УДК 902.2+550.8+528.85+631.4

И.Н. Модин[1], С.А. Ерохин[2], А.М. Красникова[3], И.Г. Шоркунов[4], В.А. Шевченко[5], А.Д. Скобелев[6]

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕ ВЫРАЖЕННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ СРЕДНЕВЕКОВОГО НЕКРОПОЛЯ ШЕКШОВО-9 (СУЗДАЛЬСКОЕ ОПОЛЬЕ)

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1
Институт археологии РАН, 117292, Москва, ул. Дм. Ульянова, 19
Государственный исторический музей, 109012, Москва, Красная площадь, 1
Институт географии РАН, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4
ООО «НПЦ Геоскан», 119313, Москва, Ленинский пр., 95

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1
Institute of Archeology of the RAS, 117292, Moscow, st. Dm. Ulyanov, 19
State Historical Museum, 109012, Moscow, Red Square, 1
Institute of Geography of the RAS, 109017, Moscow, Staromonetny pereulok, 29, bd. 4
ООО «НПЦ Геоскан», 119313, Moscow, Leninskiy pr., 95

Проблему современной археологии составляют исследования памятников, не выраженных на поверхности вследствие многовековой распашки. На примере геофизического изучения памятника Шекшово-9 (Суздальское Ополье) рассмотрено использование геофизических методов для картирования структуры некрополя. Основная идея — поиск и интерпретация археологических объектов в геофизических данных как неоднородностей по отношению к фоновым геологическим и почвенным структурам.

Ключевые слова: геофизика в археологии, электротомография, магниторазведка, Суздальское Ополье, геоархеология.

The problem of modern archeology is the study of monuments that are not expressed on the surface due to centuries of plowing. Using the example of a geophysical study of the Shekshovo 9 monument (Suzdal Opolie region), we consider the use of geophysical methods for mapping the structure of the necropolis. The main idea is to search and interpret archaeological objects in geophysical data as heterogeneities towards background geological and soil structures.

Key words: geophysics in archaeology, electrotomography, magnetic prospection, Suzdal Opolie region, geoarchaeology.

Введение. Геоархеологический подход подразумевает рассмотрение археологического памятника в контексте особенностей окружающего ландшафта, вмещающей геологической среды и ее физических свойств [Garrison, 2016; Siart, 2018; Goldberg, Macphail, 2006]. Этот контекст в разной степени определяет закономерности расположения памятника, его структуру, процессы формирования и свойства археологических отложений, их сохранность и изменения во времени.

Подобный подход в ряде случаев необходим при решении прикладных поисково-картировочных задач: при поиске отдельных археологических объектов и изучении их совокупности, составляющей структуру археологического памятника. В частности, данные геофизических методов исследования или дистанционного зондирования допускают простую однозначную интерпретацию объекта или структуры только при условиях сильного контраста их физических свойств или характерной формы. Если эти условия не выполняются, выявление археологических объектов становится сложной интерпретационной задачей, так как данные неразрушающих методов исследования отражают совокупность геолого-почвенных и археологических неоднородностей; возможность их разделения становится проблематичной в связи с похожестью физических свойств и параметров археологических объектов и вмещающей среды.

Сочетания типов, характеристик археологических объектов и вмещающих геолого-почвенных обстановок приводят к разной результативности

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры докт. техн. н., профессор; *e-mail*: imodin@yandex.ru

[2] Институт археологии РАН, и. о. науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: seroh@mail.ru

[3] Государственный Исторический музей, мл. науч. с.; Институт археологии РАН, и. о. науч. с.; *e-mail*: krasnikova.an@yandex.ru

[4] Институт географии РАН, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: shorkunov@gmail.com

[5] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, аспирант; *e-mail*: shevchenkov.a@yandex.ru

[6] ООО «НПЦ Геоскан», вед. геофизик; *e-mail*: askobelev.msu@gmail.com

геофизических методов решения археологических задач, необходимости изменения методики и подхода к исследованиям. Поэтому самостоятельную научную задачу представляет адаптация общей методологии археогеофизических исследований [David et al., 2008; Schmidt et al., 2015; Schmidt, 2009] для регионов с новыми типами почвенно-геологических условий и археологических памятников. Статья посвящена решению задачи для погребальных памятников Суздальского (Владимирского) Ополья X–XII вв. на примере некрополя Шекшово-9 [Макаров, 2019; Макаров и др., 2020].

Суздальское Ополье — регион европейской части России, отличающийся от окружающих территорий ландшафтом, природным и историческим развитием. Палеогеографические события в позднем плейстоцене и голоцене привели к образованию здесь покровных лёссовидных суглинков, палеокриогенных структур, формированию серых лесных почв с вторым гумусовым горизонтом. Эти факторы во многом определили сельскохозяйственный потенциал Суздальского Ополья и его роль как ядра славянской колонизации X–XII вв.

Важный источник информации о социально-экономических процессах периода колонизации — результаты археологических исследований некрополей [Макаров и др., 2014]. Анализ соотношения площадей поселений и известных погребальных памятников X–XII вв. в Суздальском Ополье позволяет предположить, что общее число и размеры значительной части некрополей остаются неизвестны [Макаров и др., 2009]. Это объясняется многовековой сельскохозяйственной деятельностью: в настоящее время на распахиваемых участках даже надземные части курганных насыпей не видны ни визуально, ни по данным микротопосъемки.

В условиях Суздальского Ополья традиционные археологические методы позволяют обнаруживать поселения и изучать их структуру [Макаров и др., 2013], но оказываются малоэффективны при поиске некрополей. Даже в случае обнаружения некрополя картирование его структуры традиционными археологическими методами сейчас практически невозможно — объем раскопок и затраты на следующем этапе изучения памятника оказываются непропорциональны росту информации: определение места для новых раскопов затруднено, так как обычно нет однозначных предположений о структуре памятника, а приращение к старым раскопам дает однотипные объекты.

Методы дистанционного зондирования и геоморфологического анализа сокращают область поиска, но также не позволяют перейти к структуре памятника.

В качестве решения проблемы мы рассматриваем геофизические методы исследования, цель применения которых — в рамках выделенной территории определить положение некрополя и его структуру (границы, внутренние неоднородности, отдельные объекты). Описываемые исследования — первый опыт геофизического изучения погребальных памятников Суздальского Ополья.

Достижение поставленной цели подразумевало решение двух задач. Первая задача заключалась в определении того, какие археологические объекты можно отличить от фоновых геологических неоднородностей с помощью геофизических методов. К осложняющим факторам относятся малая глубина залегания археологических объектов, сравнительно большая мощность пахотного слоя и слабый контраст физических свойств объектов и почв. Сельские погребальные памятники Ополья X–XII вв. не содержат каменных конструкций или значимого количества металлических объектов, что потенциально снижает эффективность геофизических методов и приводит к необходимости применять геоархеологический подход для разделения археологических и фоновых почвенно-геологических аномалий. Вторая задача — на основании полученных результатов создать методику исследований, позволяющую решать конкретные археологические задачи по исследованию археологических памятников региона.

Объектом изучения был выбран некрополь Шекшово-9 [Макаров и др., 2013, 2017, 2020] — один из крупнейших сельских памятников округи Суздаля X–XII вв. (рис. 1). С 2013 г. Суздальская археологическая экспедиция Института археологии (ИА РАН) и Государственного исторического музея (ГИМ) совместно с сотрудниками геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова проводят комплексное изучение некрополя [Модин и др., 2014; Erokhin et al., 2015; Krasnikova et al., 2015, 2019]. Для средней полосы России проект не имеет аналогов с точки зрения сочетания объема детальных геофизических данных (площадь 7,5 га) и открытой раскопками площади (более 2800 м^2) в рамках одного археологического памятника. В статье представлены достижения в решении поставленных задач, нерешенные проблемы и перспективы дальнейших исследований.

Геологическое строение, почвенные и антропогенные преобразования верхнего слоя района исследований. Строение и физические свойства верхней части разреза Суздальского Ополья существенно неоднородны. Рассмотрим основные характерные особенности строения участка исследований, влияющие на выбор методики геофизических исследований и возможность обобщения полученных результатов.

Движение воздушных масс в перигляциальных криоксеротических условиях позднего плейстоцена способствовали перемещению крупной пыли и физической глины из зандровых равнин на моренные плато, что привело к образованию на Восточно-Европейской платформе пояса полесий

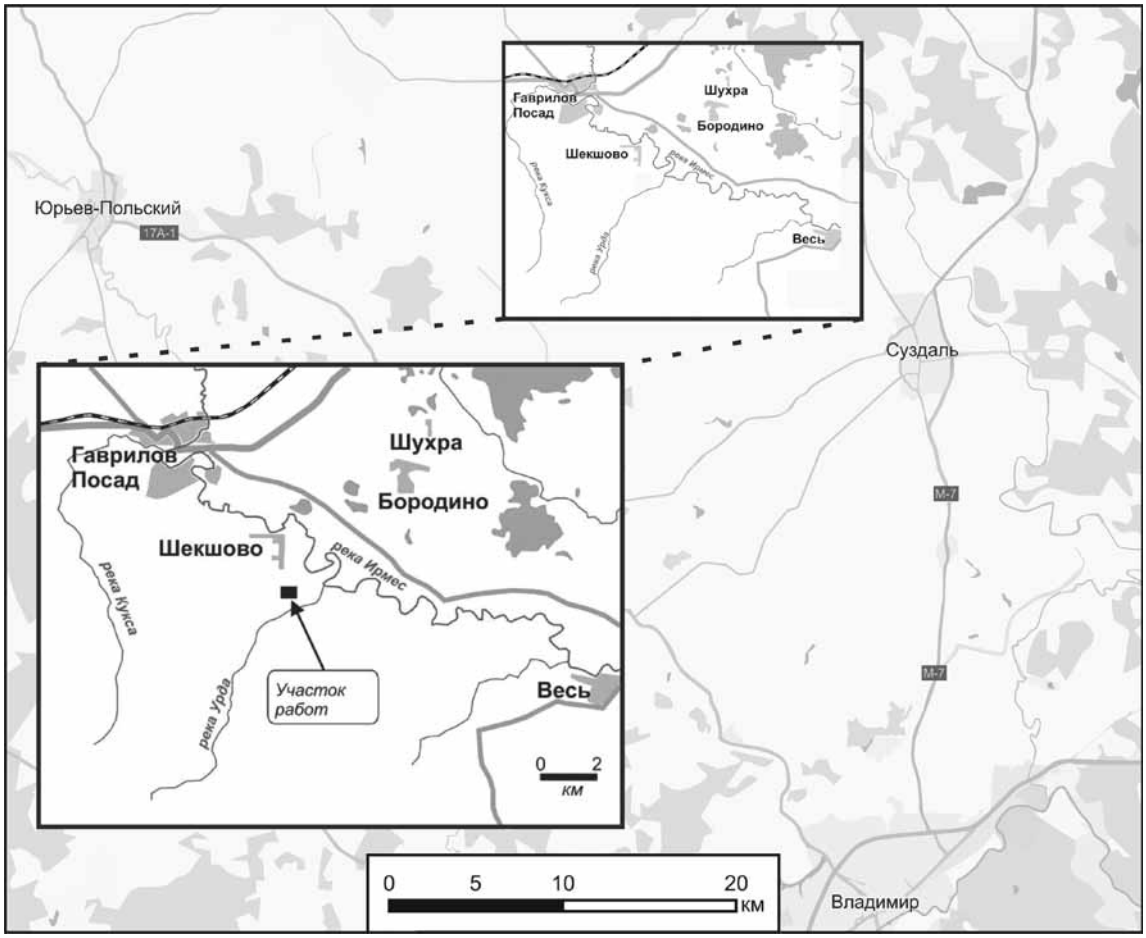

Рис. 1. Местонахождение участка исследований

и ополий [Николаев, 2013], на севере которого находится Суздальское Ополье. Памятник Шекшово-9 расположен на севере его центральной части, на средне- и слаборасчлененной пологоволнистой равнинной поверхности Куксо-Ирмес-Урдинского междуречья (рис. 1).

В верхней части разреза участка исследований[7] залегает пачка пылеватых суглинков мощностью 2,85–3,70 м, соответствующая контуру нерасчлененного комплекса отложений перигляциальных зон валдайского оледенения на Государственной геологической карте масштаба 1:200 000. Суглинки в верхних 0,85–1,30 м однородные, неслоистые, желто-бурые, вмещают поверхностные и срединные горизонты почв. Суглинки отнесены к поздневалдайскому субаэральному покровному чехлу и служат вмещающими отложениями для археологических объектов. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) изменяется от 20 до 40 Ом·м[8] (рис. 2). Ниже 0,85–1,30 м в суглинках прослеживается слоистость, контрастность слоистости увеличивается к подошве пачки. В контактной части с подстилающей пачкой наблюдается множество тонких слоев и линз тонко-мелкозернистого песка. Характерные значения УЭС пачки ниже 0,85–1,30 м составляют 10–20 Ом·м.

Ниже 2,85–3,70 м залегает пачка контрастно-слоистых разнозернистых гравийно-галечных песков мощностью 3–9 м, соответствующая выделу водно-ледниковых отложений поздних этапов деградации московского ледникового покрова на Государственной геологической карте масштаба 1:200 000. Пачка характеризуется повышенными значениями УЭС (рис. 2), определяя кривую приповерхностной части разреза как тип Н.

Верхний горизонт суглинков, представляющий собой основной объект геофизического изучения в рамках решаемой задачи, очень неоднороден. Это отражается в изменчивости УЭС и как следствие в сложности выделения археологических объектов. Причина и характер неоднородности верхнего слоя определяются особенностями его формирования и развития.

В первую очередь речь идет об исходной литологической неоднородности покровных лёссовидных суглинков за счет разной степени остаточной карбонатности, пылеватости и порозности, определивших разнообразие типов почвообразования. На территории исследуемого участка преобладают серые лесные почвы. Фрагментарно отмечено оподзоливание, имеющее разный генезис, как будет показано ниже.

[7] Геологические строение определено по результатам бурения в 2019 г.
[8] Значения сопротивления определены по результатам 2D-инверсии.

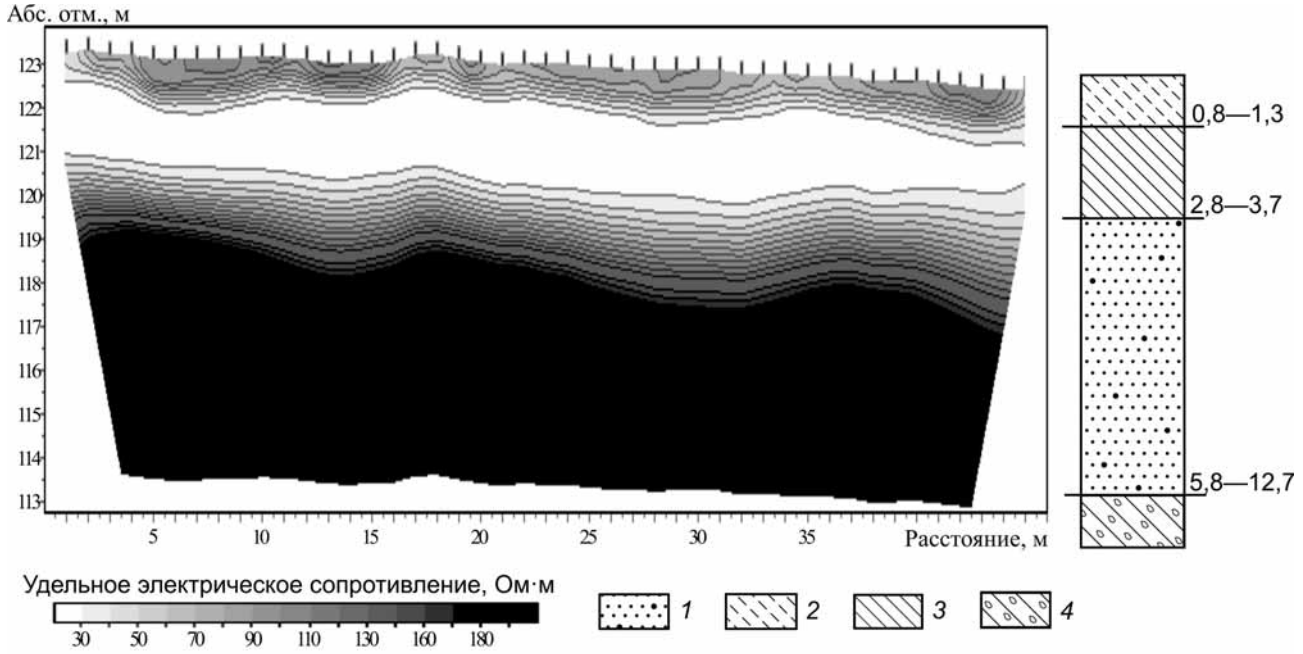

Рис. 2. Типичный геоэлектрический разрез участка исследования и сводная геологическая колонка по результатам буровых работ: *1* — гравийно-галечные пески; *2* — пылеватые суглинки неслоистые; *3* — пылеватые суглинки слоистые; *4* — щебнистые суглинки

Другая важная особенность строения верхней части разреза Суздальского Ополья — развитие в позднем валдае палеокриогенных комплексов [Velichko et al., 2006], в значительной степени определяющих современный ландшафт Ополья, структуру и функционирование его почвенного покрова, особенности сельскохозяйственного использования [Величко и др., 1996]. Наиболее крупные на территории исследования — полигонально-блочные структуры с диаметром блоков 25–30 м. Их отрицательные формы вмещают палеопочву — темноцветный «второй гумусовый горизонт» [Дмитриев и др., 2000], мощность которого составляет несколько десятков сантиметров.

Третий фактор, в огромной степени определяющий физические свойства почвенного покрова Суздальского Ополья, — активная сельскохозяйственная деятельность, которая не прекращается по меньшей мере с XII в. [Алешинская и др., 2008]. Длительная интенсивная распашка снивелировала объекты некрополей и привела к изменению почвенной структуры: бóльшая часть участка исследования представлена агрогенно-абрадированными почвами — агроземами, оставшаяся площадь — агрогенными типами текстурно-дифференцированных дерново-подзолистых, дерново-подзолисто-серых и темно-серых почв. Пахотный горизонт неоднороден по структуре и мощности. Мощность современного пахотного слоя изменяется от 25 до 40 см. В ходе археологических раскопок на некоторых участках выделяются старопахотные горизонты, древние пахотные борозды фиксируются до глубины 80 см от современной поверхности (в нижней части курганных ровиков).

Целевой тип неоднородностей верхнего слоя — археологические объекты некрополя. Археологическая классификация погребальных объектов некрополя [Макаров и др., 2020] отражает особенности погребальной обрядности на разных этапах существования могильника. С точки зрения поисковой геофизической задачи объекты можно разделить на два типа: курганные площадки (основания курганов, на которых совершалось погребение, вслед за чем возводилась насыпь), окруженные ровиками, сплошными кольцевыми или состоящими из отдельных ям, и прочие локальные объекты (грунтовые захоронения, ямы антропогенного происхождения, но неясного назначения). Курганные площадки имеют округлую в плане форму, характерный диаметр — от 4 до 17 м, глубина ровиков от современной поверхности до дна варьирует от 0,3 до 1,05 м при ширине от 0,6 до 4 м. Часто ровики могут быть общими для соседних курганов. Перепад глубин в рамках одного ровика может быть значительным (составлять до 0,3 м). Под влиянием распашки может сохраняться не цельный ровик, а только его придонная часть, которая археологически может читаться только как место скопления массового материала, например, керамики *in situ* сразу на контакте пахотного слоя и материка [Красникова и др., 2020]. Характерный размер индивидуальных захоронений 1,7–3,0×0,8–1,2 м, максимальная глубина 0,8 м. Таким образом, глубина нижней границы объектов изменяется от 1 до 0 м, так как они могут быть полностью уничтожены распашкой. При рассмотрении Шекшово-9 и ряда других памятников Ополья необходимо также отметить наличие перекопов — результат археологических раскопок в XIX в. [Макаров и др., 2013].

Разнообразие неоднородностей верхнего слоя памятника требует разработки и применения гео-

физической методики, позволяющей проводить надежное расчленение верхней части разреза с точки зрения описанных типов аномальных объектов и их физических свойств.

Материалы и методы исследований. *Результаты предшествующих исследований и выбор методов исследования.* Выбор методов геофизических исследований археологических памятников определяется на основании постановки археологической задачи и совокупности информации о физических свойствах археологических объектов и вмещающей среды. Основная археологическая задача исследований — картирование курганов, окруженных ровиками, как наиболее крупных погребальных объектов X–XII вв., сохранившихся в распахиваемых зонах Суздальского Ополья. Разнообразие погребальных обрядов этого времени определило разнообразие типов погребальных памятников, изучение которых также представляет научный интерес, а их картирование — дополнительную задачу для геофизических методов.

Наши исследования — первый опыт геофизического изучения некрополей Суздальского Ополья. Это в значительной степени определило выбор более информативных, но менее производительных методов исследования, так как на начальном этапе не было информации о значении и контрастности физических свойств погребальных объектов.

Предшествующими геофизическими исследованиями поселений Суздальского Ополья X–XII вв. [Stumpel, 2007; Федорина и др., 2008; Федорина, 2012; Журбин, Федорина, 2017] установлены общие закономерности изменения физических свойств культурного слоя и показана возможность определения структуры поселений по геофизическим данным. Эти результаты важны в качестве отправной точки для построения методики исследования некрополей, но не могут быть перенесены автоматически, так как степень антропогенного изменения верхней части разреза поселений значительно выше, больше глубина некоторых объектов, другое заполнение археологических объектов.

На основании результатов описанных геофизических исследований и опыта изучения археологических памятников средней полосы России, в качестве методов исследования мы использовали электроразведку (на постоянном токе), магниторазведку и георадиолокацию.

К преимуществам использования постоянного тока перед методами переменного тока в нашем случае относятся большая чувствительность к неоднородностям повышенного электрического сопротивления, возможность изменять детальность исследований верхней части разреза. Георадиолокация не добавила новой информации к данным других методов. Ее результаты здесь не рассматриваются, но применение этого метода может заметно увеличить производительность съемки разработанной технологии.

Основу комплекса составила псевдотрехмерная электротомография — система электротомографических измерений по параллельным профилям, позволяющая получать значения удельного электрического сопротивления в объеме среды, анализировать его распределение в плане и по глубине [Бобачев и др., 2006; Papadopoulos et al., 2006; Loke et al., 2013]. Псевдоэлектротомография-3D на постоянном токе использовалась в качестве основного метода по нескольким причинам.

Главная из них заключалась в перспективах интерпретации результатов с точки зрения геоархеологического подхода: в условиях средней полосы России описан опыт получения информации о всех структурах и процессах, определяющих строение верхней части разреза изучаемого региона. К ним относится решение археологических задач [Федорина, 2012], изучение структуры ледниковых отложений [Павлова, Шевнин, 2013], палеокриогенных структур [Ерохин и др., 2011], картирование неоднородностей почвенного покрова [Золотая и др., 2004], агрогенных трансформаций [Поздняков, Позднякова, 2004].

Кроме того, возможен переход от 2D- к 3D-инверсии, что может иметь большое значение для интерпретации сложных и слабоконтрастных структур [Yang, Lagmanson, 2006; Павлова, Шевнин, 2013].

Ключевая особенность электротомографических исследований — гибкость при построении системы наблюдений и возможность менять разрешающую способность в зависимости от решаемой задачи.

Методика исследований. Построение методики геофизических исследований в археологии — поиск оптимального компромисса между детальностью и площадью исследований. Не имеют практического смысла исследования, выявившие все объекты на площади, сопоставимой с площадью археологического раскопа. Интерес представляют технологии, позволяющие получать результаты в масштабе всего изучаемого памятника или его значительной части, что неизбежно приводит к уменьшению детальности. Допустимость уменьшения определяется археологической задачей [Красникова и др., 2020].

С точки зрения системы наблюдений, обработки и интерпретации данных были испробованы разные варианты методики электротомографии. Критерием эффективности служило качественное сравнение результатов интерпретации геофизических данных с результатами последующих археологических раскопок. Описание соответствия методик и решаемых задач приведены в таблице.

Здесь нами рассмотрены только результаты магниторазведки и электротомографии (ЭТ)

Применяемые электроразведочные методики и решаемые задачи

Электротомографическая методика		Археологическая задача (выделяемые объекты)	Почвенно-геологическая задача (картируемые объекты)
сеть (шаг между электродами × расстояние между профилями, м)	число поляризаций		
1 × 5	2	курганы, целые курганные ровики	полигонально-блочные структуры и фоновые неоднородности почвенного покрова
1 × 1	1	то же, фрагменты ровиков, ямы, глубокие (>25 см) грунтовые захоронения (≈25% от общего числа)	то же, локальные почвенные неоднородности, псевдоморфозы по повторно-жильным льдам
1 × 1	2	то же, более высокий процент грунтовых захоронений	–
0,5 × 1	1	то же, менее глубокие грунтовые захоронения	–
0,5 × 0,5	1 или 2	то же, более высокий процент грунтовых захоронений	–

для методики с шагом 1 м между электродами и 2D-инверсией данных. Электротомографические исследования проводили комбинированной трехэлектродной установкой AMN+MNB, диапазон разносов AO от 1,5 до 7,5 м (7 разносов), что соответствует глубинности от 0,15–0,30 до 2,5 м. Для проведения измерений использована электротомографическая станция «Омега-48». Инверсия данных проводилась с помощью программы ZondRes2D [Каминский, 2014].

Магниторазведка выполнена с помощью аппаратуры «Geometrics G–858» в варианте измерений полного вектора магнитного поля по сети 0,2 × 1 м.

Изучение приповерхностных объектов методом электротомографии. Электротомография отличается от стандартных вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) сокращенным диапазоном разносов [Бобачев и др., 2006]. Сокращение касается, в том числе, малых разносов — они определяются шагом между электродами, который в ЭТ фиксирован из-за использования кос. Это приводит к тому, что при работе с шагом 1 м в условиях Суздальского Ополья размер приемной линии и минимальный разнос (MN = 1 м, AB/2 = 1,5 м) превышают глубину объектов поиска (до 0,8 м). Возможно ли в этой ситуации разделить приповерхностные и более глубинные объекты?

Результаты 2D-моделирования (ZondRes2D) показывают, что возможно. На рис. 3 представлены результаты решения прямой и обратной задачи для четырехслойной модели среды (пахотный слой, пылеватые покровные суглинки, пылеватые суглинки, гравийно-галечные пески) и двух локальных неоднородностей (псевдоморфоза по повторно-жильным льдам и курганный ровик). Геоэлектрический разрез по результатам инверсии отражает соотношение истинной глубины объектов.

Необходимо отметить, что в случае большого контраста значений электрического сопротивления приповерхностного объекта и вмещающего слоя на геоэлектрическом разрезе по результатам инверсии возникает артефакт: под положительной аномалией сопротивления фиксируется ложная отрицательная аномалия (рис. 3, *B*; 23,5–26,5 м).

Таким образом, при контрастном заполнении ровики будут видны в результатах инверсии на разной глубине: как аномалия повышенного электрического сопротивления — на глубине, соответствующей истинной глубине ровиков, и как аномалия пониженного сопротивления на глубине, превышающей истинную глубину нижней границы ровиков.

Результаты исследований и их обсуждение. В рамках исследования Шекшово-9 получена, в том числе, геофизическая информация о памятнике [Красникова и др, 2020; Макаров и др., 2020]. Рассмотрим ее геологическую и археологическую интерпретацию (соответственно, возможности выделения и разделения природных и антропогенных объектов).

В результате площадных геофизических исследований памятника Шекшово-9 получены два основных набора данных для последующей интерпретации: распределение удельного электрического сопротивления на нескольких значениях глубины по результатам инверсии (рис. 4. Распределение удельного электрического сопротивления на глубине ~0,45 м (стандартная методика, сеть 1×1 м, одна поляризация) по 2D-инверсии, 5), а также карту аномалий модуля полного вектора магнитного поля (рис. 4), распределение удельного электрического сопротивления на глубине ~0,45 м (стандартная методика, сеть 1×1 м, одна поляризация) по 2D-инверсии (рис. 5), а также карта аномалий модуля полного вектора магнитного поля (рис. 6).

Геологическая интерпретация. Серые лесные почвы, развитые по породообразующим покровным суглинкам, обладают пониженными значениями УЭС. Остальные структуры, выявленные по данным электроразведки, характеризуются повышенными УЭС. Эти структуры можно разделить на «региональные» и «локальные».

К первым относится повышение фонового значения в юго-западной части площади ис-

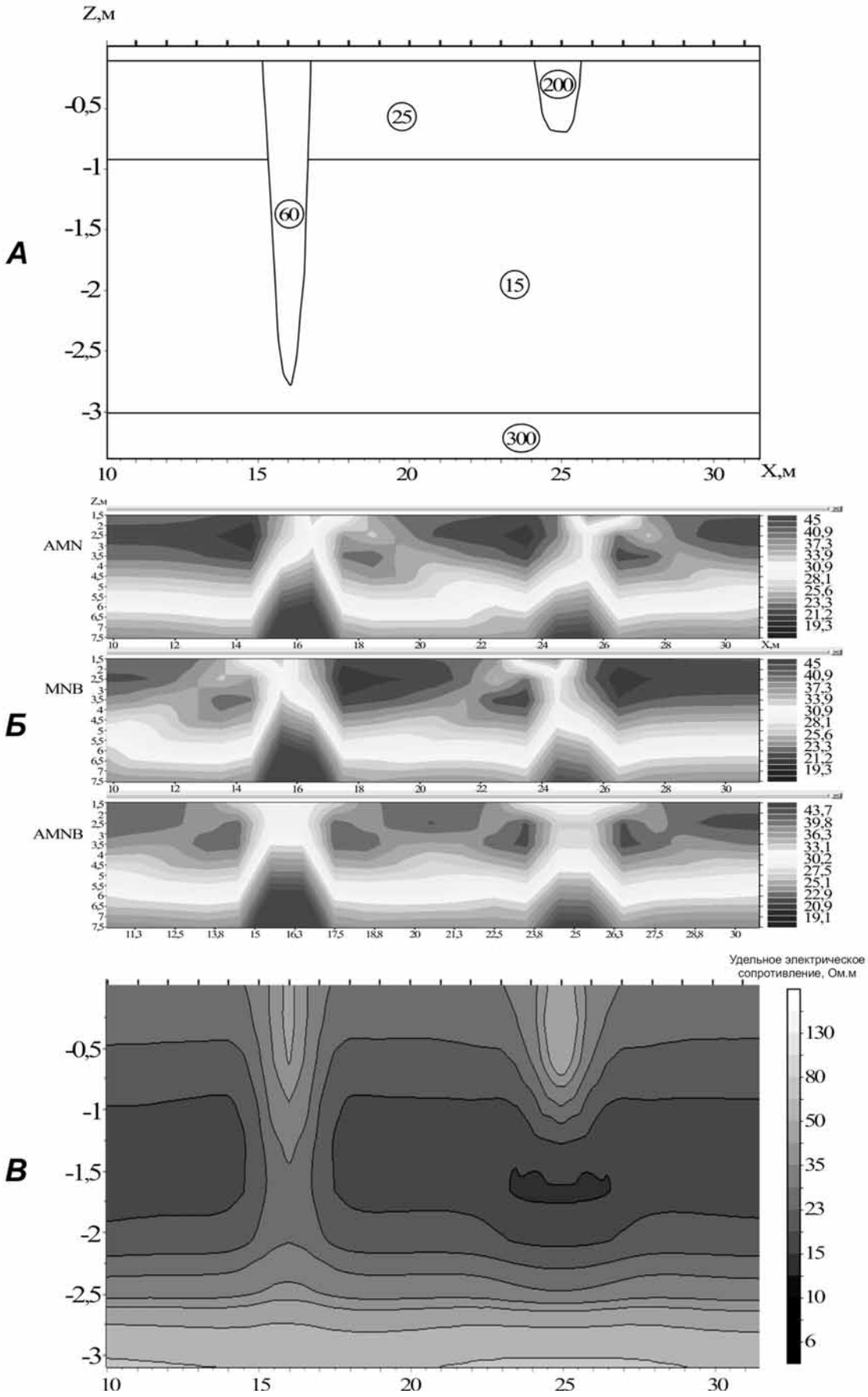

Рис. 3. Двумерное моделирование проявления на разрезах инверсии аномалий различной глубины для методики с шагом 1 м: *А* — геоэлектрическая модель среды (указаны значения УЭС); *Б* — псевдоразрезы кажущегося сопротивления для трехэлектродных установок Amn и mnB и четырехэлектродной установки AmnB; *В* — геоэлектрический разрез по результатам инверсии

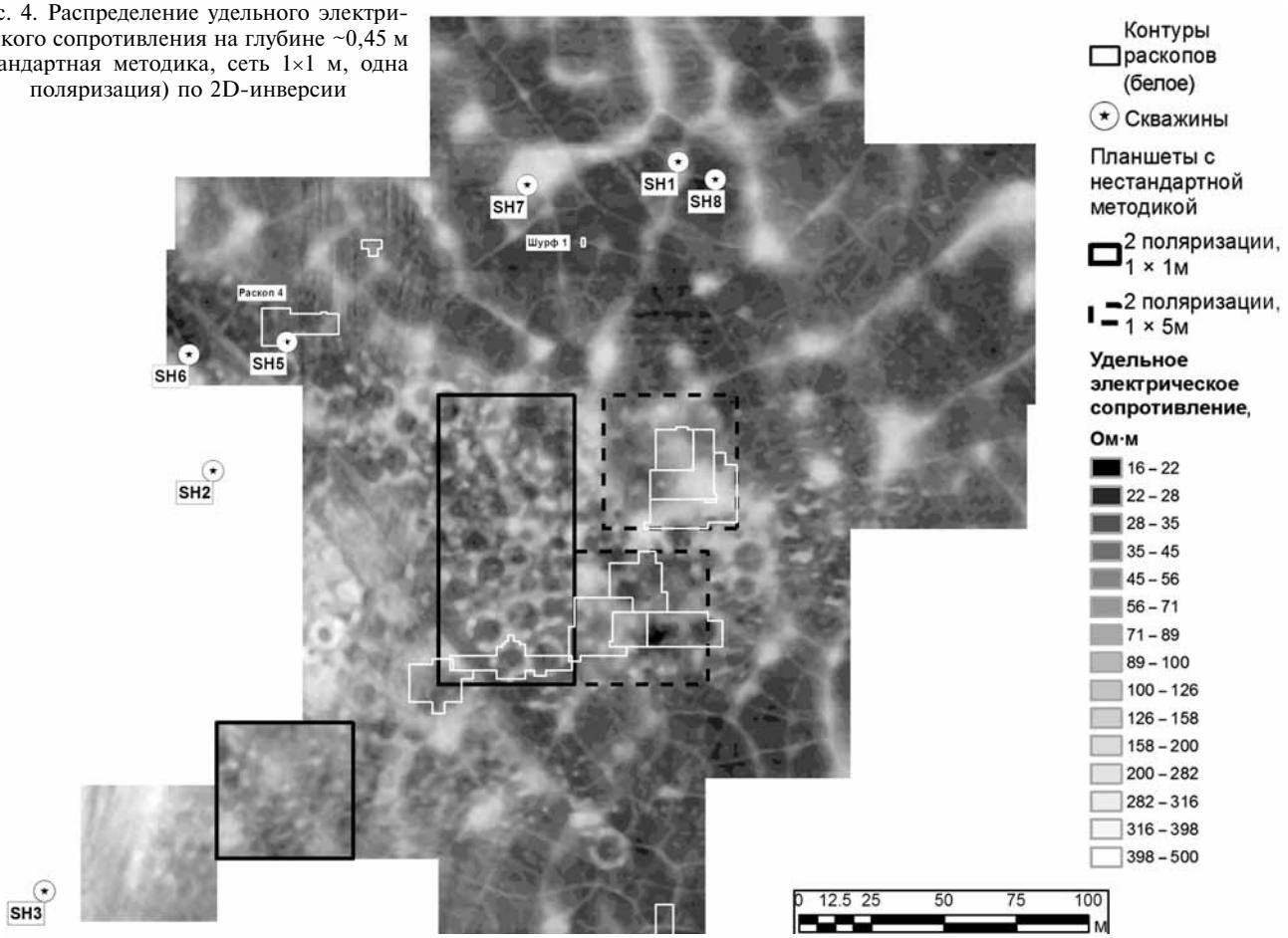

Рис. 4. Распределение удельного электрического сопротивления на глубине ~0,45 м (стандартная методика, сеть 1×1 м, одна поляризация) по 2D-инверсии

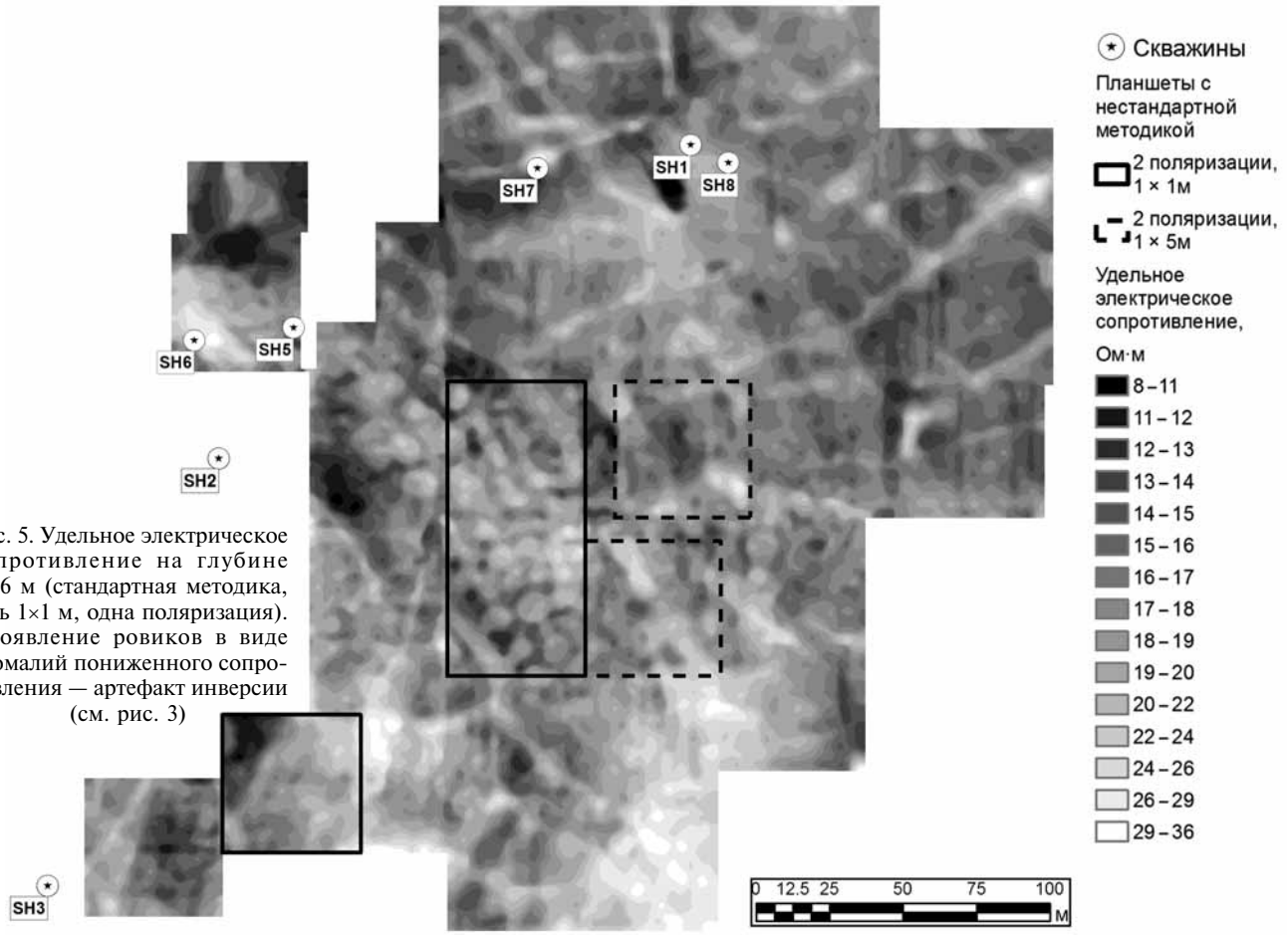

Рис. 5. Удельное электрическое сопротивление на глубине ~1,6 м (стандартная методика, сеть 1×1 м, одна поляризация). Проявление ровиков в виде аномалий пониженного сопротивления — артефакт инверсии (см. рис. 3)

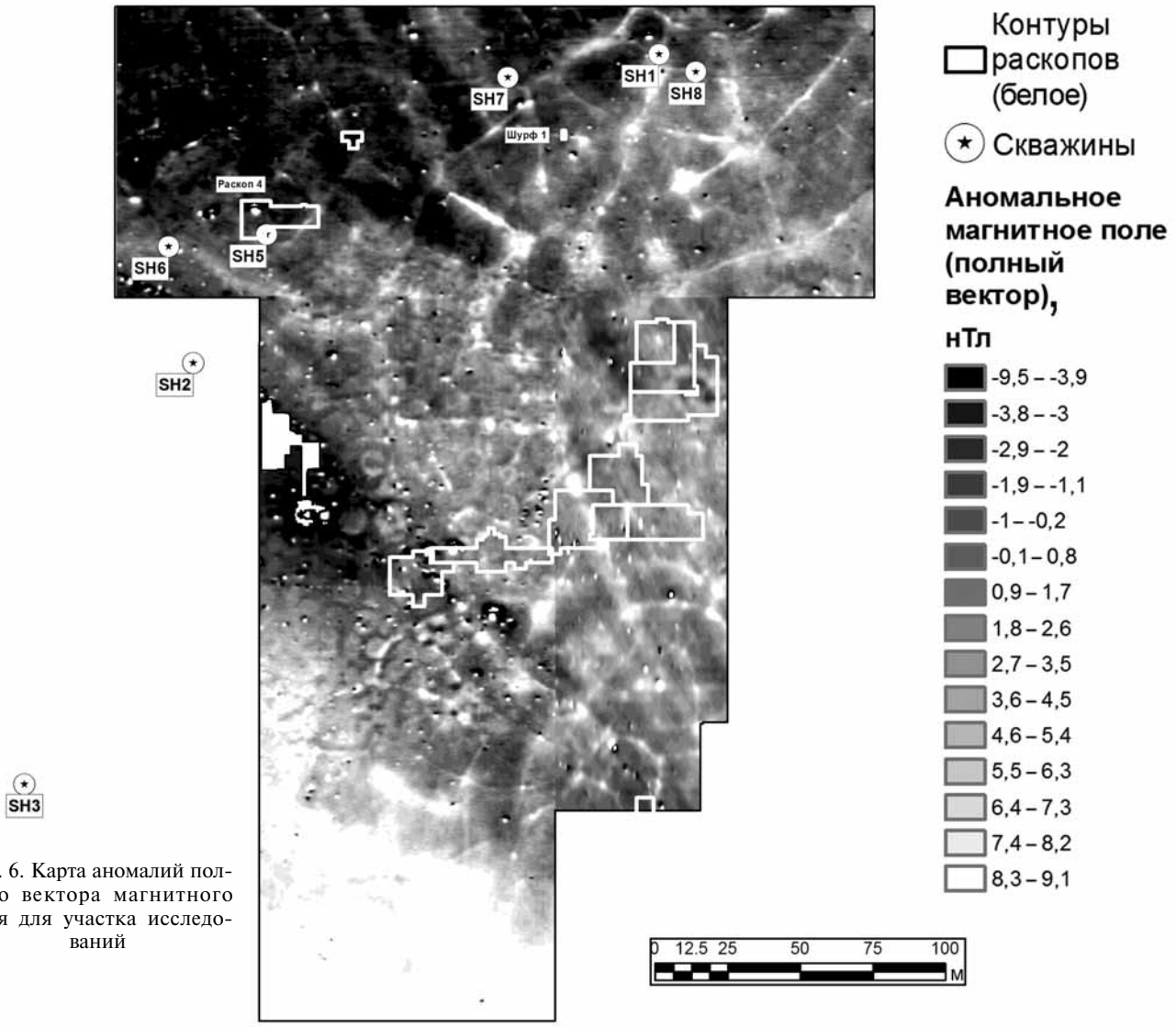

Рис. 6. Карта аномалий полного вектора магнитного поля для участка исследований

следований (рис. 4). Эта область заболочена и не распахивается, высокое УЭС здесь частично определяется высоким сопротивлением воды вследствие застойного гидрорежима[9]. Повышение УЭС в юго-западной части в целом связано с переходом от серых лесных к оподзоленным почвам (по данным скважин SH2 и SH3) и меньшей степенью окультуривания. Подобное повышение согласуется с общей закономерностью [Поздняков, Позднякова, 2004, с. 12–15]. В магнитном поле описываемый переход отражается в повышении значений в юго-западной части (рис. 6). Увеличение магнитной восприимчивости оподзоленных почв отмечено в работе [Бабанин и др., 1995, с. 115], однако правомерность такой интерпретации требует дальнейших исследований.

Локальные геолого-почвенные неоднородности связаны с процессами палеокриогенеза. Наиболее крупные из них (рис. 7) соответствуют элементам ложбинно-западинного рельефа, уверенно картирующегося в регионе по данным дистанционного зондирования и интерпретируемого как результат денудационной и эрозионной трансформации систем псевдоморфоз по полигонально-жильным льдам [Величко и др., 1996]. На некоторых участках четко видны остатки таких полигональных систем 1-го порядка. В раскопе 4 вскрыты приуроченные к западинам реликты палеопочв (см. ниже). Описанные палеокриогенные структуры неоднородны по физическим свойствам. Значения УЭС изменяются от 50 до 200 Ом·м и более (максимальные значения — в пересечениях границ полигонов), значения аномального поля составляют 5–10 нТл.

Данные электро- и магниторазведки также позволяют выделять палеокриогенные структуры 2-го порядка — псевдоморфозы по повторно–жильным льдам или первично-грунтовые заполнения жильных трещин. По сравнению со структурами 1-го порядка они характеризуются существенно меньшими размерами (ширина 1–1,5 м), значениями УЭС (до 60 Ом·м в узлах пересечения границ полигонов)

[9] В мае 2019 г. электрическое сопротивление воды в р. Урда оставляло 16,5–17,5 Ом·м, в лужах на поле и дороге — 55–65 Ом·м, в описываемой заболоченной области — 140 Ом·м.

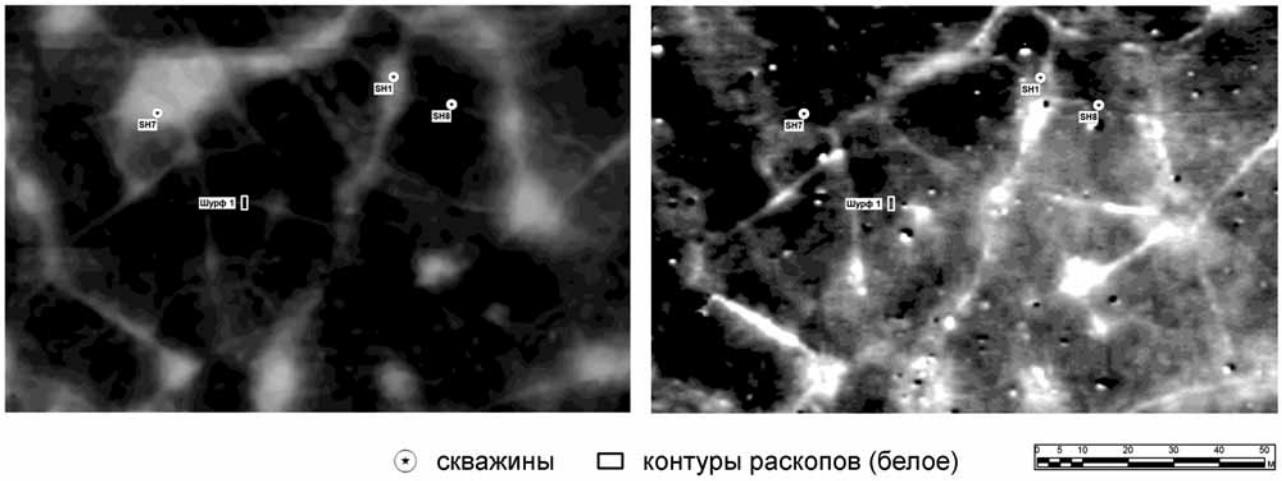

Рис. 7. Взаимоотношение палеокриогенных структур разного порядка в геофизических данных. Удельное электрическое сопротивление на глубине 0,45 м (слева) и аномальное магнитное поле (справа), шкалы соответствуют приведенным на рис. 4. Распределение удельного электрического сопротивления на глубине ~0,45 м (стандартная методика, сеть 1×1 м, одна поляризация) по 2D-инверсии

и аномального магнитного поля (до 5 нТл). Одна из структур вскрыта шурфом 1), что подтверждает правильность их геофизической интерпретации.

Агрогенные почвенные изменения находят отражение в данных, полученных с помощью применяемых методов, в значительной степени они являются функцией геолого-почвенного строения участка и здесь отдельно не рассматриваются.

Археологическая интерпретация. До начала геофизических исследований некрополя Шекшово-9 было известно положение двух курганов, установленных раскопками на основании распределения подъемного материала [Макаров и др., 2013].

Основной результат геофизических исследований — выделение с помощью электротомографической съемки серии кольцевых структур, по геометрическим параметрам отвечающих курганным ровикам (УЭС составляет 60–100 Ом·м). Последующая верификация археологическими раскопками показала, что по меньшей мере 12 из 14 структур, интерпретируемых археологически как курганные ровики или их остатки, четко видны как области повышенных значений электрического сопротивления. Пример сопоставления карты УЭС на глубине 0,45 м и результатов последующих археологических раскопок 2017 г. [Макаров и др., 2017] приведен на рис. 8. Таким образом, на основании результатов электротомографии выделено более 100 курганов, не выраженных на поверхности.

В виде слабых аномалий амплитудой до 2–3 нТл некоторые ровики отражаются в данных магниторазведки. Это говорит о возможности выделения отдельных объектов и разделения археологических и геолого-почвенных неоднородностей не только по форме аномалии, но и по амплитуде аномального магнитного поля.

Ровные кольцевые структуры хорошо сохранившихся ровиков — наиболее простой случай с точки зрения интерпретации, в отличие от картирования остатков ровиков и индивидуальных захоронений. Ровики в целом обладают большим УЭС, чем индивидуальные захоронения. Кроме малого контраста УЭС, поиск последних при рядовой методике осложняется меньшими размерами (в пределах 1×2 м), сопоставимыми с плотностью сети наблюдений.

Интерпретация индивидуальных захоронений на данных рядовой съемки основана на выделении локальных неоднородностей на фоне геологических структур. Пример выделения захоронений в области полигональной структуры приведен на рис. 9. В случае индивидуальных захоронений критерием качества исследований является соответствие требуемому проценту выделенных объектов с точки зрения археологической задачи [Красникова и др., 2020].

Заключение. Важнейшим направлением дальнейших исследований должно стать развитие полученных методических результатов до полноценного инструмента, решающего археологические задачи в рассматриваемом регионе и, возможно, в других регионах со сходными почвенно-геологическими условиями и агрогенной трансформацией. Для этого необходимо применять разработанную методику на других памятниках и анализировать сопоставление данных геофизики с результатами археологических и почвенно-геологических исследований.

С точки зрения методики геофизических исследований необходимо изучать возможность перехода к более производительным методам: георадиолокации, электромагнитным методам и системам измерений на постоянном токе в движении.

Представляется перспективным анализ возможностей изменения систем обработки — переход от 2D- к 3D-инверсии данных и совместной инверсии результатов электротомографии и магниторазведки. Важно также развивать системы

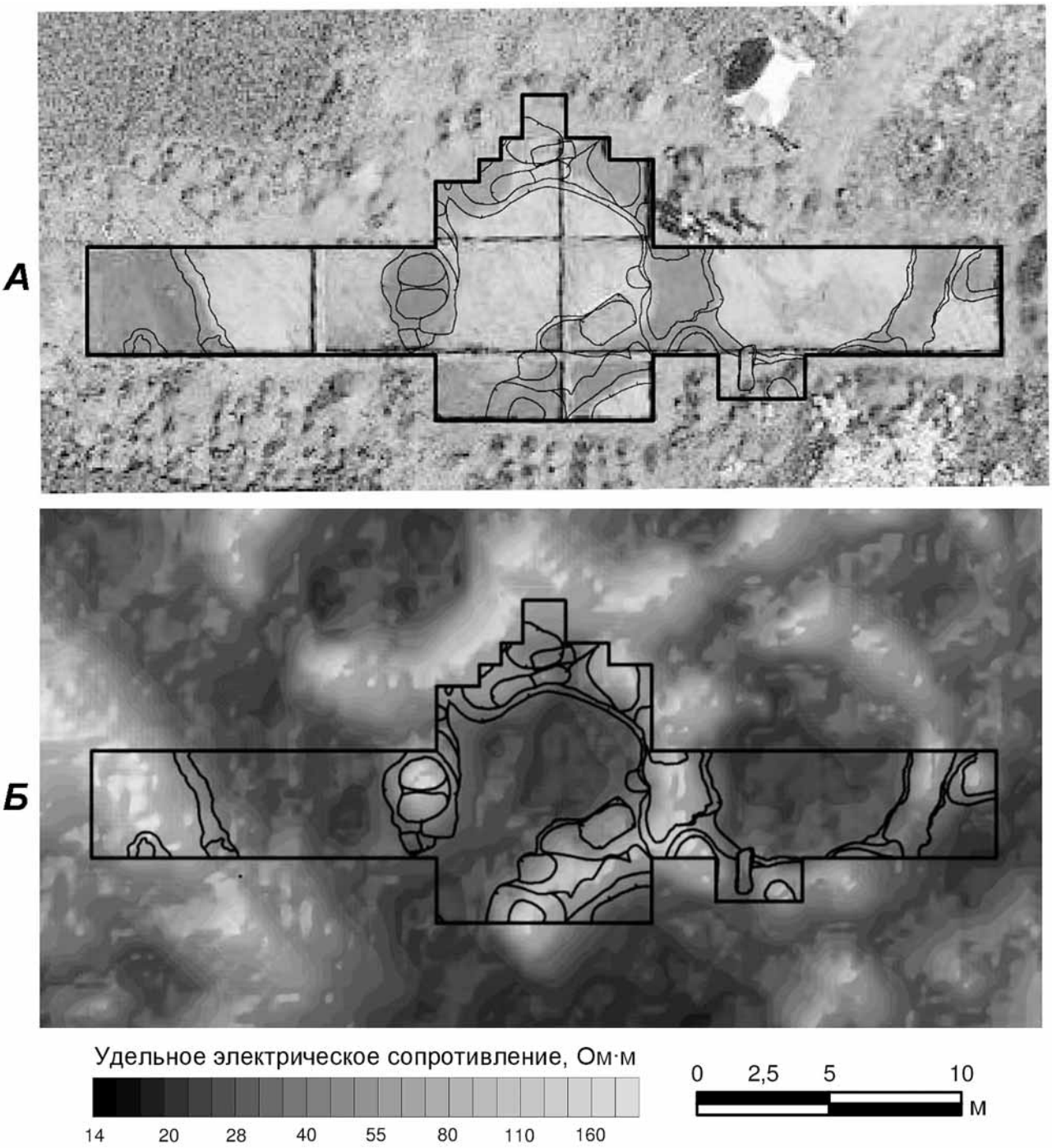

Рис. 8. Фото раскопа после снятия пахотного слоя (А) и контуры объектов (по результатам зачистки по материку), по [Макаров и др., 2017], и карта удельного электрического сопротивления на глубине около 0,45 м и контуры объектов (Б)

автоматической интерпретации данных, основная задача которых — снижение субъективности при выделении объектов.

Представляется перспективным использование полученных геофизических данных как обучающих для построения схем интерпретации материалов дистанционного зондирования региона.

Результативность геофизических исследований при решении археологических задач зависит от соотношения физических свойств археологических объектов и вмещающей геологической среды. Несмотря на сложность вмещающей почвенно-геологической обстановки и слабый контраст физических свойств, ряд невыраженных на поверхности археологических объектов некрополя Шекшово-9 отражается в геофизических данных.

В первую очередь к ним относятся неразрушенные курганные ровики. По округлой форме они легко выделяются в данных электроразведки и магниторазведки (меньшее число объектов). Правомерность интерпретации была подтверждена археологическими раскопками (как минимум 12 из

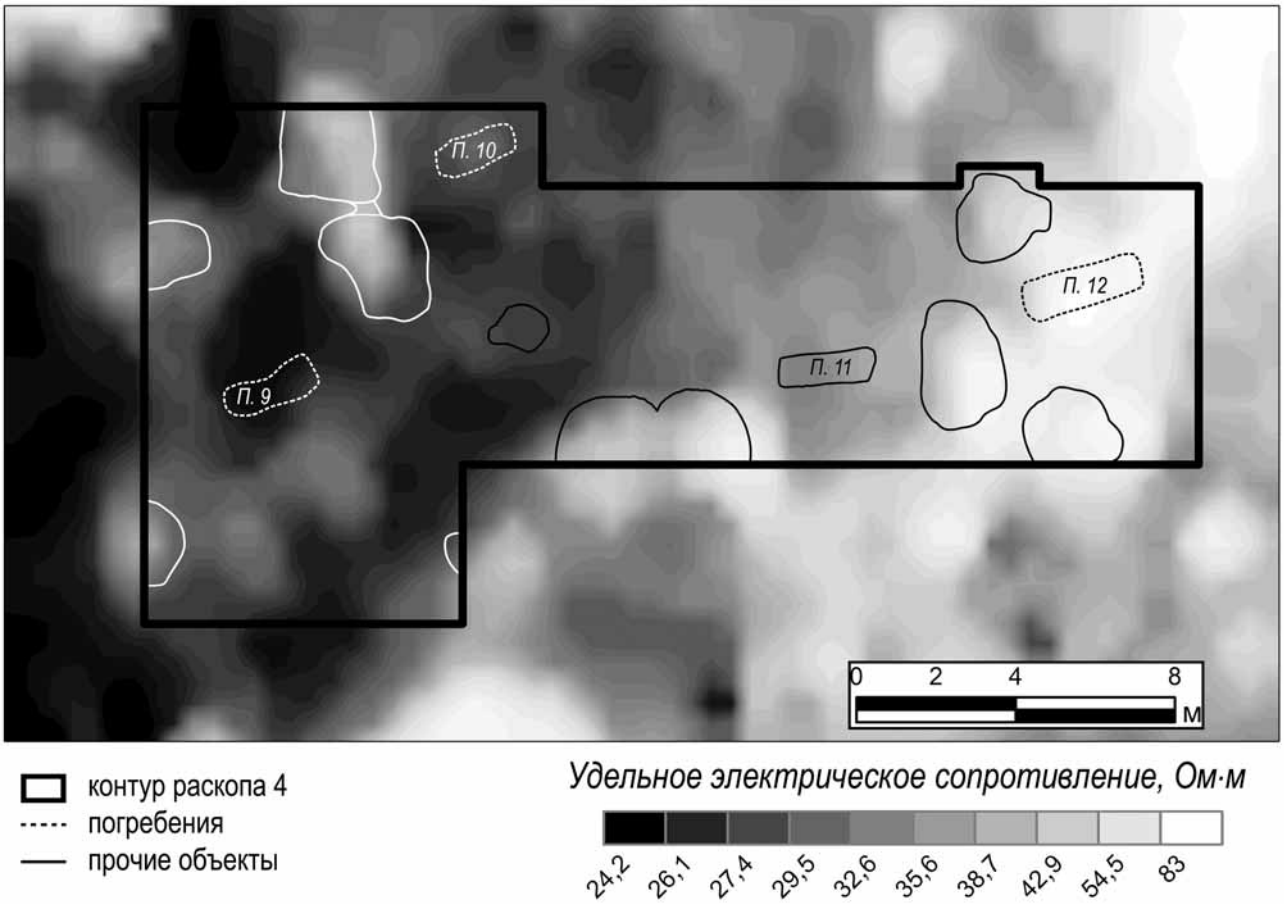

Рис. 9. Контуры объектов, выделенных в ходе археологических раскопок (раскоп 4, оставлены только крупные объекты), на карте электрического сопротивления на глубине ~0,40 м. Сплошным контуром показаны остатки курганных ровиков, пунктиром — границы погребений. Граница палеокриогенного полигона (аномалия повышенного сопротивления) пересекает восточную часть раскопа в направлении юго-запад — северо-восток

14 объектов — курганы, окруженные ровиками), что позволило восстановить структуру невыраженной в современной поверхности курганной части некрополя Шекшово-9.

Данные электротомографии позволяют с разной достоверностью картировать археологические объекты с неправильной формой (локальные) — остатки курганных ровиков, маркирующих несохранившиеся до настоящего времени насыпи, одиночные грунтовые погребения, отдельные ямы антропогенного происхождения, но неясного назначения. Основа для их выделения — интерпретация детальных геофизических данных с точки зрения выявления археологических структур как неоднородностей вмещающего геологического и почвенного разреза. Их выделение проводится на основании априорной археологической, геологической, почвоведческой информации и геофизического комплексирования электроразведки и магниторазведки. Верификация полученных результатов с помощью археологических раскопок и бурения показала практическую эффективность предложенного подхода для решения археологических задач, что в будущем позволит данным, полученным с помощью неразрушающих методов, стать полноценным источником археологической информации.

Благодарности. Авторы выражают благодарность принимавшим участие в полевых геофизических исследованиях, обработке данных и интерпретации А.А. Пелевину, С.А. Акуленко, А.М. Павловой, Т.В. Топилиной, А.Ю. Паленову, П.С. Толстову.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-18-00538).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алешинская А.С., Кочанова М.Д., Макаров Н.А., Спиридонова Е.А. Становление аграрного ландшафта Суздальского Ополья в Средневековье (по данным археологических и палеоботанических исследований) // Росс. археол. 2008. № 1. С. 35–47.

Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О. и др. Магнетизм почв. М.: Изд-во ЯГТУ, 1995.

Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызван-

ной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.

Величко А.А., Морозова Т.Д., Нечаев В.П., Порожнякова О.М. Палеокриогенез, почвенный покров и земледение. М.: Наука, 1996.

Дмитриев Е.А., Липатов Д.Н., Милановский Е.Ю. Содержание гумуса и проблема вторых гумусовых горизонтов в серых лесных почвах Владимирского Ополья // Почвоведение. 2000. № 7. С. 6–15.

Ерохин С.А., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Шевнин В.А. Картирование реликтовых полигональных структур с помощью геофизических методов // Инж. изыскания. 2011. № 11. С. 30–34.

Журбин И.В., Федорина А.Н. Комплексные геофизические исследования поселений Суздальского Ополья // Археология, этнография и антропология Евразии. 2017. Т. 45, № 2. С. 62–70.

Золотая Л.А., Калишева М.В., Хмелевской, В.К. Возможности геофизических методов при изучении состава и структуры почвенного покрова // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 47–50.

Каминский А.Е. ZondRes2D. Программа двумерной интерпретации данных метода сопротивлений и вызванной поляризации (в полигональном исполнении), 2014, URL: http://zond-geo.com/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/ (дата обращения: 22.03.2020).

Красникова А.М., Ерохин С.А., Модин И.Н. и др. Проблема поиска грунтовых погребений в Суздальском Ополье // Краткие сообщения Ин-та археологии. 2020. Вып. 259. С. 30–48.

Макаров Н.А. У колыбели Северо-Восточной Руси // Природа. 2019. № 1. С. 78–87.

Макаров Н.А., Зайцева И.Е., Красникова А.М., Угулава Н.Д. Исследование могильника Шекшово в Суздальском Ополье в 2016–2017 // Археология Владимиро-Суздальской земли: Мат-лы науч. семинара. 2017. Т. 7, С. 7–18.

Макаров Н.А., Красникова А.М., Зайцева И.Е. Средневековый могильник Шекшово в Суздальском Ополье: спустя 160 лет после раскопок А.С. Уварова // Краткие сообщения Ин-та археологии РАН. 2013. № 230. С. 219–233.

Макаров Н.А., Красникова А.М., Зайцева И.Е. Новые исследования средневековых могильников Суздальской земли // Вестн. Росс. гуманитарного науч. фонда. 2014. Т. 74, № 1. С. 156–177.

Макаров Н.А., Красникова А.М., Зайцева И.Е., Добровольская М.В. Средневековый могильник Шекшово: «Владимирские курганы» в свете новых исследований // Росс. археология. 2020. (В печати).

Макаров Н.А., Красникова А.М., Карпухин А.А. Курганные могильники Суздальской округи в контексте изучения средневекового расселения и погребальных традиций // Великий Новгород и средневековая Русь.: Сб. ст.: К 80-летию акад. В.Л. Янина. М.: Памятники исторической мысли, 2009. С. 432–454.

Макаров Н.А., Федорина А.Н., Шполянский С.В. Земля и город: средневековые селища в округе Владимирана-Клязьме // Росс. археология. 2013. № 4. С. 64–80.

Модин И.Н., Ерохин С.А., Павлова А.М. Изучение древнерусских курганов с помощью трехмерной электрической томографии и георадиолокации. // Engineering Geophysics 2014. EAGE 2014. С. 1–4.

Николаев В.А. Парагенезис полесий-ополий центральной России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 5. С. 45–49.

Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений // Геофизика. 2013. № 6. С. 32–37.

Позднякова А.И., Позднякова А.Д. Электрофизика почв. М.; Дмитров: Изд-во МГУ, 2004.

Федорина А.Н. Средневековые сельские поселения Суздальской земли по данным археологии и геофизики (исследования 2008 г.) // Краткие сообщения Ин-та археологии. 2012. № 226. С. 77–87.

Федорина А.Н., Красникова А.М., Меснянкина С.В. Локализация и исследование жилых и хозяйственных сооружений на селищах Весь-5 и Шекшово-2 с использованием методов геофизики и археологии // Археология Владимиро-Суздальской земли. 2008. № 2. С. 23–35.

David A., Linford N., Linford P. Geophysical survey in archaeological field evaluation. Swindon: English Heritage, 2008.

Erokhin S.A., Modin I.N., Pavlova A.M. 3D electrical resistivity imaging and GPR to re-explore ancient mounds near Suzdal in Russia // Archaeol. Polona. 2015, Vol. 53. P. 448–452.

Garrison E. Techniques in Archaeological Geology. Berlin: Springer, 2016.

Goldberg P., Macphail R.I. Practical and theoretical geoarchaeology. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2006.

Krasnikova A., Erokhin S., Medvedev A. et al. In search of invisible burial mounds on the Lands of North-Eastern Rus' // 25th EAA Annual Meeting (Bern, 2019). Abstr. Book. Bern, 2019.

Krasnikova A., Fedorina A., Erokhin S. et al. Shekshovo burial site: a case of geophysics' investigation of medieval cemetery. Barcelona, European Association of Archaeologists, 2018. 765 p.

Loke M.H., Chambers J.E., Rucker D.F. et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method // J. Appl. Geophys., 2013. N 95. P. 135–156.

Papadopoulos N.G., Tsourlos P., Tsokas G.N., Sarris A., Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation // Archaeol. Prosp. 2006. Vol. 13, N 3. P. 163–181.

Schmidt A. Electrical and magnetic methods in archaeological prospection // Seeing the Unseen. Geophysics and Landscape Archaeology. London: Taylor, Francis Group., 2009. P. 67–81.

Schmidt A., Linford P., Linford N. et al. EAC guidelines for the use of geophysics in archaeology: Questions to Ask and Points to Consider. Namur: Europae Archaeologia Consilium (EAC), 2015.

Siart C. Digital geoarchaeology // New Techniques for Interdisciplinary Human-Environmental Res. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2018.

Stumpel H. Geophysical Prospection in Suzdal — Russia. Kiel: Inst. Geosci., 2007.

Velichko A.A., Morozova T.D., Nechaev V.P. et al. Loess/paleosol/cryogenic formation and structure near the northern limit of loess deposition, East European Plain, Russia // Quatern. Intern. 2006. N 152–153. P. 14–30.

Yang X., Lagmanson M. Comparison of 2D and 3D electrical resistivity imaging methods. comparison of 2d and 3d electrical resistivity imaging methods // Symp. on the application of geophysics to engineering and environmental problems. 2006. P. 585–594.

Поступила в редакцию 00.00.2020

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020