КОМПЛЕКСНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗДУШНОГО И НАЗЕМНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.М. Курков¹, Т.Н. Скрипичина¹, Д.В. Журавлев², У. Шлотцауер³, А.А. Кобзев¹, В.А. Князь⁴, К. Мишке⁵

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), г. Москва,

² Государственный исторический музей (ГИМ), г. Москва

³ Евразийский отдел Германского археологического Института, г.Берлин

⁴ Государственный научно исследовательский институт авиационных систем (ГосНИИАС), г. Москва

⁵ Институт древнейшей истории университета Фридрих-Александра,
г. Ерланген – Нюрнберг

vkurkov@inbox.ru, mola_mola@rambler.ru, denzhuravlev@mail.ru, udo.schlotzhauer@dainst.de, ant50044@ya.ru,
knyaz@gosniias.ru, carstenmischka@gmail.com

Аннотация – В настоящей статье рассмотрены технологии и методы комплексного обследования археологических памятников с использованием беспилотной аэрофотосъемки и магнитометрической наземной разведки. Объекты исследования расположены на Таманском полуострове, где уже более 10 лет работает Боспорская археологическая экспедиция. Аэрофотосъемка выполнялась комплексом «Геоскан 101 Геодезия» с определением высокоточных центров проекции для площадных объектов и квадрокоптером DJI Phantom 4 Pro для сравнительно небольших локальных объектов. Фотограмметрическая обработка выполнена в программе Agisoft PhotoScan. Новые технологии геодезической привязки аэрофотоснимков и фотограмметрической обработки позволили обеспечить высокую точность позиционирования и достоверность полученных документов о местности (цифровых моделей местности и рельефа, ортофотопланов, трехмерных реалистичных моделей местности и объектов). Магнитометрическая съёмка выполнена 4-х датчиковым индукционным градиометром SENSYS высокого разрешения и чувствительности с привязкой магнитотраграмм в общеземную геодезическую систему координат WGS-84, что и материалы аэрофотосъемки. Сопоставление и анализ данных воздушного и наземного зондирования выполнен геоинформационной системе QGIS. Полученные данные с использованием геоинформационных технологий позволяют повысить качество и достоверность прогнозов и гипотез в археологических изысканиях.

Ключевые слова: археология, беспилотная аэрофотосъемка, фотограмметрия, цифровые модели местности и рельефа, трехмерные реалистичные модели местности, магнитометрия, геоинформационные системы и технологии.

1. Введение

Появление беспилотных авиационных систем (БАС), используемых для дистанционного зондирования, привело к тому, что археологические исследования перешли на новый качественный виток своего развития. Материалы, полученные с БАС и обработанные в специальных программных продуктах, несут разнообразные данные об объекте исследования, превосходящие по информативности традиционные методы инструментальной топографической съемки.

Это не только графические планы и ортофотопланы. Новым продуктом, позволяющим анализировать местность, являются цифровые матрицы поверхности и трехмерные высокоточные реалистичные модели, построенные на основе плотных облаков точек. В сочетании с магнитометрией, полученные материалы служат основой для создания геоинформационных систем и дальнейших исследований.

Данная работа была проведена в рамках гранта РФФИ, № 17–29–04410, «Разработка методов автоматической обработки и документирования поле-

вых исследований археологических памятников». Настоящий этап работы заключался в проведении аэрофотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов Геоскан–101 и DJI Phantom 4 PRO отдельных археологических объектов на Таманском полуострове: Голубицкая 2, Стрелка 2, Семибратнее городище и Семибратние курганы, городище Красный Октябрь 1, гора Бориса и Глеба.

Стоит отметить, что самая последняя полная археологическая карта полуострова с обозначениями археологических объектов составлена Я.М. Паромовым в 1982–1991 годах [1] по материалам инструментальной съемки и дешифрирования по аэрофотоснимкам. Часть исследуемых нами объектов (Семибратнее городище и Семибратние курганы) на этой карте не отмечены, т.к. находятся за пределами Таманского полуострова.

Но к настоящему моменту карта Я.М. Паромова уже не отражает всей совокупности памятников, открытых и исследованных в последние годы, в том числе при масштабных новостроечных работах в регионе.

Более 10 лет Боспорская археологическая экспедиция (БАЭ) Государственного исторического музея и Евразийского отдела Германского археологического Института проводят археологические разведки на таких сельских памятниках как Голубицкая 2, Ахтанизовская 1, Сенная 11, Солёный 3, Старотитаровская 14, Стрелка 2, Виноградный 2, в ходе которых выполнена топографическая съёмка [2].

Съёмка с БАС позволяет уточнить границы ещё шести исследуемых поселений, получить топографические планы и подготовить программу следующих экспедиций.

2. Характеристика объектов

Исследования проводились на ряде объектов позднеархаического – классического времени (VI-V до н.э.), т.е. периоду греческой колонизации региона и Боспорского царства [3].

В геоморфологическом отношении территория полуострова представляет собой систему возвышенностей и понижений с крутыми обрывистыми берегами, обрамляющих широкую ложбину, которая, согласно последним исследованиям, является бывшим ложем пролива, соединявшего современные Азовское и Черное моря [4,5]. Часть из исследуемых памятников располагалась к северо-востоку Ахтанизовского лимана – Голубицкая 2, Стрелка 2, другие – Семибратнее городище и курганы; городище Красный Октябрь 1 – по руслу бывшего пролива [5].

3. Методы и технологии воздушного и наземного зондирования

В настоящее время в различных областях человеческой деятельности используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) полученные средствами аэрокосмической съёмки, в том числе и беспилотной. Для зондирования Земли используются сенсоры (камеры) как видимого диапазона, так и мультиспектральные, гиперспектральные, радиолокационные, тепловизионные, лазерное сканирование, магнитометрические и другие. Для того чтобы «заглянуть» вглубь Земли используются методы георадарной и магнитометрической съёмки. Комплексный геоинформационный анализ таких разнородных данных на одну территорию или объект позволяет получить новые знания об объектах и явлениях на земле и под землей [6]. В настоящей статье приведены результаты обработки данных беспилотной АФС с БАС и магнитометрической съёмки.

3.1. Аэрофотосъёмка и ее геодезическое обеспечение

Для аэрофотосъёмки памятников археологии Таманского полуострова были использованы беспилотные воздушные суда (БВС) двух типов коптерного

типа компании DJI Phantom 4 PRO с камерой FC6310 (фокусное расстояние – 8.8 мм, размер матрицы – 5472X3648, пиксель – 2,4 мкм) и самолетного типа Геоскан – 101 с камерой Sony DCS RX1R (фокусное расстояние – 35 мм, размер матрицы – 6000X4000, пиксель – 6 мкм) и бортовым геодезическим приемником Topcon B110 для определения высокоточных центров проекции. Квадрокоптер был использован для АФС локальных участков с пространственным разрешением на местности 2–3 см, а Геоскан-101 для съёмки сравнительно больших территорий с размером пикселя на земле 9–10 см.

Геодезическое обеспечение аэрофотосъёмочных работ состояло из планово-высотной подготовки (ПВП) для съёмки с БАС DJI Phantom 4 PRO и определение координат центров проекции аэроснимков при съёмке с БАС Геоскан-101. Все материалы привязывались в общеземной системе координат WGS84 от постояннодействующей базовой станции, расположенной в городе Темрюк. Её координаты были определены с использованием метода Precise Point Positioning (PPP) по 5-часовым наблюдениям.

От этой базовой станции были определены координаты локальных базовых станций, которые, в свою очередь, были использованы для определения координат точек ПВП и центров проекции.

Измерения производились приборами Topcon HiPer с дискретностью 1 Гц по GPS L1/L2.

В качестве опорных точек выступали маркированные опознаки. Обработка статических сессий спутниковых наблюдений производилась в ПО Pinnacle и GrafNet. Оценка точности вычисления координат составила порядка 1–2 сантиметров в трехмерном пространстве.

Аэрофотосъёмка с Phantom 4 PRO производилась с высоты 70 метров. При аналитической фототриангуляции в ПО Agisoft Photoscan СКП в плане составила 2 см, по высоте 6 см.

При аэрофотосъёмке с Геоскан-101 Геодезия производилась кинематические спутниковые наблюдения с дискретностью 10 Гц бортовым приемником Topcon B110 с антенной MAXTENA. Определение координат центров проекции аэроснимков производилось в два этапа: 1) обработка траектории и оценка её точности 2) совмещение с траекторией моментов фотографирования по времени, фиксируемого автопилотом.

Вычисление траектории производилось в ПО Waypoint GrafNav по данным GPS L1/L2 и выполнялось в прямом и обратном направлениях. Это позволило убедиться в верности разрешения фазовой неоднозначности. Среднее квадратическое отклоне-

ние в определении координат точек прямо и обратно составило 2 мм, что свидетельствует о верности разрешения неоднозначности.

Затем с обработанной траекторией были совмещены метки, соответствующие по времени моментам срабатывания затвора камеры. Путем интерполирования их положения между ближайшими измерениями, были получены координаты центров проекции аэроснимков и составлен каталог, содержащий координаты и оценку их точности. Он был загружен в Photoscan и координаты центров проекции аэроснимков были использованы в качестве опорной информации.

Таким образом, результаты аэрофотосъемки были привязаны в общеземной СК с высокой точностью – первые сантиметры. Привязка магнитометрической съемки, выполненной коллегами из немецкого Университета Erlangen-Nuremberg, выполнена в той же системе координат и теми же исходными пунктами, что обеспечило идентичность позиционирования данных АФС и магнитометрии.

3.2. Фотограмметрическая обработка как метод получения документов о местности

Фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков выполнена в программе Agisoft PhotoScan.

Построение и уравнивание фототриангуляции, для съемки с высоты 600 м камерой Sony RX1R выполнено с использованием только высокоточных центров проекции как опорных данных и проверено по контрольным точкам, координаты которых определены на предыдущем этапе. Погрешности составили 4 см в плане и 3 см по высоте.

Для привязки АФС, выполненной коптером, использовались маркированные опознаки. Остаточные средние погрешности в фототриангуляции на опорных точках составили 2–3 см.

Последующая фотограмметрическая обработка состояла в построении плотного облака точек, цифровой модели поверхности и рельефа, ортофотоплана, трехмерной текстурированной модели местности. Полученные документы о местности экспортированы в свободную геоинформационную платформу Quantum GIS (QGIS) для последующего исследования и анализа.

3.3. Магнитометрическая съемка

Геомагнитная съемка районов Семибратнее городище и городище Красный Октябрь проводилась в апреле 2018 года группой сотрудников Института Древнейшей истории Университета Фридрих-Александра города Эрланген – Нюрнберг. В обоих районах магнитометрическая съемка выполнялась 4-х датчиковым индукционным

градиометром SENSYS. Каждый датчик состоит из двух индукционных сенсоров, измеряющих местное магнитное поле с разрешением 0.1 nT. Измеряемая величина (вертикальный градиент) есть разность значений верхнего сенсора (практически неподверженного влиянию подземных аномалий) и нижнего сенсора (располагаемого как можно ближе к поверхности земли), так что абсолютная напряженность и периодические изменения магнитного поля не оказывают влияния на процесс измерений. Датчики расположены последовательно один за другим на расстоянии 50 см, и каждые 5 см в направлении движения снимается значение магнитного поля в текущей точке. Исходные данные, получаемые в форме массива измерений с шагом 50×5 см, пересчитываются в массив с шагом 10×10 см для дальнейшей постобработки.

Градиометр оснащён приёмником DGPS для оценки положения прибора в процессе магнитометрических измерений, что обеспечивает автоматическую геопривязку получаемых магнитограмм.

Результирующее изображение интенсивности магнитного поля (магнитограмма) показывает положительные аномалии темными оттенками серого и отрицательные аномалии – светлыми оттенками серого. В местах археологических раскопок положительные аномалии обычно соответствуют углублениям, содержащим захороненные материалы (кирпичи, черепки, куски штукатурки и т.п.), обладающие повышенной магнитной восприимчивостью. Такой же, но обычно более слабый эффект дают углубления и рвы, заполненные некоторым количеством пахотного слоя почвы, обычно имеющего более высокую магнитную восприимчивость, чем более глубокие слои почвы. Отрицательные аномалии указывают на отсутствие почвы, вызванное, например, наличием стен, построенных из немагнитного материала (но также вследствие большего расстояния от сенсора до поверхности, обусловленного следами сельскохозяйственными работами).

4. Интерпретация результатов зондирования. Выводы и гипотезы

Рассмотрим результаты интерпретации цифровых моделей местности, ортофотопланов и магнитометрии на двух участках: Красный Октябрь 1(КО1) и Семибратнее городище.

Используя простой подход геоморфометрического анализа (аналитическая отмычка рельефа, она же карта отражательной способности, с различными значениями азимута и высоты Солнца) на матрицах были выделены элементы местности, что в различных вариантах визуализации позволило

произвести дешифрирование объектов и определить их метрические характеристики. На рис. 1 представлена цифровая модель местности КО1 в различных

вариантах визуализации: а) – черно-белое растровое изображение; б) – теневая отмывка и изолинии, проведенные через 1 м

Рис. 1. Цифровая модель местности в различных вариантах визуализации.

На иллюстрации отчетливо прослеживаются границы городища с укрепленной частью и дороги. На рис. 1а околнурена граница поселения, интерпретированная по черно-белому изображению.

Трехмерная текстурированная модель (фрагмент представлен на рис. 2) позволила изучить объект под разными ракурсами в различных масштабах.

Особенно это ценно для обследования труднодоступных и заселенный участков памятника. На рисунке прослеживаются валы и башни по периметру поселения.

Данные материалы позволяют дополнить исследования Паромова (рис. 3), которые были ограничены там, где территория памятника занята усадьбами современного поселка.

Рис. 2. Фрагмент трехмерной текстурированной модели.

Рис. 3. Фрагмент инструментальной съемки Я.М. Паромова

На рис. 3 – а) Общий план поселения КО1, б) Укрепленная часть поселения КО1

На городище Красный Октябрь результаты магнитометрии не столь ясны. Множество углублений указывают на древнюю поселенческую активность, но никаких зданий или, по крайней мере, упорядоченных структур в аномалиях не прослеживается. Также фортификационные сооружения остаются невидимыми (все аномалии на границах городища обусловлены следами сельскохозяйственных работ).

Исследование Семибратнего городища, дало более интересные результаты. На ортофотоплане, полученном по материалам съемки с БАС (рис. 4), и цифровой модели поверхности в гипсометрической окраске (рис.5), отчетливо прослеживаются границы поселения, валы укрепленной части городища и дороги, ведущие в укрепленную часть.

По данным дистанционного зондирования площадь поселения (включая укрепление) составила порядка 0.31 км².

Рис. 4. Ортофотоплан Семибратнего городища. Кружками отмечены валы укрепленной части города и прямоугольная часть фундамента.

Рис. 5. Цифровая модель поверхности: а – в теневой отмывке; б – гипсометрической окраске

Рис. 6. Совмещение магнитометрии, цифровой модели поверхности и результатов дешифрирования

На рисунке 5 читаются: 1 – следы дороги; 2 – валы укрепленной части, 3- граница поселения.

В районе городища Семибратнее магнитограммы показывают множество археологических структур (рис.6). Линейные отрицательные аномалии соответствуют городским стенам на юго-востоке и фундаментам нескольких зданий внутри и вне черты города. Широкие положительные линейные аномалии параллельные городским стенам могут быть интерпретированы

как фортификационные рвы. Множество массивных обширных положительных аномалий может быть интерпретировано как комнаты/подвалы с погребённым материалом, что позволяет локализовать большее количество зданий в районе города. Дополнительные положительные аномалии указывают на углубления как на свидетельство интенсивных поселенческих работ, которые могут быть отмечены как основной индикатор плотности заселения.

5. Заключение

Проведенные исследования с использованием современных методов и технологий беспилотной аэрофотосъемки, фотограмметрической обработки и наземной магнитометрической разведки позволяют получать точные и достоверные данные об археологических памятниках и повысить качество прогнозов и гипотез в археологических изысканиях.

Благодарности. Компании «Геоскан» за предоставленное аэрофотосъемочное оборудование и организационное обеспечение при выполнении АФС работ.

Работы проведены в рамках гранта РФФИ, № 17-29-04410, «Разработка методов автоматической обработки и документирования полевых исследований археологических памятников» (2017–2019)

Список литературы

1. Паромов Я.М. Археологическая карта Таманского полуострова // Российская академия наук, Институт археологии, – 1992. – С.
2. Батасова А.В. Система греческого расселения на Таманском полуострове VI – начале V в. до н. э. // Древние эллины между Понтом Эвксинским и Меотидой. К 10-летию Боспорской археологической экспедиции. Сборник статей / Сост., науч. ред. Д.В. Журавлев, У. Шлотцауер – М.: Исторический музей. – 2016. – Стр. 35–39
3. Журавлев Д.В. Шлотцауер У. Десять лет Боспорской археологической экспедиции. // Древние эллины между Понтом Эвксинским и Меотидой. К 10-летию Боспорской археологической экспедиции. Сборник статей / Сост., науч. ред. Д.В. Журавлев, У. Шлотцауер – М.: Исторический музей. – 2016. – Стр. 8–20.
4. Трифонов В.Г., Караханян А.С. Геодинамика и история цивилизаций // М.- Наука, – 2004. С.
5. Кельтербаум Д., Журавлев Д.В., Шлотцауер У. Исследования в области палеогеографии Таманского полуострова. // Древние эллины между Понтом Эвксинским и Меотидой. К 10-летию Боспорской археологической экспедиции. Сборник статей / Сост., науч. ред. Д.В. Журавлев, У. Шлотцауер – М.: Исторический музей. – 2016. – Стр. 21–27.
6. Chibunichev, A.G., Knyaz, V.A., Zhuravlev, D.V., and Kurkov, V.M. PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHAEOLOGY: COLLECTING PIECES TOGETHER, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, 235–240, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-235-2018>, 2018.

COMPREHENSIVE SURVEY OF ARCHAEOLOGICAL SITES BY GROUND AND AERIAL REMOTE SENSING TECHNIQUES

V.M. Kurkov¹, T.N. Skripitsina¹, D.V. Zhuravlev², U. Schlotzhauer³, A.A. Kobzev¹, V.A. Knyaz⁴, C. Mischka⁵,

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIGAIK), Moscow, Russia

² State Historical Museum (GIM), Moscow, Russia

³ German Archaeological Institute, Eurasia Department, Berlin, Germany

⁴ State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia

⁵ Institute for Prehistory at the Friedrich-Alexander-University Erlangen-Nuremberg, Germany
vkurkov@inbox.ru, mola_mola@rambler.ru, denzhuravlev@mail.ru, udo.schlotzhauer@dainst.de, ant50044@ya.ru, knyaz@gosniias.ru, carstenmischka@gmail.com

Abstract – In this article, we consider technologies and methods for a comprehensive survey of archaeological sites using unmanned aerial photography and magnetometric ground survey. The study was performed on the Taman peninsula at archaeological sites of the Bosporean archaeological expedition. Aerial survey was carried out by “Geoscan 101 Geodesy” complex with high-precision definition of projection centers for area objects and by UAV DJI Phantom 4 Pro for relatively small objects. Photogrammetric processing was performed by Agisoft PhotoScan software. New technologies for geodetic reference of aerial photographs and photogrammetric processing made it possible to provide high accuracy of positioning and reliability of produced digital documents (digital terrain and elevation models, orthophotos, realistic 3D models of terrain and objects). The gradiometer-survey was conducted, using a high resolution SENSYS-build 4-probe Fluxgate-Gradiometer equipped with a DGPS-antenna. So the obtained magnetograms were automatically georeferenced to the WGS-84 geodetic coordinate system, as well as aerial photographs. Comparison and analysis of airborne and ground-based remote sensing data was carried out using QGIS geographic information system. The developed techniques for fusion of different types of remote sensing data allow improving the quality and reliability of predictions and hypotheses in archaeological research and serve as a basis for archaeological geoinformation systems of Taman peninsula.

Key words: archeology, unmanned aerial photography, photogrammetry, digital terrain and relief models, three-dimensional realistic terrain models, magnetometry, geoinformation systems and technologies.

References

1. Paromov Ja.M. Arheologicheskaja karta Tamanskogo poluostrova// Rossijskaja akademija nauk, Institut arheologii, – 1992. – S.
2. Batasova A. V. Sistema grecheskogo rasselenija na Tamanskom poluostrove v VI – nachale V v. do n. je.// Drevnie jelliny mezhdru Pontom Jevksinskim i Meotidoj. K 10-letiju Bosporskoj arheologicheskoi jekspedicii. Sbornik statej / Sost.,nauch. red. D.V. Zhuravlev, U. Schlotzhauer – M.: Istoricheskij muzej. – 2016. – Str.35–39
3. Zhuravlev D.V. Schlotzhauer U. Desjat' let Bosporskoj arheologicheskoi jekspedicii.// Drevnie jelliny mezhdru Pontom Jevksinskim i Meotidoj. K 10-letiju Bosporskoj arheologicheskoi jekspedicii. Sbornik statej / Sost.,nauch. red. D.V. Zhuravlev, U. Schlotzhauer – M.: Istoricheskij muzej. – 2016. – Str.8–20.
4. Trifonov V.G., Karahanjan A.S. Geodinamika i istorija civilizacij//M.- Nauka, – 2004. S.
5. Kel'terbaum D., Zhuravlev D.V., Schlotzhauer U. Issledovanija v oblasti paleogeografii Tamanskogo poluostrova.//Drevnie jelliny mezhdru Pontom Jevksinskim i Meotidoj. K 10-letiju Bosporskoj arheologicheskoi jekspedicii. Sbornik statej / Sost.,nauch. red. D.V. Zhuravlev, U. Schlotzhauer – M.: Istoricheskij muzej. – 2016. – Str. 21–27.
6. Chibunichev, A.G., Knyaz, V.A., Zhuravlev, D.V., and Kurkov, V.M. PHOTOGRAMMETRY FOR ARCHAEOLOGY: COLLECTING PIECES TOGETHER, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, 235–240, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-235-2018>, 2018.