УДК 550.8.056

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО ПАМЯТНИКА БРОНЗОВОГО ВЕКА ГОРОДИЩЕ АНДРЕЕВСКОЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Носкевич В.В., Федорова Н.В., Бебнев А.С., Вдовин А.Г., Мехоношина Т.Л. **–** Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Геофизические исследования проведены на территории поселения бронзового века Андреевское. Выполнена детальная магнитная съемка и получены цифровые магнитные карты поселения, которые позволили реконструировать планировку городища. Проведено исследование фортификационных сооружений с помощью георадара.

Магнитная съемка, георадарная съемка, археологические памятники.

RESALTS OF THE GEOPHYSICAL RESEARCH OF BRONZE AGE ARCHAEOLOGICAL MONUMENTS ANDREEVSKOE (SOUTHERN URAL MOUNTAINS)

Noskevich V.V., Fedorova N.V., Bebnev A.S., Vdovin A.G., Mehonoshina T.L. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Geophysical investigations were carried out on the site of Bronze Age settlement Andreevskoye. Detailed magnetic survey was performed and digital magnetic maps were created, which allowed to reconstruct the settlement plan. Research of the fortifications was conducted by the means of GPR.

Magnetic survey, GPR survey, archaeological monuments.

Введение

В рамках научных проектов Уральского отделения РАН «Междисциплинарное исследование памятников эпохи бронзы Южного Урала» и «Природа и общество Южного Зауралья в эпоху бронзы: междисциплинарный анализ археологических памятников» сотрудники Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН проводят исследования памятников Страны городов на Южном Урале. Многие из этих памятников были открыты сравнительно недавно в конце двадцатого века. Обширные укрепленные поселения с замкнутой системой обороны Страны городов сосредоточены на достаточно компактной территории в 80000 км^2. К настоящему времени открыто 21 поселение, функционирование которых относят к эпохе средней бронзы. В книге (Зданович, Батанина, 2007) по результатам дешифрирования снимков построены схемы городищ и приведено их описание. Городища практически полностью разрушены, их остатки находятся под землей.

Геофизические съемки памятников позволяют получать новую важную информацию об этих уникальных сооружениях. Исследования, проведенные на территории памятника Каменный Амбар (Ольгино), показали, что на начальных этапах исследований этих исторических объектов магнитометрия является наиболее оперативным и информативным геофизическим методом (Носкевич и др., 2010). По магнитным аномалиям удается определить точное положение внешних и внутренних оборонительных стен и восстановить планировку городища.

В 2009–2012 гг. магнитная съемка проведена российскими и германскими геофизиками на поселениях Ольгино, Коноплянка, Сарым-Саклы, Журумбай; результаты представлены в работах (Федорова, Носкевич, 2012; Федорова и др., 2013; Multidisciplinary..., 2013). Построенные карты магнитных аномалий позволяют выбирать участки для дальнейших более детальных исследований с помощью других как геофизических, так и археологических методов и значительно снижают риск проводить «раскопки вслепую».

Целью настоящих исследований являлось уточнение конфигурации оборонительных сооружений и внутреннего обустройства памятника Андреевское, так как

нередко данные, полученные по результатам дешифрирования аэрофотоснимков и магнитной съемке, отличаются друг от друга. В полевой сезон 2013 г. на территории поселения проведена магнитная съемка. На ряде участков оборонительной системы городища исследования выполнены с помощью георадара SIR-3000.

В данной работе приведены результаты обработки и интерпретации этих данных.

Краткое описание поселения Андреевское

Укрепленное поселение Андреевское расположено на левом берегу реки Синташта на Южном Урале (Брединский район, Челябинская область). Ближайший населенный пункт, по имени которого назван этот памятник, – поселок Андреевский – находится на расстоянии 8 км. Современное русло реки и древнее русло, сохранившееся в виде обводненной глубокой старицы, образуют полуостров. Городище находится на самой бровке надпойменной террасы, на берегу старицы. По-видимому, во время существования поселка старица была основным руслом реки Синташта.

Памятник открыт в 1990 г. И.М. Батаниной при анализе данных аэрофотосъемки. Границы памятника можно оконтурить по развалам оборонительных рвов и стен. Поселение многослойное и имеет сложную конфигурацию, которая образована тремя прямоугольными системами оборонительных сооружений. По результатам дешифрирования снимков и наземному археологическому обследованию построена схема поселения (Зданович, Батанина, 2007), на которой авторы выделили три поселка А, В и С (рис. 1). Анализ данных привел их к выводу, что поселения функционировали в разное время. Поселок А является наиболее ранним. После прекращения его существования возник поселок В, который разместился в южной части жилой площади поселка А. Поселок С (пристрой) возник в процессе функционирования поселка В и отражает поздний этап существования памятника.

По снимкам установлено, что развалы стен оборонительных сооружений колеблются от 2,5 до 15 м. Многочисленные провалы в них авторы работы (Зданович, Батанина, 2007) интерпретируют как входы в поселения.

На схеме (см. рис. 1) насчитывается 9 проходов, причем два из них имеют сложные превратные сооружения. В восточной стене поселения В «главный вход оформлен двумя стенами, выдвинутыми на напольную сторону в виде коридора шириной 2,5–3 м и длиной 20–25 м». Вход в поселок А также оформлен двумя стенами, смыкающимися с валами за пределами поселения. Еще одна дос-

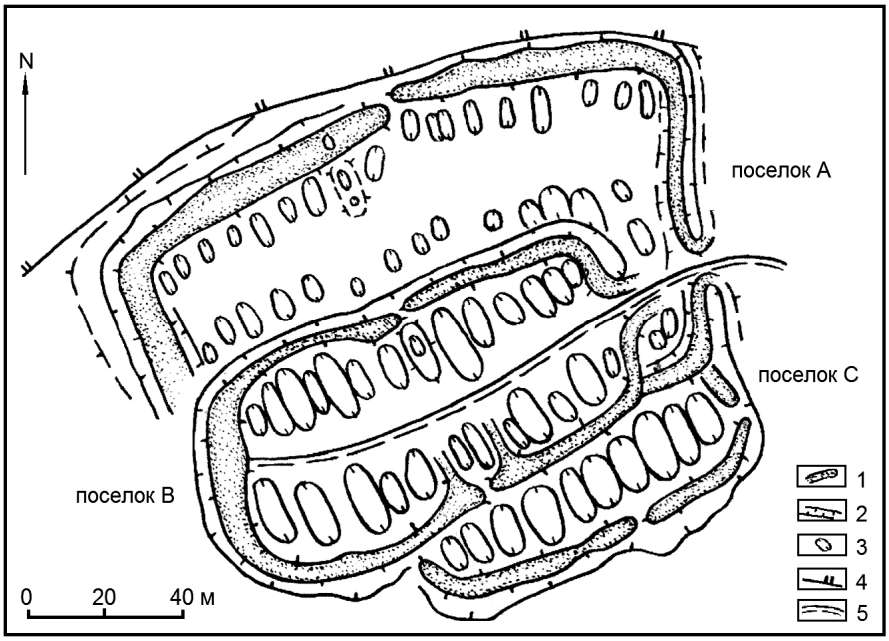

Рис. 1. Схема поселения Андреевское по результатам дешифрирования снимков (Зданович, Батанина, 2007): 1 – оборонительные стены; 2 – рвы; 3 – жилищные ямы; 4 – бровка надпойменной террасы; 5 – древняя дорога

таточно сложная система обороны входа между поселками В и С на рис. 1 показана в середине южной стены.

Внутри поселения выделено много жилищных впадин, размеры которых колеблются от 3x5 м^2 до 10x23 м^2. В поселке А размеры впадин небольшие, они расположены в два ряда, параллельных северной фортификационной стене. В поселке В наблюдаются два ряда впадин, а в поселке С – только один. Впадины в основном крупные и длинными сторонами плотно прилегают друг к другу. Между северным и южным рядами впадин поселка В образована «улица» шириной 10–15 м. Вдоль «улицы» на аэрофотоснимках авторы работы (Зданович, Батанина, 2007) отчетливо увидели «древнюю дорогу», которая прослеживает за пределы поселения.

Геофизические исследования и раскопки на территории укрепленного поселения Андреевское ранее не проводились.

Методика микромагнитной съемки

Территория памятника, покрытая съемкой, располагалась на площади 200x240 м^2. Масштаб съемки 1:50. Для удобства проведения съемки эта территория была разбита на квадратные участки с размерами 40×40 м, при этом одна из сторон квадрата ориентировалась по магнитному меридиану с помощью буссоли. На каждом квадрате было выполнено по 81 проходу с регистрацией модуля геомагнитного поля на двух высотах. Для того чтобы снизить погрешности, которые может вносить оператор и регистрирующая аппаратура, все проходы выполнялись в одном направлении – с юга на север.

Для измерений использовались магнитометры-градиентометры: канадский SM-5 Navmag и российский ММПГ-1. Датчики градиентометров были расположены вертикально на высотах 0,3 и 2 м от поверхности земли, и штанги с датчиками были смонтированы на немагнитные подвижные платформы.

Ранее при проведении съемок на городищах Ольгино и Коноплянк было установлено, что данные градиентометров SM-5 Navmag и ММПГ-1 имеют систематическое расхождение, которое может достигать 4–8 нТл. Вследствие этого при построении карт приходилось для всех квадратов проводить процедуру уравнивания исходных данных. При выполнении съемок на поселении Андреевское территория дополнительно была разделена на два участка, съемка на которых проводилась только одним прибором. На первом участке, расположенном в северо-западной части поселения (ограничен линиями x=120 м и y=120 м, рис. 2), использовался магнитометр ММПГ-1. На остальной территории применялся магнитометр SM-5 Navmag. При построении карт в данные ММПГ-1 была внесена поправка 6 нТл.

На участке 1 при измерении прибором ММПГ-1 нижний датчик магнитометра располагался точно над пикетом. Погрешность съемки оценивается 1–2 нТл. Измерения с помощью градиентометра SM-5 Navmag выполнялись в непрерывном режиме, интервал записи 1 с, координаты точек измерений определялись с помощью GPS. Как показали исследования, проведенные на поселении Сарым-Саклы (Федорова и др., 2013), погрешность измерений в непрерывном режиме возрастает, в основном, из-за неточностей в координатной привязке. На магнитной карте это проявляется в виде небольшого размытия аномалий (зигзагообразный эффект), но это не мешает достаточно уверенно выделять аномалии от стен внутри поселения. Большое преимущество съемки с непрерывным режимом записи состоит в том, что производительность возрастает в 2–3 раза и значительно сокращается время съемки. На территории памятника Андреевское съемка была выполнена за 11 дней.

Магнитная карта и реконструкция планировки поселения

По результатам полевых измерений построена карта магнитных аномалий как разность измеренных значений модуля индукции геомагнитного поля на высотах 0,3 и 2 м (рис. 2а). К данным применялись различные способы фильтрации. Проведены вычисления и построены карты производных по различным направлениям, которые по-

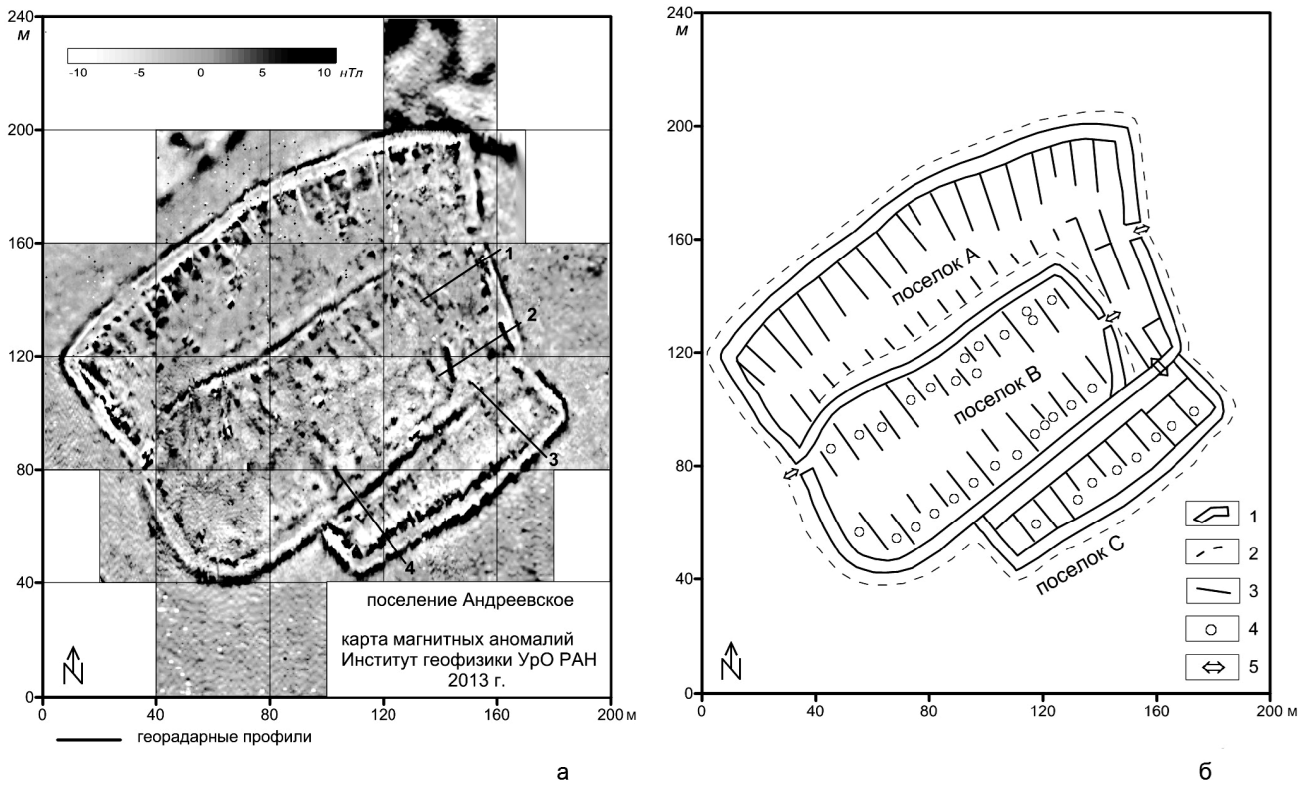

Рис. 2. Поселение Андреевское: а) карта магнитных аномалий (прямыми линиями показаны положение профилей георадарной съемки); б) схема поселения; 1 – контуры оборонительных стен; 2 – границы рвов; 3 – внутренние стены; 4 – колодцы; 5 – входы в поселки

зволяют более уверенно выделить аномалии от фортификационных сооружений и внутренних стен, разделяющие пространство на сектора – жилищные постройки. По этим данным построена схема поселения (рис. 2б).

Положение оборонительных стен надежно выделяется по двум параллельным цепочкам положительных магнитных аномалий. В отличие от результатов дешифрирования фотоснимков, геофизические результаты показывают, что фортификационные стены всех трех поселков (А, В и С) имели примерно одинаковую толщину. Наиболее отчетливо это проявляется на картах для вертикальной производной измеренного градиента магнитного поля. Расстояние между линейными аномалиями над фортификационными стенами составляет 4–6 м. Напомним, что толщина стен на схеме, построенной по фотоснимкам (см. рис. 1), варьирует от 2,5 до 15 м и снимки фиксируют развалы стен в настоящее время. Магнитное поле позволяет «увидеть» более глубокие горизонты и оценить размеры фундамента стен.

По разрывам линейных магнитных аномалий над оборонительными стенами можно заключить, что вход в поселение А располагался в середине восточной стены и еще один проход был в середине западной стены (см. рис. 2), по-видимому, он сохранился при функционировании поселка В. Другой вход в этот поселок был в середине восточной фортификации. Вход в дополнительный южный пристрой С находился в его северо-восточной части. Возможно, что участок южной стены поселка А был разрушен в этом месте, а сопровождающий его ров засыпан. Такой же вывод можно сделать по результатам исследований, проведенных с помощью георадара и приведенных в следующем разделе статьи.

Следовательно, геофизические данные не подтверждают наличие многочисленных проходов в оборонительных стенах, обнаруженных в результате дешифрирования аэрофотоснимков и интерпретированных как входы в поселение (см. рис. 1). Кроме того, данные магнитной съемки не

подтверждают сложного строения оборонительной системы на выходах из поселков А и В (на схеме показано, что мощные стены продолжаются за пределы поселков и образуют коридоры длиной от 8 до 25 м), а также в южной части фортификации, разделяющей поселки В и С.

Внутренние стены поселков поразному проявляются в магнитном поле. Стены поселка А, примыкающие к северной фортификационной стене, достаточно четко выделяются в магнитном поле. Над ними наблюдаются отрицательные магнитные аномалии, шириной 1,5–2 м и обрамленные по краям положительными аномалиями разной интенсивности (рис. 2а). От северной оборонительной стены отходят 19 стенок, протяженность которых по магнитным данным можно проследить от 10 до 20 м. Ширина жилищных секторов не постоянная и варьируется от 4 до 10 м. Положение построек, примыкающих к северной стене, хорошо соответствует жилищным впадинам, установленным по результатам дешифрирования аэрофотоснимков (см. рис. 1).

Внутри ряда построек поселка А, примыкающих к северной фортификации, наблюдается много интенсивных положительных магнитных аномалий разнообразных форм. Обычно наиболее интенсивные магнитные аномалии наблюдаются над внешней стороной оборонительной стены и рвом, примыкающим к ней. Они создаются обожженной глиной, которой при строительстве были покрыты стены. Можно предположить, что стены построек также обмазывались глиной. Возможно, что в результате пожаров штукатурка стен приобрела высокую намагниченность и осыпалась. Скопление такого материала и создает интенсивные магнитные аномалии.

Южный ряд жилищ этого поселка на магнитной карте проявляется слабоконтрастными аномалиями. Протяженность большинства из них составляет 5–10 м, и только в восточной части отчетливо фиксируется аномалия длиной 12–15 м. С южной стороны все жилищные стены обрываются в зоне протяженной отрицательной аномалии, которая вызвана рвом фортификации поселка В. На всем протяжении аномалия имеет довольно постоянную ширину около 5–6 м. Край этой аномалии на нашей схеме отмечен пунктирной линией. Следовательно, при сооружении северной фортификационной стены и рва поселка В стены второго ряда жилищ поселка А были разрушены.

В юго-восточной части поселка А видны еще несколько жилищ третьего и четвертого ряда, длинные стены которых параллельны восточной оборонительной стене. На остальной части этих рядов расположен поселок В. Следовательно, первоначально поселение А состояло из четырех рядов жилищ, общее количество которых могло достигать 65–70 построек. Затем северная часть перестала использоваться, а часть построек двух южных рядов жилищ были отгорожены новой фортификационной стеной, и образовалось поселение В. Таким образом, геофизические данные подтверждают вывод, сделанный в работе (Зданович, Батанина, 2007), о том, что поселок А является наиболее ранним. Поселок В был построен позже.

В поселке В границы жилищ не удается выделить так уверенно, как в северной части поселка А. Только некоторые стены проявляются протяженными положительными аномалиями. Большинство стенок проявляются лишь слабоинтенсивными аномалиями небольшой протяженности. В западной части интенсивность аномалий от стен сопоставима с аномалиями-помехами, создаваемыми грунтом. Возможно, что стены там полностью разрушены.

Вдоль южной оборонительной стены можно отчетливо различить 12 интенсивных локальных аномалий. Кроме самой западной эти аномалии расположены практически по прямой линии, причем расстояние между ними примерно одинаковое, и они отстоят на одинаковом расстоянии от фортификации. Возможно, что еще одна аномалия присутствует в крайней восточной постройке, но ее трудно выделить из-за цепочки интенсивных аномалий, созданных развалами юго-восточной оборони-

тельной стены поселения В.

По результатам исследований на раскопах городищ Ольгино и Коноплянка установлено, что подобные интенсивные локальные аномалии наблюдаются над некоторыми колодцами и хозяйственными ямами (Носкевич и др., 2012; Федорова, Носкевич, 2012; Multidisciplinary, 2013). Причем в Ольгино такие колодцы относятся к позднему этапу функционирования поселения (поздней бронзы), а над многочисленными колодцами, которые были обнаружены при раскопках и отнесены к раннему (синташтинскому) периоду, заметные магнитные аномалии не выделены.

В северном ряду жилищ также наблюдаются локальные аномалии, но расположены они не так закономерно вдоль прямой линии, как в южном ряду. Можно сделать вывод, что поселок В состоял из двух рядов, разделенных на 13 секторов каждый, ширина построек составляла 7–10 м, длина достигала 20 м.

Южный поселок С был разделен на 10 секторов, размеры которых варьировались по ширине от 7 до 10 м и от 13 до 17 м по длине. В некоторых постройках можно выделить аномалии от колодцев, которые расположены в южных частях жилищ. Возможно, что колодцы были во всех постройках, но на фоне интенсивных аномалий от фортификации магнитные эффекты от них трудно обнаружить.

На магнитной карте видны следы от развалов стен, отделяющих постройки от «улицы». «Улица» представляла собой проход шириной 5–6 м вдоль южной стены поселения В. Скорее всего, ров, который находился на этом месте при функционировании поселения А, был полностью или частично засыпан. В восточной части прохода стены двух крайних построек смещены к югу, и «улица» превращается в небольшую площадь, в северной части которой был выход из поселка С в поселок А.

Таким образом, в результате магнитной съемки получена новая объективная информация о строении фортификаций и расположении построек внутри поселков во время их функционирования. На основании этих данных построена более точная схема поселения, чем по результатам дешифрирования аэрофотоснимков.

Георадарные исследования

Для изучения фортификационных сооружений проведены георадарные исследования на четырех профилях, пересекающих оборонительные восточные и южные стены городища. Расположение этих профилей показано на рис. 2а. Съемка проводилась георадаром SIR-3000 (GSSI) с антеннами 400 и 270 МГц. Протяженность профилей составляла 34–42 м, шаг между пикетами по профилю 0,1 м.

Для определения скорости электромагнитных волн в исследуемом диапазоне глубин 0–2 м и переходу от временных разрезов к глубинным, дополнительно был пройден профиль длиной 15 м, измерения на котором проводились с двумя антеннами 100 МГц по методу общей глубинной точкой. Шаг между пунктами измерений вдоль профиля составлял 0,1 м. Обработка осуществлялась с помощью программного обеспечения RADAN 6.6 (GSSI, 2008).

Скорость электромагнитных волн оценивалась по методу взаимной корреляции при сборе трасс с помощью подпрограммы, прилагаемой в пакет обработки RADAN 6.6. После обработки получено значение скорости 0,135 м/нс, которое соответствует величине относительной диэлектрической проницаемости грунтов приблизительно равной 5.

Полученное значение не противоречит табличным значениям скоростей (0,122– 0,150 м/нс) для сухих суглинков, которыми представлена почва на участке исследований (Финкельштейн и др., 1986). При известном значении скорости волн был произведен переход на разрезах от временной шкалы к глубинам.

На рис. 3–6 представлены результаты обработки измерений и интерпретации, выделены границы интенсивных отражений от исторических объектов по профилям 1–4.

Профиль 1 пересекает восточные стены и рвы поселков А и В и частично внутренние постройки поселения А. Остатки

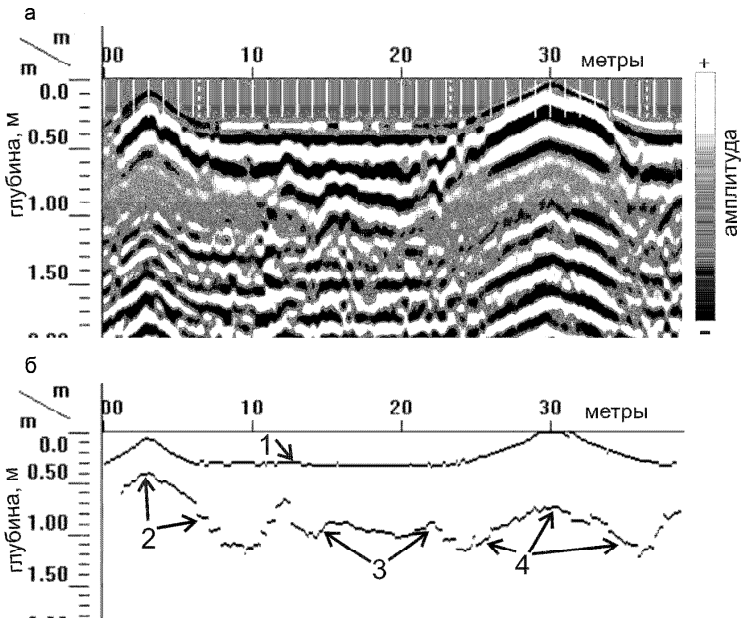

Рис. 3. Результаты георадарной съемки по профилю 1: а) радарограмма; б) результаты интерпретации:
1 – положение современной земной поверхности; 2 – отражения от фрагментов оборонительной стены и рва поселения В; 3 – отражения от остатков стенки жилища поселения А;
4 – отражения от остатков оборонительной стены и рвов поселения А

этих построек прослеживаются в интервале 12–22 м. Интервал 0–12 м представлен фортификационными сооружениями (стена и ров) поселка В, которые накладываются на остатки внутренних жилищ поселка А. Это свидетельствует о более позднем строительстве поселка В. Наиболее интенсивные отражения наблюдаются от внешнего рва поселка А (интервал 33–39 м), перепад глубин составляет 0,5 м. Стенки построек, выделенные по магнитным аномалиям, отчетливо проявляются на глубинном разрезе.

На рис. 4 показаны результаты обработки и интерпретации по профилю 2, который также пересекает восточные фортификации поселков А и В, а также внутренние постройки поселения А. Кроме того, в начале профиля наблюдаются интенсивные отражения от стены, разделяющей постройки в поселке В. Этот профиль короче чем профиль 1, его длина только 34 м, он заканчивается над стеной поселка А и не захватывает внешний ров.

Профиль 3 начинается в месте примыкания юго-восточной стены поселения В к

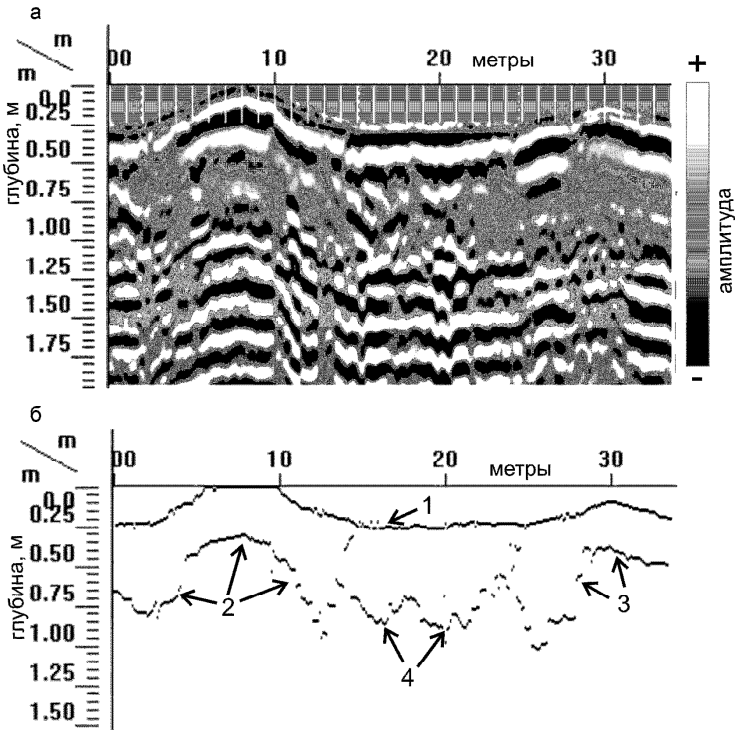

Рис. 4. Результаты георадарной съемки по профилю 2: а) радарограмма; б) результаты интерпретации: 1 –положение современной земной поверхности; 2 – отражения оборонительной стены и рва поселения В; 3 – отражения от остатков оборонительной стены и рва поселения А; 4 – отражения от остатков внутренних жилищ поселения А

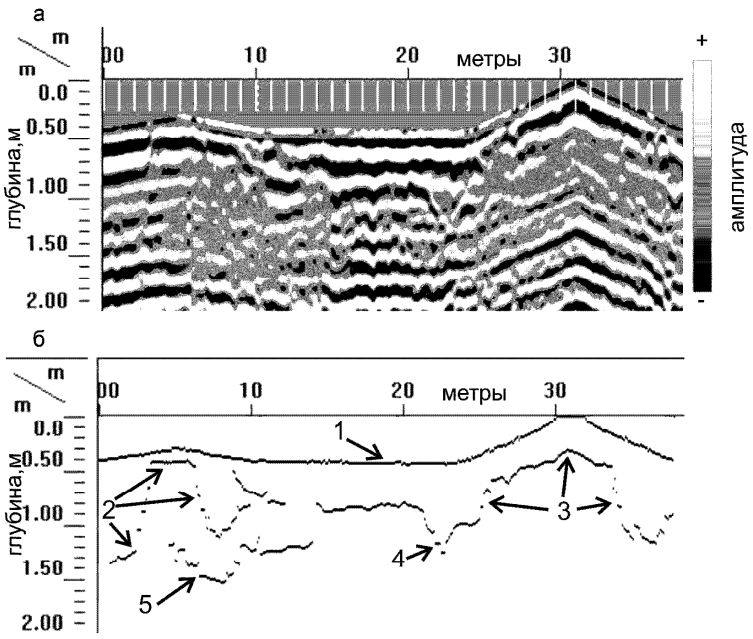

Рис. 5. Результаты георадарной съемки по профилю 3: а) радарограмма; б) результаты интерпретации; 1 – положение современной земной поверхности; 2 – отражения оборонительной стены и рва поселения В; 3 – отражения от остатков оборонительной стены и рва поселения С; 4 – отражения от колодца или хозяйственной ямы поселения С; 5 – отражения от остатков рва поселения А

южной стене поселения А, затем пересекает поселок С и его южную фортификацию.

На волновом разрезе (рис. 5) видно, что остатки южной стены поселка А разрушены значительно сильнее, превышения рельефа составляют только 10 см в отличие от внешней оборонительной стены поселка С. Перепад современного рельефа этой стены составляет 30 см.

В интервале 6–9 м проявляются отражения от стенок древнего рва, располагавшегося с внешней стороны стена поселка А, который, вероятно, при строительстве поселка С был засыпан. Этот профиль проходит через эпицентр локальной магнитной аномалии, созданной остатками древнего колодца или хозяйственной ямы (в интервале 21–24 м). На разрезе отчетливо

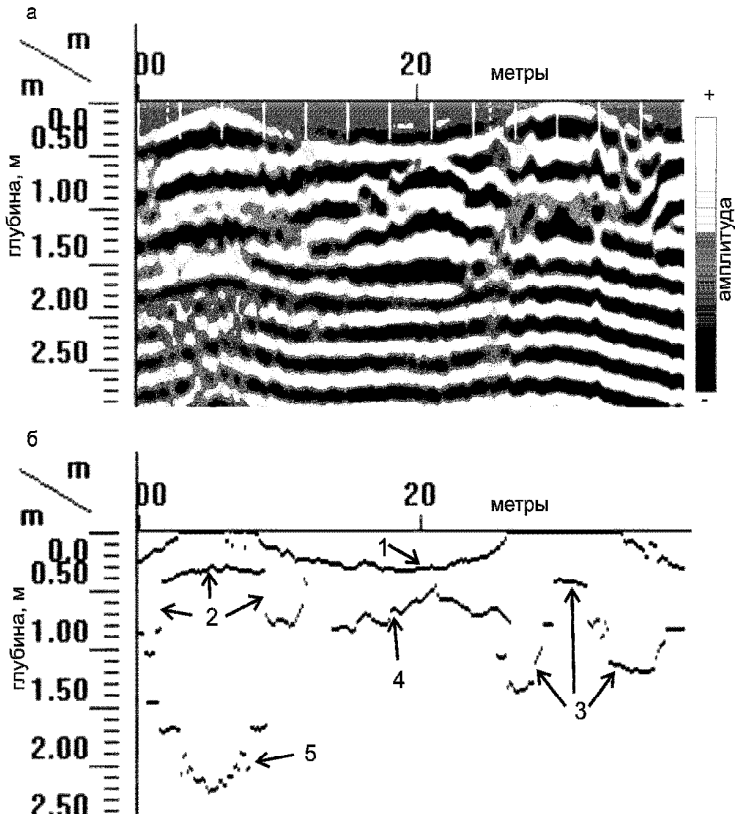

Рис. 6. Результаты георадарной съемки по профилю 4: а) радарограмма; б) результаты интерпретации; 1 – положение современной земной поверхности; 2 – отражения оборонительной стены и рва поселения В; 3 – отражения от остатков оборонительной стены и рва поселения С; 4 – отражения от остатков внутренних построек поселения С; 5 – отражения от остатков рва поселения А

наблюдаются отражения от стенок колодца на глубинах 0,5–0,9 м. Следовательно в настоящее время пол постройки находится на глубине 0,5 м.

Профиль 4 также пересекает южные фортификации поселка С и общую стену поселков А и В (рис. 6). Измерения на этом профиле выполнены с антенной 270 МГц в непрерывном режиме, поэтому глубинный разрез имеет разрешение меньше, чем на других профилях. Расстояние фиксировалось на радарограмме маркерами с интервалом 3 м. На этом разрезе отчетливо видны отражения от внешнего рва поселка С до глубины 1,0–1,2 м от дневной поверхности (пикеты 34–37). Внешней ров поселка В проявляется на радарограмме лишь небольшим смещением полосок по вертикали (пикеты 9–12). Хорошо отмечаются отражения от внутренней стенки поселка С, отделяющей жилище от «улицы». Внутри поселка С наблюдается подъем границы, вероятно, созданный развалами стен постройки.

Сопоставление схемы поселения, основанной на данных магнитной съемки, с результатами георадарного зондирования позволяет заключить, что выделенные по магнитным аномалиям остатки стен построек и даже колодец отчетливо проявляются на глубинных разрезах. По результатам интерпретации можно оценить, что глубина до культурного слоя в жилищах древнего поселения составляет 0,5–0,8 м.

Заключение

Проведенные геофизические исследования позволили уточнить строение фортификационных сооружений и планировку поселения Андреевское. Выявлены новые детали внутри поселков, определены размеры построек, местоположения некоторых колодцев.

В результате георадарного зондирования получены глубинные разрезы вдоль четырех профилей, на которых под наносами и развалами стен проявляется рельеф рвов и жилищ древнего поселения.

Полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что поселок А является наиболее ранним, позже на его территории были построены поселки В и С.

Работа выполнена при поддержке Уральского отделения РАН (проект 12–М–456–2024 «Природа и общество Южного Зауралья в эпоху бронзы: междисциплинарный анализ археологических памятников»).

Литература

Зданович Г.Б., Батанина И.М. Аркаим – «Страна городов» Пространство и образы. Челябинск: Крокус, 2007. 260 с.

Носкевич В.В., Федорова Н.В., Муравьев Л.А. Использование магнитометрии при изучении археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале // Геофизика. 2010. № 4. С. 69–75.

Носкевич В.В., Федорова Н.В., Корякова Л.Н., Шарапова С.В. Геофизика и археология поселений бассейна реки Карагайлы-Аят // Уральский исторический вестник. 2012. № 4. С. 60–69.

Федорова Н.В., Носкевич В.В. Реконструкция планировки укрепленных поселений эпохи бронзы на Южном Урале (Ольгино и Коноплянка) по результатам детальной магнитной съемки // Уральский геофизический вестник. 2012. № 1. С. 52–59.

Федорова Н.В., Носкевич В.В., Иванченко В.С., Бебнев А.С., Маликов А.В. Геофизические методы исследования археологических памятников Сарым–Саклы и Воровская яма (Южный Урал) // Уральский геофизический вестник. 2013. № 2. С. 46–53.

Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.

Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Transurals (Russia) (edited by Rudiger Krause and Ludmila N. Koryakova). Verlag Dr. Rudolf Habelt GmbH, Bonn, 2013. P. 352.

GSSI, 2008. SIR–3000, RADAN, http://www.geophysical.com/software.htm, Geophysical Survey Systems, Inc. Salem, NH, USA.