УДК 550.8.05

© А.Г. Злобина, И.В. Журбин

А.Г. Злобина, И.В. Журбин

КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ И ПРИНЦИПЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ

Введение

Геофизика широко используется при неразрушающих исследованиях объектов историко-культурного наследия. Основная задача состоит в поиске остатков различных древних сооружений в верхней части геологического разреза. Учитывая, что большинство археологических памятников в значительной степени разрушены хозяйственной деятельностью XX века и неоднозначно выражены на современной поверхности, геофизика является практически единственным эффективным способом предварительного определения их границ и планировки. Решение этой задачи особенно актуально с точки зрения сохранения историко-культурного наследия России [1].

Влияние мешающих факторов (антропогенные изменения естественной структуры вмещающего грунта и приповерхностные неоднородности, современные постройки, локальные включения природного происхождения, норы грызунов и т.п.) существенно осложняет интерпретацию геофизических данных [2, с. 236-237]. Поэтому при исследовании археологических памятников необходима разработка специальных подходов, учитывающих специфику объектов историко-культурного наследия. Их применение позволит существенно снизить неоднозначность истолкования результатов геофизических исследований.

Ошибки интерпретации геофизических данных

При интерпретации результатов геофизической съемки принято различать ошибки первого и второго рода [3, с. 22]. *Ошибки первого рода* возникают, когда опровергается верная гипотеза о наличии объекта. Основной причиной таких ошибок объекта является избирательная чувствительность каждого из геофизических методов. Например, как показывает многолетний опыт изучения археологических памятников Великобритании, применение магниторазведки не эффективно при поиске подземных пустот; электроразведка, как правило, не фиксирует наземные очаги и участки прокала, а использование георадара дает неоднозначные результаты по обнаружению древних рвов и канав [4, p. 14]. Ограничения электро- и магниторазведки, георадарной съемки (основных методов археологической геофизики) выявлены также при изучении археологических памятников различных регионов России – Алтая и Западной Сибири [5], Зауралья [6], Предуралья [7] и средней полосы России [8]. Комплексирование позволяет уменьшить количество ошибок первого рода. Такой подход известен и широко применяется при исследовании исторических территорий [2, с. 237-242]. Очевидно, что геофизический комплекс, который используется для конкретного памятника, должен формироваться с учетом априорной информации о степени сохранности культурного слоя, физических и геометрических характеристиках археологических объектов планировки, ландшафтных и геологических условиях территории обследования и пр.

Возникновение *ошибок второго рода* связано с отрицанием конкурирующей гипотезы. С точки зрения интерпретации – на основании «ложной» аномалии принимается решение о наличии объекта поиска. «Ложные» аномалии могут быть вызваны приповерхностными неоднородностями грунта (строительный и бытовой мусор, норы грызунов и т.п.) или локальными включениями природного происхождения (скопления камней и выходы известняка, песчаные линзы и пр.). Чаще всего такие аномалии выявляются только одним из методов, включенных в геофизический комплекс, и, исходя из априорных сведений об объектах поиска (размер, форма, амплитуда ожидаемой аномалии), могут рассматриваться как достоверные, то есть связанные с археологическим объектом в грунте. Безусловно, интерпретация проводится после фильтрации влияния регионального фона, локальных помех и ступенчатообразных искажений [9, 10]. Корректность интерпретации таких неоднозначных аномалий позволяют оценить раскопки или почвенные бурения. Но проверочные

земляные работы на участках всех неоднозначных аномалий недопустимы, так как приводят к существенным разрушениям археологического памятника [11]. Это не согласуется с концепцией сохранения историко-культурного наследия. Альтернативой массовых проверочных раскопок могут являться дополнительные геофизические измерения на условно аномальном участке (например, применение электротомографии [12, рис. 7в] или георадарной съемки [6, рис. 5]). Для сопоставимости данных необходимо обеспечить первоначальные условия съемки (настройка измерительной аппаратуры, сеть наблюдений и пр.) при близких параметрах среды (фоновая влажность грунта, температура и пр.) [13].

В целом неоднозначность интерпретации данных вызвана комплексом объективных причин: ограничениями геофизических методов и существенной неоднородностью культурного слоя археологических памятников. Поэтому актуальна разработка алгоритма исследований, позволяющего уменьшить количество ошибок первого и второго рода и, соответственно, повысить качество неразрушающих исследований объектов историко-культурного наследия.

Алгоритм комплексных геофизических исследований

Алгоритм комплексных геофизических исследований археологических памятников включает три этапа: измерения, обработка и интерпретация (рис. 1). На *этапе измерений* проводится геофизическая съемка методами электро- и магниторазведки, которые наиболее эффективны для поиска археологических объектов [2, с. 238]. Их комплексное применение позволяет обнаружить широкий круг объектов разной структуры и состава: остатки оборонительных сооружений, разрушенные постройки бытового, хозяйственного и производственного назначения, печи и очаги и пр.

На *этапе обработки* сегментация полученных геофизических карт позволяет выделить аномалии, связанные с разноплановыми объектами. Здесь учитываются особенности вмещающей среды, влияющие на результат измерений. В частности, современная распашка и последующие эрозионные процессы существенно изменяют мощность культурного слоя на разных участках археологического памятника. Как следствие, объекты поиска одного и того же типа могут вызывать и ярко выраженные и слабоконтрастные аномалии. Например, при анализе данных электропрофилирования на средневековом городище Учкакар (Удмуртская Республика) было показано, что на участках, где культурный слой практически утрачен, ямы хозяйственного и производственного назначения, заглубленные в материк и заполненные гумусированным слоем, маркируются контрастными локальными аномалиями сопротивления. Раскопки подтвердили, что форма аномалий хорошо согласуется с формой объекта в плане [12, рис. 7, 8]. Но на участках с культурным слоем хорошей сохранности (1 м и более) такие же объекты определяют малоконтрастные аномалии сопротивления и могут не выделяться как локальные аномальные области с определенными границами [12, рис. 3]. Это связано с тем, что мощность перекрывающего слоя больше или соизмерима с глубиной самих ям.

В таком случае обработку геофизических данных целесообразно проводить в два этапа: сначала выделить локальные (объекты планировки) и крупномасштабные (участки культурного слоя хорошей сохранности) аномалии, а затем каждую из крупномасштабных аномалий сегментировать отдельно. Эта процедура позволит обнаружить археологический объект в условиях слабой контрастности физических свойств объекта и вмещающей среды.

После этапа обработки проводится *интерпретация* полученных результатов – установление происхождения выявленных аномалий и восстановление планировки археологического памятника. Для этого на основе координатного сопоставления сегментированных геофизических карт определяется местоположение возможных объектов поиска. Если объект зафиксирован только одним методом съемки, то проводятся дополнительные измерения на соответствующих локальных участках. В первую очередь этим обеспечивается уменьшение количества «ложных» аномалий (ошибки второго рода) и повышается качество интерпретации геофизических данных.

Несмотря на то что планировка каждого объекта наследия уникальна и зависит от особенностей развития конкретного древнего поселения, обычно известны общие тенденции, выявленные при изучении других археологических памятников на данной исторической территории (рядовая застройка или хаотичное расположение объектов планировки, компактное расположение комплексов разноплановых объектов и пр.). Как правило, эти сведения используются как *априорная информация* при разработке принципов интерпретации – правил принятия решения, позволяющих сопоставить выделенные аномалии с конкретными археологическими объектами. Эти принципы учитывают форму предполагаемых объектов поиска и соответствующий тип аномалий в условиях исследуемой геологической среды. Использование комплекса сегментированных геофизических карт обеспечивает уменьшение количества ошибок первого рода при выявлении

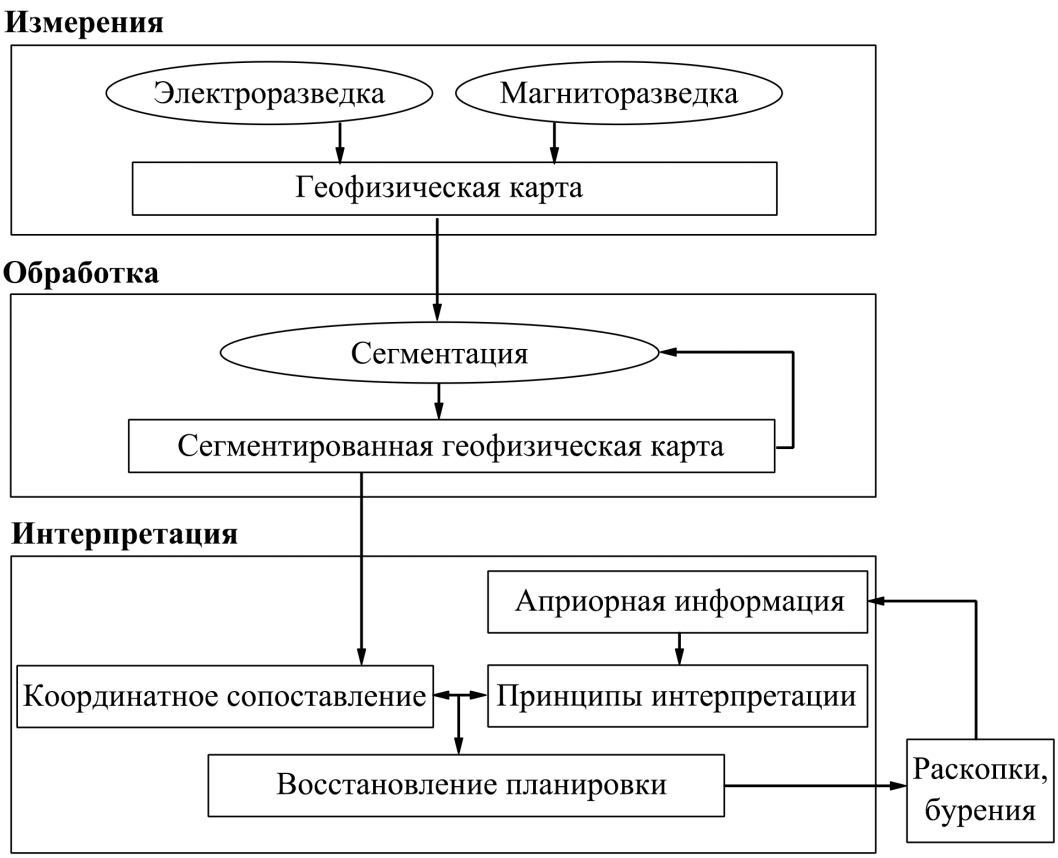

Рис. 1. Алгоритм комплексных геофизических исследований археологических памятников

Fig. 1. Algorithm of complex geophysical surveys of archaeological sites

слабоконтрастных аномалий. Предварительная интерпретация позволяет при необходимости провести ограниченное количество целенаправленных почвенных бурений и дополнить априорную информацию об исследуемой среде.

Натурный эксперимент

Алгоритм комплексных геофизических исследований (рис. 1) был применен при изучении участка Кушманского III селища IX-XIII вв. н.э. (Ярский район, Удмуртская Республика). В результате проведенных измерений (рис. 2a) построены две геофизические карты, отражающие характер изменения электрических (рис. 2b) и магнитных свойств (рис. 2c) грунта.

На этапе обработки для сегментации полученных изображений использован алгоритм нечеткой кластеризации fuzzy c-means [14]. Его применение к данным электропрофилирования (рис. 2b) позволило выявить локальные аномалии высокого сопротивления и крупномасштабную аномалию повышенного сопротивления, вероятно вызванную участком культурного слоя хорошей сохранности (рис. 3a). На магнитограмме (рис. 2c) в отдельные классы выделены диполярные, положительные и отрицательные аномалии (рис. 3c), которые могут быть связаны с разноплановыми археологическими объектами. Повторная сегментация крупномасштабной аномалии электроразведки (рис. 3b) была проведена с целью детализации ее структуры и обнаружения объектов высокого сопротивления на этом участке.

Для интерпретации сегментированных геофизических карт использовалась априорная информация о предполагаемых объектах поиска и параметрах аномалий, которые определяют эти объекты (см. табл. 1), которая получена в результате многолетних археолого-геофизических исследований средневековых поселений на территории Удмуртской Республики [15]. На этой основе с учетом координатного сопоставления аномалий на сегментированных изображениях (рис. 3) была восстановлена планировка Кушманского III селища (рис. 4).

Расположение оборонительного рва поселения определено по аномалии высокого сопротивления дугообразной формы, которая пересекает весь участок геофизической съемки с запада на восток. Данная аномалия координатно сопоставима с диполярной магнитной аномалией, что позволило однозначно определить источник их происхождения. Правомерность интерпретации подтверждают результаты

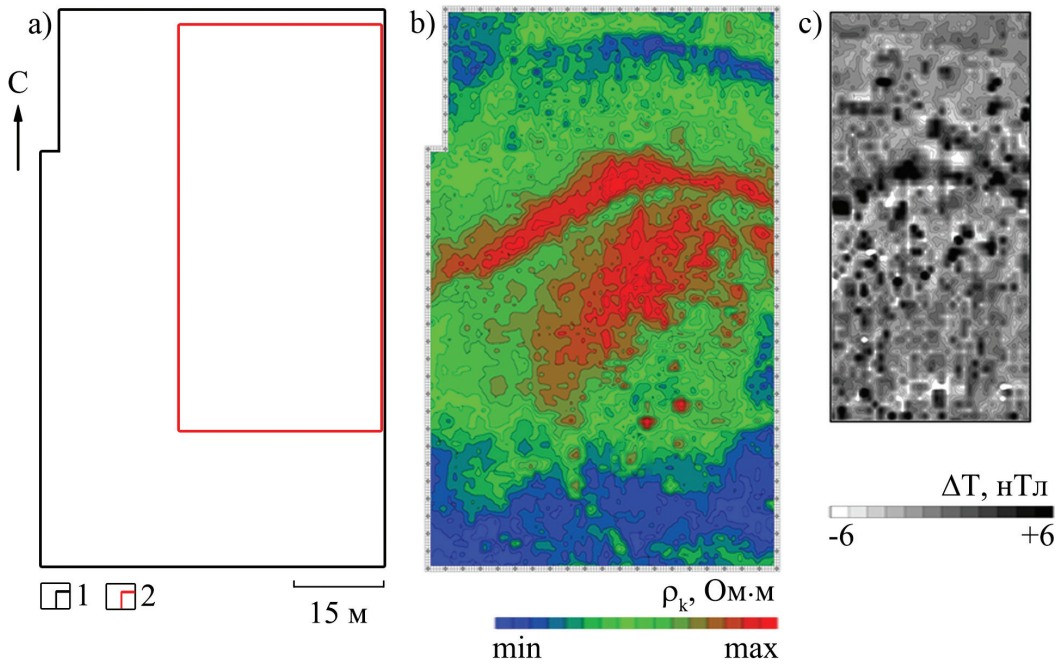

Рис. 2. Кушманское III селище – этап измерений: a) – схема расположения полигонов съемки, b) – карта распределения кажущегося сопротивления ρ_k, c) – магнитограмма ΔT; 1 – граница полигона электроразведки, 2 – граница полигона магниторазведки

Fig. 2. Kushmanskoe III settlement – stage of measurements: a) – location plan of survey areas, b) – distribution map of apparent resistivity ρ_k, c) – magnetic record ΔT; 1 – boundary of resistivity survey area, 2 – boundary of magnetic survey area

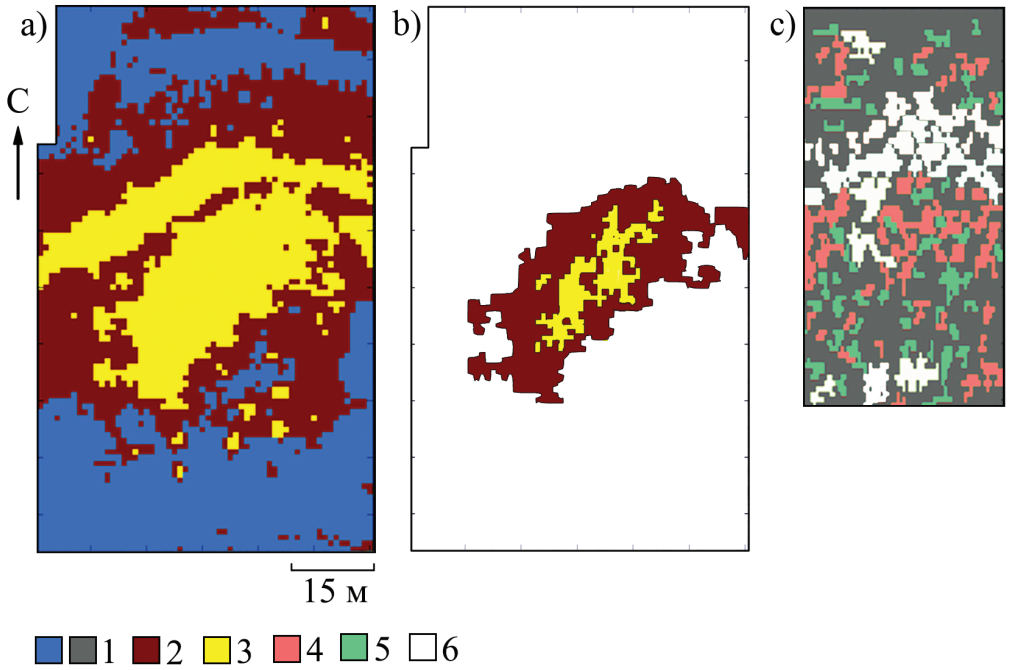

Рис. 3. Кушманское III селище – этап обработки: a) – сегментированная карта распределения ρ_k, b) – повторная сегментация участка мощного культурного слоя, c) – сегментированная магнитограмма; 1 – фон, 2 – аномалия повышенного сопротивления, 3 – аномалия высокого сопротивления, 4 – отрицательная магнитная аномалия, 5 – положительная магнитная аномалия, 6 – диполярная магнитная аномалия

Fig. 3. Kushmanskoe III settlement – processing stage: a) – segmented distribution map of apparent resistivity ρ_k, b) – repeated segmentation of site of thick cultural layer, c) – segmented magnetic record; 1 – background, 2 – anomaly of increased apparent resistivity, 3 – anomaly of high apparent resistivity, 4 – negative magnetic anomaly, 5 – positive magnetic anomaly, 6 – dipolar magnetic anomaly

Таблица 1

Принципы интерпретации локальных аномалий

Principles of interpretation of local anomalies

Объект	Тип аномалии		Форма объекта
	Электроразведка	Магниторазведка	
Ров	Повышенное сопротивление	Положительная/ Диполярная	Протяженная, дугообразная
Площадки – основания сооружений из прокаленной глины	Повышенное сопротивление	Диполярная	Близка к прямоугольной
Площадки – основания сооружений из уплотненной глины	Пониженное сопротивление	–	Близка к прямоугольной
Ямы производственных сооружений	Повышенное сопротивление	Диполярная	Округлая
Хозяйственные ямы жилых построек	Повышенное сопротивление	Положительная	Округлая
Очаги	–	Диполярная	Аморфная
Неоднородный геологический фон	Повышенное сопротивление	Отрицательная	Аморфная
Мощный культурный слой	Повышенное сопротивление	–	Аморфная

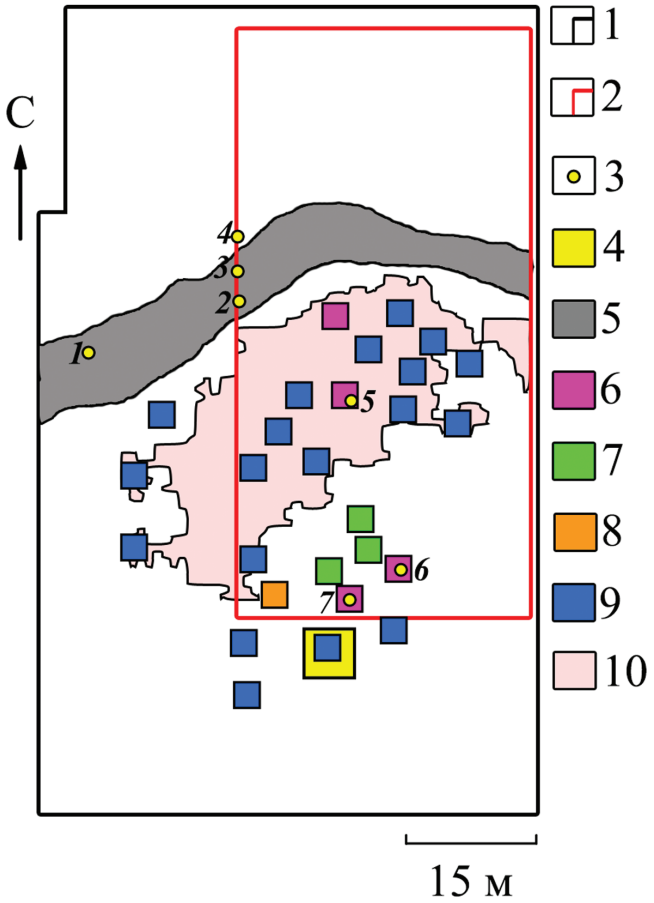

Рис. 4. Результат интерпретации планировки Кушманского III селища:
1 – граница полигона электроразведки;
2 – граница полигона магниторазведки;
3 – точка бурения;
4 – археологический раскоп;
5 – ров;
6 – площадка из прокаленной глины;
7 – площадка из уплотненной глины;
8 – очаг;
9 – хозяйственная яма;
10 – культурный слой хорошей сохранности

Fig. 4. Result of interpretation of layout of Kushmanskoe III settlement:
1 – boundary of resistivity survey area;
2 – boundary of magnetic survey area;
3 – point of drilling;
4 – archaeological excavation;
5 – ditch;
6 – platform of calcined clay;
7 – platform of compacted clay;
8 – hearth;
9 – storage-pit;
10 – cultural layer of a good safety

почвенных бурений в точках 1-3. Согласно литологическому строению кернов (рис. 5а), основным заполнением рва является неоднородный суглинистый материал, ниже которого залегает мощный слой материковой породы с примесями угля и почвы. В точке бурения 4, по оценке почвоведов и археологов, фиксируется внешняя часть поселения (расположена за пределами рва), что также подтверждает корректность определения границ данного оборонительного сооружения при интерпретации данных комплексных геофизических исследований.

Площадки из прокаленной глины и ямы производственных сооружений проявляются на геофизических картах аналогичным образом (см. табл. 1), но существенно отличаются формой и размерами от оборонительных сооружений. Несколько таких объектов обнаружено на внутренней части поселения (рис. 4). Геометрические параметры выявленных аномалий в большей степени соответствуют прокаленным глиняным площадкам. Правомерность интерпретации подтверждается почвенными бурениями. В образцах почвенно-грунтового материала в точке 5 обнаружено множество фрагментов печины и угля вплоть до глубины 0,8 м. В точке бурения 6 прокаленные глина и суглинок залегают в диапазоне глубин 0,2-0,4 м, а в точке 7 – в диапазоне 0,3-0,4 м.

Площадки из уплотненной глины локализуются только по данным электроразведки (см. табл. 1). Размер и форма выявленной аномалии позволяет предположить, что ее источником является несколько смежных объектов, расположенных в непосредственной близости друг от друга (рис. 4).

В отличие от глиняных площадок, местоположение очагов фиксируется только по данным магниторазведки. Соответствующая диполярная аномалия обнаружена у южной границы участка измерений (рис. 4).

По результатам комплексных геофизических исследований выявлено значительное количество ям хозяйственного назначения, которые обычно включались в границы жилых сооружений и построек бытового назначения [16, с. 81-91]. Хозяйственные ямы средневековых сооружений обычно заполнены гумусированным слоем с прослойками глины и небольшими включениями суглинистого перемешанного грунта с примесью угля и золы. Именно поэтому при электроразведке таким объектам соответствуют локальные аномалии повышенного сопротивления,

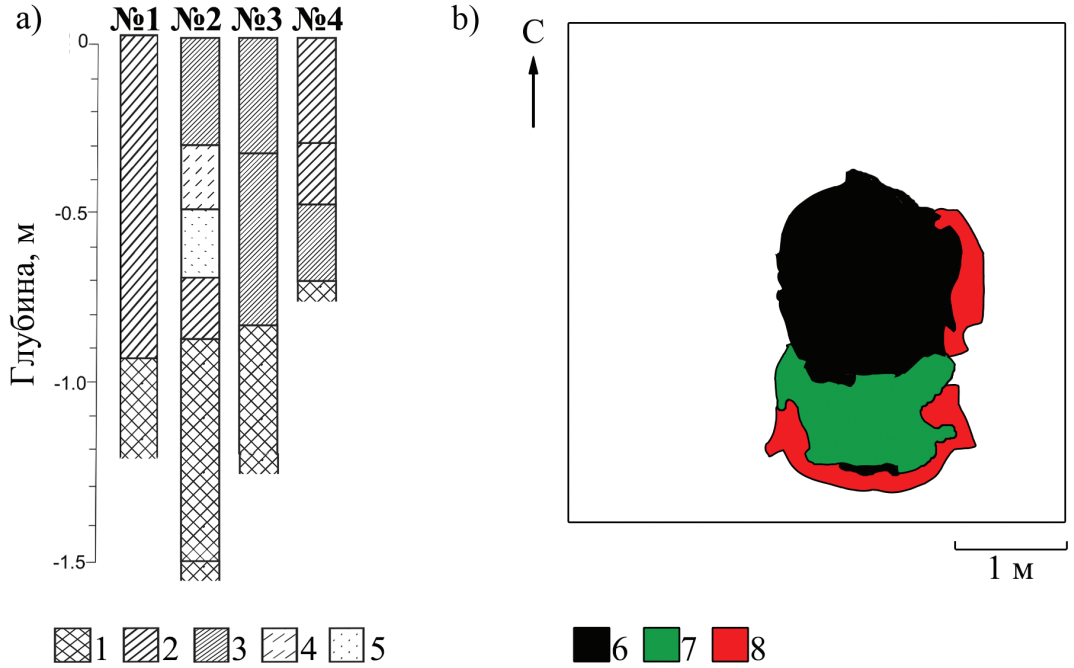

Рис. 5. Археологические исследования на участке Кушманского III селища:
а) – литологическое строение кернов в точках бурения № 1-4, b) – результат раскопок;
1 – материковая глина, 2 – тяжелый суглинок, 3 – легкий суглинок, 4 – супесь, 5 – песок,
6 – темно-серый гумусированный суглинок с включением угля, 7 – зеленовато-рыжая пестрая глина,
8 – красная глина с включением темно-серого суглинка

Fig. 5. Archaeological researches on the site of Kushmanskoe III settlement:
a) – lithologic structure of cores in points of drilling № 1-4, b) – result of excavation;
1 – clay bedrock, 2 – heavy loam, 3 – light loam, 4 – sandy loam, 5 – sand, 6 – dark gray humous loam with coal inclusion,
7 – greenish and red motley clay, 8 – red clay with dark gray loam inclusion

а на данных магниторазведки они проявляются как локальные положительные аномалии (см. табл. 1). С точки зрения интерпретации планировки Кушманского III селища важно, что наблюдается упорядоченность в расположении этих объектов: прослеживаются ряды, ориентированные по линии юго-запад – северо-восток. За пределами участка магниторазведки также обнаружены аномалии повышенного сопротивления, имеющие схожую форму, которые «продолжают» выявленные ряды. Это позволяет также интерпретировать их как аномалии, вызванные хозяйственными ямами.

Один из таких объектов планировки подтвержден раскопками (рис. 4, 5b), в результате которых обнаружен комплексный объект: две разновременные хозяйственные ямы, одна из которых (более поздняя, северная) прорезает другую (южную). Обе ямы имеют схожее заполнение – темно-серый суглинок, у основания сменяющийся на пеструю глину [17, с. 51-63]. Поэтому, с точки зрения заполняющего грунта, их можно расценивать как единый объект поиска.

Геологический фон, а также аномалии, расположенные за пределами оборонительных сооружений поселения, интерпретированы как объекты природного происхождения и соответственно исключены из рассмотрения.

Таким образом, применение алгоритма комплексных геофизических исследований (рис. 1) и сравнительный анализ данных с имеющейся априорной информацией об объектах планировки на средневековых поселениях региона (см. табл. 1) позволили получить принципиально новую информацию для исторических реконструкций. В результате междисциплинарного изучения Кушманского III селища (рис. 4) выявлена не известная ранее линия укреплений, восстановлена рядовая планировка и определено расположение разноплановых объектов застройки. Правомерность интерпретации подтверждена результатами выборочных бурений и целенаправленных раскопок (рис. 5). Очевидно, что при комплексных геофизических исследованиях выявлены не все объекты, определяющие планировку этого средневекового поселения. Однако полученные данные принципиально важны с точки зрения сохранения объекта историко-культурного наследия.

Заключение

Алгоритм комплексных геофизических исследований может быть применен при изучении широкого круга археологических памятников. Его адаптация к конкретному объекту историко-культурного наследия проводится за счет уточнения априорной информации о форме и размерах предполагаемых объектов поиска, а также о типах геофизических аномалий, соответствующих этим объектам. Предложенные подходы к обработке и интерпретации позволяют уменьшить количество ошибок первого (пропуск объекта) и второго рода («ложная» аномалия). Это подтверждается результатами комплексных исследований средневекового Кушманского III селища, для которого получена оценка границ поселения и определен принцип его планировки. Следовательно, применение данного алгоритма повышается качество неразрушающих исследований структуры грунта и решает задачу сохранения объектов историко-культурного наследия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-49-180007 р-а).

Ключевые слова: электроразведка, магниторазведка, обработка, интерпретация, археологические памятники, планировка

ЛИТЕРАТУРА

1. Россия как археологическое пространство / отв. ред. Н.А. Макаров. – М. : Институт археологии РАН, 2016. – 152 с.
2. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. – Тверь : ООО «Издательство ГЕРС», 2004. – 294 с.
3. Обнаружение и разделение гравитационных и магнитных аномалий : учебное пособие / Ю.И. Блох. – М. : МГГА, 1995. – 80 с.
4. David A., Linford N., Linford P. Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation. – Swindon : English Heritage, 2008. – 59 p.
5. Чемякина М.А. Диагностика культовых комплексов Барабинской лесостепи геофизическими методами // Вестник НГУ. Серия: История, филология. – 2010. – Т. 9, вып. 3: Археология и этнография. – С. 74-84.
6. Возможности синтеза геофизической и археологической информации при интерпретации результатов раскопок (на примере поселения бронзового века Каменный амбар) / Н.А. Берсенева, А.В. Епимахов, В.В. Носкевич, Н.В. Федорова // Вестник археологии, антропии и этнографии. – 2015. – № 1 (28). – С. 4-14.
7. Zhurbin I.V., Borisov A.V. Capabilities of consistent application of geophysical and geochemical surveys of medieval settlements destroyed by plowing // Archaeological Prospection. 2018. – V. 25, No. 3. – P. 219-230.
8. Журбин И.В., Федорина А.Н. Комплексные геофизические исследования поселений Суздальского Ополья // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2017. – Т. 45, № 2. – С. 62-70.
9. Злобина А.Г. Алгоритм обнаружения и удаления помех на сегментированной геофизической карте // Естественные и математические науки в современном мире : сб. ст. по матер. XLIV Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2016. – С. 76-82.

10. Журбин И.В., Догадин С.Е. Алгоритм формирования сводных карт при малоглубинной электроразведке археологических памятников // Геоинформатика. – 2013. – № 3. – С. 41-48.
11. Положение о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации [Электронный ресурс]. – М. : Институт археологии РАН, 2018. – 64 с. – URL: http://archaeolog.ru/media/2018/Polozhenie_2018_2.pdf (дата обращения: 06.12.2018).
12. Журбин И.В., Иванова М.Г. Геофизические исследования Кушманского городища Учкакар в Прикамье // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2018. – Т. 46, № 1. – С. 76-85.
13. Hargrave M.L. Geophysical detection of features and community plan at New Philadelphia, Illinois // Historical Archaeology. – 2010. – No. 44 (1). – P. 43-57.
14. Злобина А.Г., Журбин И.В. Восстановление границы объекта по данным малоглубинной электроразведки методом нечеткой кластеризации // Геоинформатика. – 2015. № 3. – С. 19-25.
15. Иванова М.Г., Журбин И.В. Археологические и геофизические исследования средневековых поселений бассейна р. Чепцы // Российская археология. – 2014. – № 1. – С. 40-53.
16. Иванова М.Г. Иднакар: Древнеудмуртское городище IX-XIII вв. – Ижевск : Удмуртский институт истории, языка и литературы УрО РАН, 1998. – 294 с.
17. Иванова М.Г. Отчет об исследованиях на Кушманском городище Учкакар, Кушманском III селище и Кушманском II селище в Ярском районе Удмуртской Республики в 2016 г. – Т. 1 // Научно-отраслевой архив Удмуртского института истории, языка и литературы УрО РАН. РФ. Оп. 2. Д. 1693. CD 104.

REFERENCES

1. Russia as archaeological space / Ed. by N.A. Makarov. M. : Institute of Archaeology RAS, 2016. 152 p.
2. Nikitin A.A., Kmelevskoy V.K. Integration of geophysical metods. Tver : Ltd. «Publisher GERS», 2004. 294 p.
3. Detection and division of gravitational and magnetic anomalies / Yu.I. Bloh. M. : MGGA, 1995. 80 p.
4. David A., Linford N., Linford P. Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation. Swindon : English Heritage, 2008. 59 p.
5. Chemyakina M.A. Diagnostics of the cult complexes of the Barabinskaya forest-steppe zone by geophysical methods // Novosibirsk State University Bulletin. Series: History and Philology. 2010. V. 9, Is. 3: Archeology and Ethnography. P. 74-84.
6. Capabilities of synthesizing geophysical and archaeological information in the interpretation of excavation results (by the example of the Bronze Age settlement of Kamenny Ambar) / N.A. Berseneva, A.V. Epimahov, V.V. Noskevich, N.V. Fedorova // Academic journal of Archaeology, Anthropology and Ethnography. 2015. No. 1 (28). P. 4-14.
7. Zhurbin I.V., Borisov A.V. Capabilities of consistent application of geophysical and geochemical surveys of medieval settlements destroyed by plowing // Archaeological Prospection. 2018. V. 25, No. 3. P. 219-230.
8. Zhurbin I.V., Fedorina A.N. Comprehensive geophysical studies at the Suzdal Opolye settlements // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2017. V. 45, No. 2. P. 62-70.
9. Zlobina A.G. Algorithm for detection and removal of interference on a segmented geophysical map // Natural and mathematical Sciences in the modern world : Proceedings of the XLIV International scientific and practical conference. Novosibirsk : SibAK, 2016. P. 76-82.
10. Zhurbin I.V., Dogadin S.E. The algorithm of the total card generating with nearsurface resistivity survey of archaeological sites // Geoinformatika. 2013. No. 3. P. 41-48.
11. Regulations on the procedure of archaeological field work and preparation of scientific reporting documentation. M. : Institute of Archaeology RAS, 2018. 64 p. URL: http://archaeolog.ru/media/2018/Polozhenie_2018_2.pdf (date of access: 06.12.2018).
12. Zhurbin I.V., Ivanova M.G. Geophysical studies at the Kushmanskoye (Uchkakar) fortified settlement, Kama basin // Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia. 2018. V. 46, No. 1. P. 76-85.
13. Hargrave M.L. Geophysical detection of features and community plan at New Philadelphia, Illinois // Historical Archaeology. 2010. No. 44 (1). P. 43-57.
14. Zlobina A.G., Zhurbin I.V. The restoration of the borders of the object according to the shallow resistivity survey by the method of fuzzy clustering // Geoinformatika. 2015. No. 3. P. 19-25.
15. Ivanova M.G., Zhurbin I.V. Archaeological and geophysical studies of the medieval settlements in the river Cheptsa basin // Russian archeology. 2014. No. 1. P. 40-53.
16. Ivanova M.G. Idnakar: an ancient Udmurt fortified settlement of IX-XIII centuries. Izhevsk : Udmurt Institute of History, Language and Literature of Ural Branch of RAS, 1998. 294 p.
17. Ivanova M.G. The report on researches on Kushmanskoe an ancient fortified settlement Uchkakar, Kushmanskoe III settlement and Kushmanskoe II settlement in Yarsky district of the Udmurt Republic in 2016. V. 1 // Scientific and industry archive of Udmurt Institute of History, Language and Literature of Ural Branch of RAS. RF. Op. 2. D. 1693. CD 104.