heritage objects. Available at: <http://www.geor.ru/>. (In Russian)
8. Gaikovich K.P., Maksimovich E.S., Badeev V.A. Microwave subsurface holography of solid dielectric object. *Zhurnal radioelektroniki*, 2012, no. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/koi/jun12/2/abstract.html>. (In Russian)
9. Valle S., Friborg J. Ground penetrating radar antenna characterization. *Convegno Nazionale di Geofisica della Terra Solida*. 1998. Available at: <http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegni-precedenti/1998/Contents/ordinari/13/svalle.pdf>.
10. Sandmeier Scientific Software. Available at: <http://www.sandmeier-geo.de/>.
11. GEORADAR-EXPERT program for automated processing of GPR data. Available at: <http://www.georadar-expert.ru/>. (In Russian)
12. Klochko A., Shishkov D., Development of new technology for virtual georadar modeling of archaeological memorials. “*Making History Interactive*”, 37th Annual Int. Conf. on Computer Applications and Quantitative Methods in Archeology (CAA). *Abstr.*, Williamsburg, Virginia, USA, 2009.
13. Kopeikin V.V. Inverse Problem in Ground Penetrating Radar. *Fond podvodnykh geofizicheskikh issledovaniy* [Collection of Underwater Geophysical Studies]. Available at: <http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>. (In Russian)
14. Volkov I.V., Lopan O.V., Sitdikov A.G. Excavation site CXCIV. *Arkheologicheskie issledovaniya 2013 g.: Bolgar i Sviyazhsk* [Archaeological Studies of 2013: Bolgar and Sviyazhsk], Kazan, IA AN RT, 2014, pp. 20–21. (In Russian)

Received  
January 24, 2014

---

**Brednikov Konstantin Igorevich** – Engineer, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: [b\\_kon@mail.ru](mailto:b_kon@mail.ru)

**Khasanov Damir Irekovich** – PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: [damir.khasanov@mail.ru](mailto:damir.khasanov@mail.ru)