

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ МЕТОДОВ В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 903.5:004.93(571.1)

Е.П. Крупочкин^{1,2}, Д.В. Папин^{1,2}, Я.В. Фролов¹, А.А. Редников¹, П.И. Шульга²

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

²Институт археологии и этнографии СО РАН, Новосибирск, Россия

О РЕЗУЛЬТАТАХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ БПЛА-СЪЕМКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МОГИЛЬНИКА УРОЧИЩЕ БАЛЧИКОВА-3 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕРЫ PARROT SEQUOIA*

В рамках расширяющихся технических и технологических возможностей естественно-научных методов археологии своего рода опоры представляют методы геоархеологии, применяющиеся в комплексе с классическими методиками разведки и полевых археологических раскопок.

Некрополь Урочище Балчикова-3 является уникальным объектом для северных предгорий Алтая. Это единственный элитный курган пазырыкской культуры на указанной территории. Размеры конструкций кургана сопоставимы с «царскими» некрополями Пазырык, Шибе, Берель и Катанда. В отличие от большинства элитных курганов пазырыкской культуры, на памятнике Урочище Балчикова-3 можно проследить конструктивные элементы надмогильного сооружения, представленные обводной оградой и крепидой из плит по периметру насыпи. Эти особенности позволяют использовать памятник в качестве экспериментального полигона. Представленная в настоящей статье методика является продолжением темы использования БПЛА в археологии, но не для получения снимков объекта или раскопа, а для изучения возможностей съемки с изменяемой полезной нагрузкой. По мнению авторов, актуальными и перспективными являются поисково-экспериментальные работы, предполагающие использование в качестве полезной нагрузки мультиспектральной камеры и определение ее возможностей при совместной (с обычной камерой) съемке. Все съемочные материалы получены с помощью аппарата DJI Inspire-1. Реализация полетных заданий и контроль съемки производились в программе Pix4D Capture. Для получения продуктов фотограмметрической обработки (ортофотопланов и 3Д-моделей памятников) использовалась программа Agisoft PhotoScan. Для обработки мультиспектральных снимков применялись программы ENVI, ArcGIS. Мультиспектральная съемка, основанная на использовании портативных камер для БПЛА, представляет собой важнейшую часть поисковых и разведочных работ. Полученные при этом материалы содержат весьма ценные и зачастую новые сведения о территории и объектах археологии, содержащих артефакты. Вместе с тем такие данные не представляют самостоятельный вид источника, они не должны быть оторваны от ландшафта и природно-географических условий.

Ключевые слова: археологическое картографирование, методы геоинформатики и картографии в археологии, беспилотные системы и аэрофотосъемка.

DOI: 10.14258/tpai(2019)4(28).-07

Введение

Изучение археологических памятников представляет собой сложную и актуальную задачу, поскольку ее решение охватывает области интереса не только археологии, но и других научных направлений. Последние наиболее ярко зарекомендовали себя в междисциплинарных исследованиях объектов археологического наследия, в частности в области естественных наук. В рамках расширяющихся технических и технологических возможностей естественно-научных методов археологии своего рода опоры представляют

* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проекты №18-05-00864 «Разработка теории и методов археологического ГИС-картографирования и анализа геоархеологических данных (на примере модельных территорий Алтая)» и №19-49-220006 «Крупные курганы элиты древних и средневековых кочевников на территории Алтайского края как объекты экскурсионно-туристической деятельности: историко-археологические и естественно-научные исследования».

методы геоархеологии, применяющиеся в комплексе с классическими методиками разведки и полевых археологических раскопок. Между тем все более важное значение приобретают новые способы и приемы получения актуальных сведений о состоянии и точном расположении археологических объектов, их размерах и предполагаемых границах. С одной стороны, это связано с необходимостью проведения экспертиз, сопровождения инженерных изысканий и плановых научных исследований, с другой – затрагивает проблемы кадастровых работ и оценки ранее не учтенных объектов с возможным расположением археологических памятников. Во всех подобных случаях необходимо наличие точных данных с возможностью визуализации в ГИС с картографическим обеспечением.

Район наших исследований расположен на территории Алтайского края, на юго-западной границе с Республикой Алтай (рис. 1). В физико-географическом отношении располагается в низкогорной зоне с высотой над уровнем моря 650–1000 м. Прежде всего, научный интерес представляет археологический комплекс Урочище Балчикова-3, а также другие археологические объекты долины р. Сентелек.

Объектом исследования является некрополь Урочище Балчикова-3. Памятник расположен в 3,6 км к юго-западу от с. Сентелек на левом берегу р. Сентелек, выше по ее течению. Могильник открыт П.И. Шульгой в 1991 г. [Кирюшин и др., 2001 с. 29]. Некрополь насчитывает более 20 курганов. Значительная их часть покрыта мощным слоем гумуса. Часть из объектов полностью скрыта почвенным слоем, поэтому точное количество насыпей еще предстоит выяснить. Наиболее крупным объектом на могильнике является «царский» курган № 1 размерами в плане 45×48 м, высотой до 2 м от уровня древней поверхности в восточной части насыпи.

На площади памятника проводились работы по музеефикации погребальных объектов. На территории вокруг центрального кургана был снят слой гумуса мощностью до 0,5–0,7 м до уровня древней поверхности, зафиксированной по особенностям сооружения конструкций кургана №1. Площадь работ составила 120×90 м. Кроме того, были расчищены насыпи и сопутствующие конструкции «царского» кургана №1 и примыкающих к нему небольших курганов (рис. 2). Максимальные размеры кургана №1 – 45×48 м. Надмогильная конструкция кургана №1 имела округлую в плане форму. Юго-восточная



Рис. 1. Схема расположения района исследований
(Источник: <https://github.com/der-stefan/OpenTopoMap>)

пола насыпи слегка вытянута в направлении общего уклона террасы – в сторону берега р. Сентелек. Конструкция кургана «сползла» вниз по склону, в результате ее первоначальный внешний вид был нарушен. Максимальная высота насыпи от уровня древней поверхности в северо-западной (верхней по склону) части составляла 0,6 м и в нижней, юго-восточной части – 1,7–2 м (рис. 2). В ходе расчистки конструкций кургана выяснилось, что значительная часть каменной наброски в центре насыпи была снята еще в древности и, скорее всего, использована на сооружение средневековых курганов. В результате на поверхности насыпи появились выемки глубиной до 1 м. По периметру конструкции кургана были расчищены плиты лепестковидной крепиды. У северо-западной, верхней по склону, полы кургана №1 расчищено обводное кольцо из лежащих плит длиной 1–1,5 м. В древности они устанавливались вертикально и образовывали круговую ограду, замыкающую внутрикурганное пространство. Максимальный диаметр круговой ограды не превышал 44 м. Ширина свободного пространства между насыпью и оградой составляет не более 1,5 м. Общие размеры насыпи кургана изначально составляли около 41–42 м. В центральной части конструкции кургана прослежена крупная воронка грабительского раскопа глубиной более 3 м. Судя по внешнему виду котлована, на месте погребения центральные подкурганые конструкции были выбраны полностью. По конфигурации ямы раскопа можно предположить, что в плане она была подквадратной, размерами примерно 7×7 м, глубиной около 5 м. Вероятно, захоронение было полностью раскопано по всей его площади. [Шульга, 2016, с. 107].

В 2000 и 2001 гг. в ходе работ по музеефикации памятника курган №1 не раскапывался. Были расчищены наземные конструкции кургана №1 и прилегающая к нему

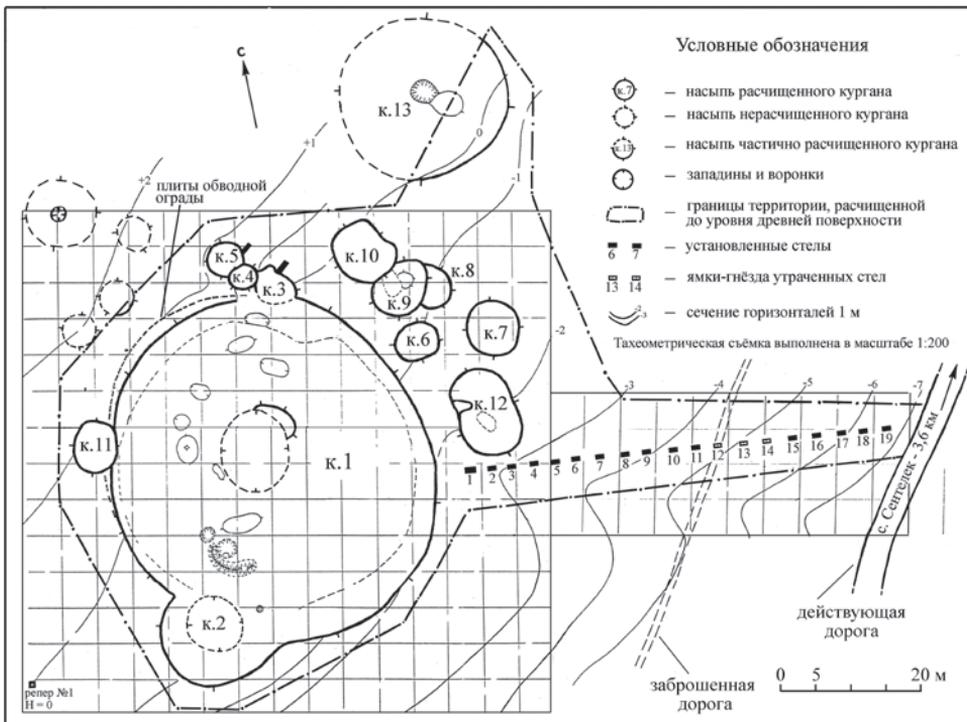


Рис. 2. Погребально-поминальный комплекс – «царский» курган №1 на могильнике Урочище Балчикова-3 в Сентелеке. План кургана №1 и прилегающих объектов по окончании работ в 2000 г. (по: [Шульга, 2016, с. 9])

площадка, включающая серию небольших подкурганых захоронений. На ней выявлено 11 насыпей курганов диаметром 6–11 м [Кирюшин и др., 2001, с. 34–35]. Был расчищен также участок вокруг ряда из 19 стел, примыкающего к конструкциям кургана №1. Большинство поваленных стел, имеющих длину 3–4,55 м, было поднято и установлено на прежние места их расположения. В настоящее время ряд стел протяженностью 62 м начинается в 4 м от восточной полы кургана. Расстояние между стелами составляет 3–3,2 м. Все стелы прямоугольные в сечении, первоначально устанавливались узкими сторонами по линии З–В [Шульга, 2016, с. 107].

Форма и размеры наземных конструкций кургана №1 и наличие ряда стел свидетельствуют о том, что этот объект является элитным захоронением пазырыкской культуры [Шульга, 2016, с. 108]. Раскопанные на памятнике пять курганов (№3–7) относятся к хуннуско-сяньбийско-жужанскому времени и раннему средневековью [Шульга, Горбунов, 2002, с. 112].

Среди проведенных ранее обследований (раскопок и разведок) комплекса Урочище Балчикова-3 следует отметить магнитометрическую съемку, проведенную в 2017 г. по инициативе А.А. Тишкина с использованием БПЛА. Магнитометрическая съемка проводилась для части территории археологического памятника Урочище Балчикова-3. Результаты работы показали адекватное отражение фиксаций разного уровня. Данное обстоятельство позволяет сделать заключение об эффективности использования методики для исследований в горной местности в целях детальной фиксации археологических объектов, в том числе разрушенных в ходе различных обстоятельств [Тишкин и др., 2017].

Представленная методика является продолжением темы использования БПЛА в археологии, но не для получения снимков объекта или раскопа, а для изучения возможностей съемки с изменяемой полезной нагрузкой. По мнению авторов, актуальными и перспективными являются поисково-экспериментальные работы, предполагающие использование в качестве полезной нагрузки мультиспектральной камеры и определение ее возможностей при совместной (с обычной камерой) съемке.

Материалы и методы

Целью исследований является апробация методики азроразведки для поиска археологических памятников и установления их границ по материалам беспилотной мультиспектральной съемки.

Задачи исследований:

- 1) отработка технологии мультиспектральной съемки с помощью камеры Parrot Sequoia, адаптированная для платформы DJI Inspire-1;
- 2) съемка в видимом диапазоне и комбинированная съемка, обеспечивающая создание ортофотопланов и цифровых моделей местности (включая 3Д-модели);
- 3) оптимизация методики фотограмметрической обработки материалов мультиспектральной и классической съемок с учетом характеристик съемочного оборудования;
- 4) тематическое дешифрирование полученных данных для определения возможностей поиска археологических объектов разного типа, определения границ памятников и их состояния и др.

Описание объектов и методики исследований

Применение мультиспектральной съемки является не совсем обычным средством (инструментом) археологической разведки, однако количество примеров ее использования становится все больше. Так, А.И. Назмутдинова, В.Н. Милич, И.В. Журбин использовали данный вид съемки совместно с геофизикой и методами электропрофилирования при исследовании средневекового Кушманского городища Уччакар. Авторам удалось выделить участки мощного гумусированного слоя, который характеризуется интенсивными процессами почвообразования. При сопоставлении с БПЛА-съемкой

в видимом диапазоне выяснилось, что такие особенности не выражены в рельефе, т.е. возможности дешифрирования очень слабы или вовсе отсутствуют.

Установлена также целесообразность использования геофизических исследований в комплексе с данными многозональной съемки. Это повышает возможности выявления артефактов и установления границ памятников, а также улучшает интерпретационный анализ. Как указывают А.Г. Злобина, И.В. Журбин и др. [2018], «...применение геофизики и почвенных исследований снижает неоднозначность интерпретации данных аэрофотосъемки». В целом авторы положительно характеризуют возможности выявления участков с культурным слоем, несмотря на разрушение распахкой. Предлагаемый алгоритм состоит в том, чтобы каждый последующий метод обеспечивал проверку ранее полученных данных и одновременно дополнял бы информацию об археологическом памятнике [Назмутдинова, Милич, Журбин, 2017].

Интересные результаты получены археологами из г. Овьедо (Испания) [Calleja, Pages, Diaz-Alvarez et al., 2018], применившими мультиспектральную, а по сути – комбинированную съемку при обнаружении следов культур – растительности с другой спектральной отражательной способностью, чем у фона, связанной с погребенными археологическими остатками. Данные, полученные с использованием БПЛА камерами Canon Powershot S110 RGB и Canon Powershot S110 NIR, были обработаны согласно примененной схеме:

1. Извлечение трехмерного облака точек.

Трехмерное положение ключевых точек рассчитывалось с помощью автоматической триангуляции. Далее строились два ортофотоплана – в RGB и NIR-диапазонах. Вычислялся вегетационный индекс NDVI, затем рассчитывалась нормализованная цифровая модель поверхности (nDSM).

2. Совместная регистрация БПЛА-съемки с геолокацией и совмещением лазерной съемки (LiDAR). Далее следовал расчет двоичного nDSM и фильтрация с использованием пороговых значений.

3. Расчет археологической бинарной карты, представляющей растровое изображение с пространственным разрешением 0,5 м.

В работе продемонстрированы возможности использования комбинированных данных (мультиспектральной космической съемки WorldView-2 с данными дистанционного зондирования БПЛА, оснащенным глобальной навигационной спутниковой системой (GNSS) для обнаружения археологических объектов. В обработке применены метод главных компонент и расчет индекса NDVI.

Коллегами из Италии и Франции в работе «Detection of Anomalies Produced by Buried Archaeological Structures Using Nonlinear Principal Component Analysis Applied to Airborne Hyperspectral Image» показаны возможности и недостатки применения оптических мультиспектральных датчиков космической съемки (CORONA, IKONOS, Landsat Thematic Mapper (TM), Satellite Pour L'Observation de la Terre (SPOT), QuickBird). Приводится обоснование целесообразности использования усовершенствованного космического радиометра излучения и отражения Aster в реконструкциях древнего ландшафта [Doneus, Verhoeven, Atzberger et al., 2014].

Гиперспектральные данные были обработаны с помощью нелинейного анализа основных компонентов (NLPCA) для проверки их эффективности как инструмента археологической разведки, оценки потенциала обнаружения аномалий, связанных с погребенными археологическими структурами. Полученные результаты демонстрируют, что использование метода NLPCA в сравнении с другими подходами подчеркивает способность бортовых гиперспектральных изображений идентифицировать скрытые структуры.

Среди общих закономерностей в приведенных примерах следует отметить отсутствие детального описания организации съемочных работ, из чего следует, что ав-

торы не посчитали важным делать акцент на подготовительных и летно-съёмочных работах мультиспектральной съёмки. Обратим внимание на зону покрытия датчиками (как в БПЛА-съёмке, так и в космической съёмке), которая должна быть существенно больше зоны исследования.

Схема получения данных аэроразведки в наших исследованиях включала последовательно выполняемые этапы:

- подготовительные работы;
- летно-съёмочные работы;
- комбинированную съёмку;
- обработку и анализ съёмочных данных.

Суть подготовительных работ заключается в рекогносцировке территории, предварительном анализе рельефа и ландшафта по доступным топографическим картам и космическим снимкам. Данный вид анализа предусматривает ознакомление с расположением археологических объектов на местности и сопоставление с имеющимися планами и схемами могильника, выполненными ранее. Важной частью является подготовка и тестирование оборудования, качество приема сигнала и т.д. Начальная стадия работы с БПЛА-комплексом предполагает проверку оборудования, настройку программы управления полетом и калибровку.

Летно-съёмочные работы производились с помощью БПЛА DJI Inspire-1, конструктивной особенностью которого является наличие дополнительной мини-платформы, расположенной в задней части корпуса, под батареей. Мультиспектральная камера Parrot Sequoia прикреплена непосредственно на подвижные резиновые соединения, обеспечивающие защиту от вибрации и резких отклонений (например, в результате порыва ветра). Головная часть с датчиком GPS и устройством записи расположена над камерой в верхней части корпуса летательного аппарата. Предложенная конструкция хорошо зарекомендовала себя во время тестовых испытаний, поэтому легла в основу монтажа оборудования и съёмки.

Собственно съёмочный процесс включал три вида съёмки:

- 1) мультиспектральная съёмка камерой Parrot Sequoia;
- 2) съёмка в режиме стерео;
- 3) объектная съёмка в режиме 3Д.

Используемая нами камера Parrot Sequoia имеет следующие технические характеристики сенсоров (global shutter): размер пикселя – 3.75 μm ; фокусное расстояние – 3.98 мм; разрешение – 1280×960. Обеспечивается съёмка в четырех спектральных диапазонах: 5,3–5,7 мкм (зеленый канал), 6,4–6,8 мкм (красный канал), 7,3–7,4 мкм (граница красного и ближнего инфракрасного каналов), 7,7–8,1 мкм (инфракрасный канал). Для высоты съёмки 50 м камера Parrot Sequoia имеет пространственное разрешение менее 5 см/пиксель, для высоты 100 м – менее 10. Характеристики камеры позволяют поддерживать способы съёмки: покадровый (минимальные значения, которые могут быть установлены, – 0,5 кадра/сек для мультиспектральных сенсоров и 1 кадр/сек для RGB-сенсора); периодическая съёмка по дистанции (возможные значения, которые можно задать, составляют от 5 м до 1 км), автоматическая съёмка (съёмка происходит в определенные перекрытия изображения). Фактически в процессе съёмки были использованы все режимы.

Точечная (объектная) съёмка представляла собой вариант съёмки, при котором обеспечивается максимальное покрытие снимками с разных точек под разными углами для построения 3Д-изображения. При использовании программы Pix4D данный вариант съёмки соответствует миссии – Circular mission. Полетное задание строится по круговой траектории, начиная с наиболее верхней точки и заканчивая наиболее низкими, что обеспечивает хорошую проработку деталей модели и элементов конструкции объекта.

Все съемочные материалы получены с помощью аппарата DJI Inspire-1. Реализация полетных заданий и контроль съемки производились в программе Pix4D Capture. Для получения продуктов фотограмметрической обработки (ортофотопланов и 3Д-моделей памятников) использовалась программа Agisoft PhotoScan. Для обработки мультиспектральных снимков применялись программы ENVI, ArcGIS и др.

Технология обработки снимков видимого диапазона подробно изложена в нашей предыдущей статье [Крупочкин, Папин, 2018], поэтому особое внимание уделим мультиспектральным снимкам и специфике их обработки. Принципиально новым является изучение возможностей дешифрирования археологических объектов с элементами конструкции на основе вычисления так называемых почвенно-вегетационных и водных индексов и построения тематических/индексных изображений. Суть метода заключается в распознавании искомых элементов не напрямую, т.е. не на основе прямых демаскирующих признаков, а на основе индикационных (косвенных) признаков. К таковым относятся почвы, грунты, растительный покров, увлажненность и др. Состояние этих элементов ландшафта отражается достаточно часто в виде отдельных образований (на классифицированных цифровых снимках – аномалий или аномальных зон), которые могут проявляться в зоне нахождения захоронений, в очагах с высокой концентрацией камней и т.д.

Наиболее интересные результаты из всего многообразия вычисленных индексов показали такие как индекс хлорофилла MCARI/OSAVI, нормализованный относительный индекс биомассы NDVI, нормализованный разностный Red Edge индекс NDRE (табл.).

Краткая характеристика тематических индексов, вычисленных для дешифрирования элементов археологического комплекса «Урочище Балчикова-3» (сост. по данным: <http://agro.geoanalitika.com>, <http://agro.snauka.ru/2013/11/1205> и др.)

Наименование индекса	Краткая характеристика	Формула расчета	Распознаваемые типы археологических объектов/структур
Индекс хлорофилла – MCARI/OSAVI	Характеризует фотосинтетическую активность растительности, учитывает содержание хлорофилла <i>a</i> и <i>b</i> в листьях растений. Преимущество данного индекса заключается в минимизации влияния подстилающей поверхности без растительности на значение индекса	$MCARI = 1.2 * (2.5 * (NIR - RED) - 1.3 * (NIR - GREEN)) / (\text{normalized to the maximum value of RED, GREEN, and NIR bands})$, где NIR – значения сигнала в ближней инфракрасной зоне спектра, Red – значения сигнала в красной зоне спектра, Green – значения сигнала в зеленой зоне спектра	Курганные могильники, оградки, херексуры и другие типы археологических объектов, выраженные как в рельефе, так и в морфотекстурных образованиях в плане. Детектирует наличие «аномалий», содержащих с большой вероятностью культурные слои
Нормализованный разностный индекс (Normalized Difference Red Edge Index) – NDRE	Характеризует фотосинтетическую активность растительности, учитывающая концентрацию азота в листьях растений, на основе отраженного сигнала в ближнем инфракрасном (0,75–1,0 мкм) и крайнем красном (0,69–0,73 мкм) каналах. Может использоваться для определения угнетенной и стареющей растительности. При оценке учитывает содержание азота в листьях растений на основе информации мультиспектральных датчиков (крайнего красного и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов)	$NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$, где NIR – значения сигнала в ближней инфракрасной зоне спектра, RedEdge – значения сигнала в крайней красной зоне	Детектирует антропогенные и природные образования, выраженные морфологически в почвогрунтах и растительном покрове

Наименование индекса	Краткая характеристика	Формула расчета	Распознаваемые типы археологических объектов/структур
Нормализованный относительный индекс биомассы (Normalized Difference Vegetation Index) – NDVI	Характеризует количество фотосинтетически активной биомассы на земной поверхности. Может применяться для обнаружения, оценки и картографирования интенсивности вегетации. В вычислении индекса используются значения спектральной яркости красного (0,55–0,75 мкм) и ближнего инфракрасного (0,75–1,0 мкм) каналов	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, где NIR – значения сигнала в ближней инфракрасной зоне спектра, RED – значения сигнала в красной области спектра	Курганные могильники, оградки, херексуры. Детектирует наличие «аномалий», содержащих с большой вероятностью культурные слои. В отдельных случаях позволяет установить размеры и границы археологических памятников
SIPI (Structure Insensitive Pigment Index) – индекс пигмента, нечувствительного к структуре	Характеризует здоровую растительность, количественно выражается в соотношении каротиноидов, антоцианов и хлорофилла. Чем больше красных и желтых (и меньше зеленых) пигментов в листьях растений, тем выше значение индекса. Это свидетельствует об усыхании растительности. Высокие значения индекса также являются показателем болезни растений, которая связана с потерей хлорофилла	Первоначальный вариант индекса вычислялся как: $SIPI = (NIR - \text{синий}) / (NIR - \text{красный})$. Модифицированный индекс вычисляется по формуле: $(NIR - GREEN) / (NIR - RED)$, где NIR – значения сигнала в ближней инфракрасной зоне спектра, RED – значения сигнала в красной области спектра, GREEN – значения сигнала в зеленой области спектра	Детектирует отдельные и группы археологических объектов при отсутствии многоярусной растительности. Результаты обнаружения – средние между MCARI и NDVI

Анализ будем проводить относительно схемы центрального («царского») кургана (рис. 2). На индексном изображении MCARI неплохо дешифрируются центральная

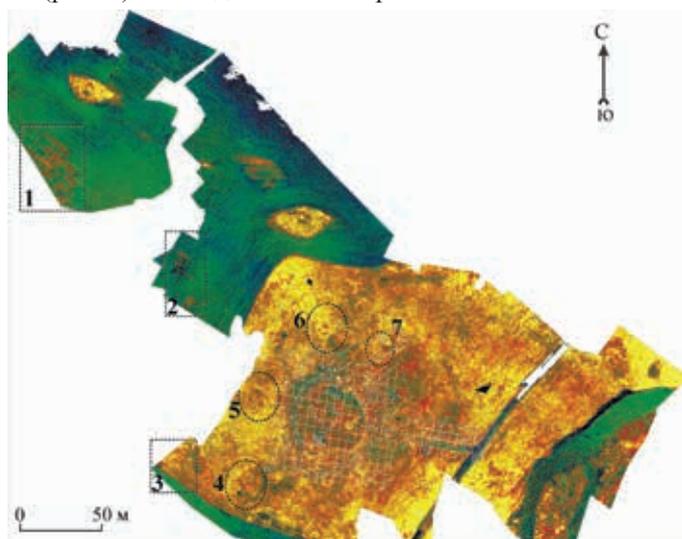


Рис. 3. Тематическое изображение, построенное на основе вычислений индекса MCARI. Светлые контуры показывают расположение плана тахеометрической съемки центрального кургана; нумерованные контуры характеризуют выявленные и предполагаемые археологические объекты

насыпь с внутренними элементами конструкции и примыкающими курганами. Достаточно четко распознается крепида кургана, особенно ее восточная полуокружность. Совмещение и привязка к единой системе координат плана центрального кургана и расположенных рядом объектов показывают высокую степень демаскирующих морфологических характеристик центрального кургана и его элементов, в том числе стел. Между тем обратим внимание на объекты, обозначенные в окнах поиска 1–7 (рис. 3).

В окне №1 обнаруживается морфотекстура, по всей видимости, природно-

го генезиса. Это вполне может быть содержание каменистого материала под пашней или наличие твердого материала в гумусовом слое. В окне №2 наблюдается аналогичная ситуация, вызванная предположительно близостью горных пород или наличием твердого грунта в гумусовом слое. Окно №3 с высокой степенью вероятности показывает наличие археологического объекта. Скорее всего, насыпь которого со временем выровняли в процессе распашки, но морфологическая структура самого кургана отлично распознается на индексных изображениях MCARI и NDVI, немного хуже – на изображении SIPI (рис. 4, 5). Окна 4 и 5 демонстрируют расположение небольших курганов, что подтверждает визуальный анализ ортофотоплана и плана тахеометрической съемки (рис. 2). В окне №7 располагается насыпь нерасчищенного кургана №13. В окне №6 дешифрируется еще одна курганная насыпь, которая также была отмечена на плане тахеометрической съемки объектов вокруг кургана №1 (рис. 2–4).

Для индексного изображения NDVI характерна большая степень сходства с покрытием, рассчитанным на основе MCARI (рис. 4). Достаточно четко обнаруживаются морфоструктурные элементы центрального кургана, а также небольших курганов, расположенных рядом с курганом №1 (окна №2–6, рис. 2, 4). Более четко в сравнении с предыдущим изображением дешифрируется объект (предположительно курган), расположенный на границе с распаханном полем (окно №2). Его спецификой является отсутствие выраженности в рельефе, однако на NDVI-снимке его контуры выражены более чем отчетливо. В береговой части мелкого русла ручья, расположенного в 300 м к северо-востоку относительного центрального кургана, найдена структура, которая может быть частью курганной насыпи или выкладки (окно №5). Однако это требует дополнительной проверки в полевых условиях. Между тем на индексном изображении SIPI мы также видим данную структуру (см. окно-врезка №5).

Анализ тематического SIPI-покрытия (рис. 5) характеризуется суммарным эффектом по отношению ко всем предыдущим вариантам тематических индексных покрытий (см. окна №1–5), однако недостатком данного метода является наличие шума, что может препятствовать распознаванию мелких структурных элементов. Это важно, например, при обнаружении геометрических оградок, элементов кургана, херексура и др.

Интересно, что свойства некоторых структурных элементов центрального кургана и примыкающих к нему объектов (включая балбалы, рекультивированные после раскопок насыпи и выкладки), выраженных в рельефе, практически не читаются на мультиспектральных снимках и специально обработанных изображениях. Однако при этом они отчетливо видны на 3Д-моделях. Например, положение и состояние цепи стел, простирающихся к востоку от центрального кургана, отчетливо читается на 3Д-модели археологического комплекса «царского» кургана. Однако на серии тематических изображений можно сказать только об их наличии или отсутствии. Совмещенный анализ цифровой модели рельефа и 3Д-модели позволяет увидеть мелкие детали и воспроизвести в наглядной и более доступной форме. К примеру, такими деталями могут быть выкладки или отдельные элементы конструкции кургана (рис. 6).

Заключение

Курган №1 некрополя Урочище Балчикова-3 является уникальным объектом для северных предгорий Алтая. Это единственный элитный курган пазырыкской культуры на указанной территории. Размеры конструкций кургана сопоставимы с «царскими» некрополями Пазырык, Шибе, Берель и Катанда. В отличие от большинства элитных курганов пазырыкской культуры, на памятнике Урочище Балчикова-3 можно проследить конструктивные элементы надмогильного сооружения – представленные обводной оградой и крепидой из плит по периметру насыпи. Эти особенности позволяют исполь-

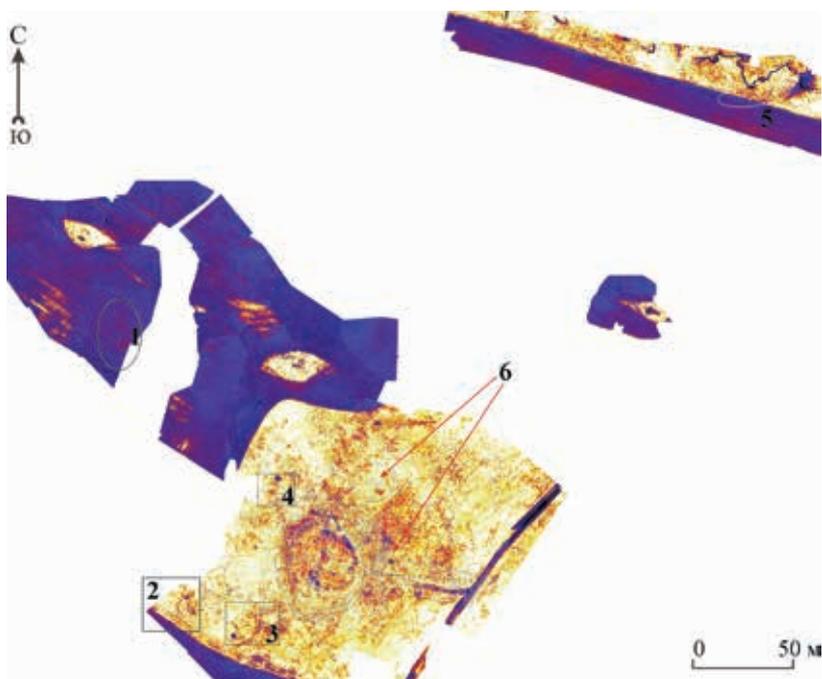


Рис. 4. Тематическое изображение, построенное на основе вычислений индекса NDVI. Светлые контуры показывают расположение плана тахеометрической съемки центрального кургана; нумерованные контуры характеризуют выявленные и предполагаемые археологические объекты

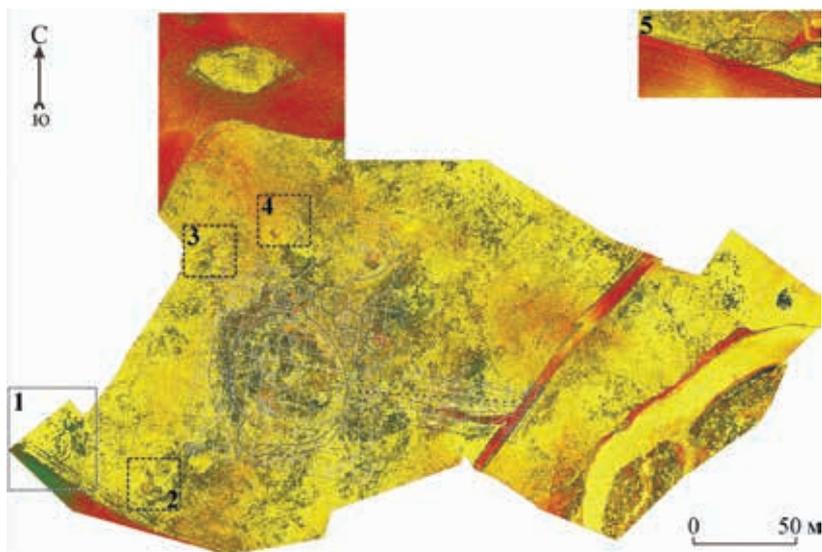


Рис. 5. Тематическое изображение, построенное на основе вычислений индекса SIPI. Светлые контуры показывают расположение плана тахеометрической съемки центрального кургана; нумерованные контуры характеризуют выявленные и предполагаемые археологические объекты

зовать памятник в качестве экспериментального полигона для отработки методов дистанционного зондирования.

Мультиспектральная съемка, основанная на использовании портативных камер для БПЛА, представляет собой важнейшую часть поисковых и разведочных работ. Полученные при этом материалы содержат весьма ценные и зачастую новые сведения о территории и объектах археологии. Вместе с тем такие данные не представляют самостоятельный вид источника, они не должны быть оторваны от ландшафта и природно-географических условий. Соответственно их изучение и интерпретация целесообразны только при сочетании классической съемки с мультиспектральной

либо при условии использования актуальных топографических планов в комплексе с тахеометрической съемкой.

Из многообразия тематических индексов, используемых сегодня в процессе обработки многозональной съемки, можно рекомендовать MCARI, NDVI, SIPI. Их общей чертой является возможность обнаружения скрытых морфологических характеристик, практически не обнаруживаемых на ортофотоplane. Распознавание таких характеристик становится возможным благодаря четкой регистрации состояния растительного покрова или почвогрунтов. Данный метод не является универсальным решением для любых видов археологических разведок, но неплохо подходит для поиска новых или фиксации предполагаемых археологических объектов в условиях открытой местности (т.е. в условиях отсутствия леса).

Несмотря на новые возможности предложенного метода, он не может полностью закрыть решение проблем поиска археологических объектов. Для получения максимального результата в целях распознавания морфологии археологических комплексов и определения предполагаемых границ памятников желательно использовать дополнительные сведения. К ним относятся материалы рекогносцировки, геофизических исследований, магнитометрии, электроразведки и др. Между тем бесспорным преимуществом апробированного метода являются гибкость, возможность использования в экспедиционных исследованиях независимо от сезона, возможность комбинирования различных видов съемок на одном БПЛА путем изменения полезной нагрузки и др.

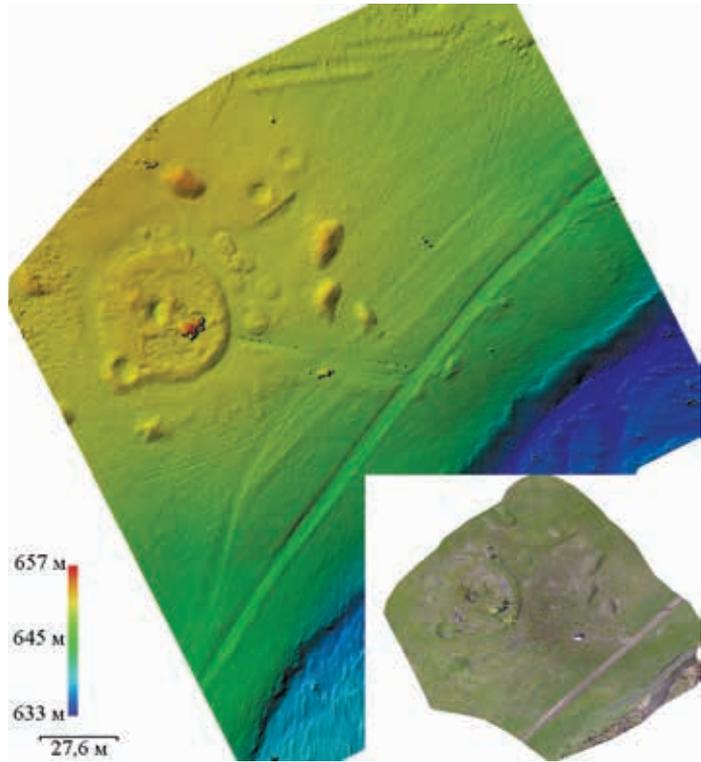


Рис. 6. Цифровая модель рельефа и 3Д-модель археологического комплекса «царский» курган Урочища Балчикова-3

Библиографический список

- Злобина А.Г., Журбин И.В., Немцова О.М. Метод селективной сегментации данных малоглубинного электропрофилеирования // *Автометрия*. 2018. №4. С. 26–34.
- Кирюшин Ю.Ф., Шульга П.И., Демин М.А., Тишкин А.А. Исследование и музеефикация «царского» кургана в долине Сентелека // *Сохранение и изучение культурного наследия Алтайского края*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2001. Вып. XII. С. 29–36.
- Крупочкин Е.П., Папин Д.В. О перспективах использования беспилотной съемки в археологических исследованиях // *Теория и практика археологических исследований*. 2018. №24(4). С. 71–84.
- Назмутдинова А.И., Милич В.Н., Журбин И.В. Метод и признаки выявления культурного слоя археологических памятников по данным многозональной съемки // *Геоинформатика*. 2017. №1. С. 52–58.
- Сервис анализа пространственных данных для сельского хозяйства. Компания СОВЗОНД. URL: <http://agro.geoanalitika.com/ru/products/rastitelnost/> (Дата обращения: 15.09.2019).
- Тишкин А.А., Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Колесов А.С., Шеремет А.С. Магнитометрическая съемка «царского» кургана и ближайшей территории на археологическом памятнике Урочище Балчикова-3 с помощью беспилотного летательного аппарата // *Теория и практика археологических исследований*. 2017. №4(20). С. 103–111.
- Шульга П.И. «Царский» курган в Сентелеке и его особенности как объекта познавательного туризма // I Международная научно-практическая конференция «Культура в евразийском пространстве: традиции и новации». Барнаул, 12–13 мая 2016 г. Барнаул: Алтайский государственный институт культуры, 2016. С. 105–110.
- Шульга П.И., Горбунов В.В. Фрагмент доспеха из тюркского кенотафа в долине р. Сентелек // *Материалы по военной археологии Алтая и сопредельных территорий*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. С. 112–130.
- Сельское, лесное и водное хозяйство : электронный научно-практический журнал. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/11/1205> (Дата обращения: 21.10.2019).
- Calleja J.V., Pages O.R., Diaz-Alvarez N., Peon J., Gutierrez N., Martin-Hernandez E., Relea A.C., Melendi D.R., Alvarez P.F. Detection of buried archaeological remains with the combined satellite multi-spectral images and UAV data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. N73. Pp. 555–573.
- Doneus M., Verhoeven G., Atzberger C., Wess M., Rus M. New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels // *Journal of Archaeological Science*. 2014. 52. Pp. 84–96.

References

- Zlobina A.G., Zhurbin I.V., Nemcova O.M. Metod selektivnoj segmentacii dannyh maloglubinnogo elektroprofilirovaniya [The Method of Selective Segmentation of Shallow Electrical Profiling Data]. *Autometriya* [Autometry]. 2018. №4. Pp. 26–34.
- Kiryushin Yu.F., Shul'ga P.I., Demin M.A., Tishkin A.A. Issledovanie i muzeifikaciya «carskogo» kurgana v doline Senteleka [Research and Museumification of the “Royal” Barrow in the Sentelek Valley]. *Sohranenie i izuchenie kul'turnogo naslediya Altajskogo kraja* [Preservation and Study of the Cultural Heritage of the Altai Region]. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2001. Issue XII. Pp. 29–36.
- Krupochkin E.P., Papin D.V. O perspektivah ispol'zovaniya bespilotnoj s'emki v arheologicheskikh issledovaniyah [On the Prospects of Using Unmanned Survey in Archaeological Research]. *Teoriya i praktika arheologicheskikh issledovaniy* [Theory and Practice of Archaeological Research]. 2018. №24(4). Pp. 71–84.
- Nazmutdinova A.I., Milich V.N., Zhurbin I.V. Metod i priznaki vyyavleniya kul'turnogo sloya arheologicheskikh pamyatnikov po dannym mnogozonal'noj s'emki [The Method and Signs of Revealing the Cultural Layer of Archaeological Sites according to Multizone Survey]. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. 2017. №1. Pp. 52–58.
- Servis analiza prostranstvennyh dannyh dlya sel'skogo hozyajstva. Kompaniya SOVZOND [Spatial Data Analysis Service for Agriculture. SOVZOND Company]. URL: <http://agro.geoanalitika.com/ru/products/rastitelnost/> (Data obrashcheniya: 15.09.2019).
- Tishkin A.A., Firsov A.P., Zlygostev I.N., Savluk A.V., Kolesov A.S., Sheremet A.S. Magnitometri-cheskaya s'emka «carskogo» kurgana i blizhajshej territorii na arheologicheskom pamyatnike Urochishche Balchikova-3 s pomoshch'yu bespilotnogo letatel'nogo apparata [Magnetometric Survey of the “Royal” Barrow and the Nearest Territory at the Archaeological Site Balchikova-3 Tract Using an Unmanned Aerial Vehicle]. *Teoriya i praktika arheologicheskikh issledovaniy* [Theory and Practice of Archaeological Research]. 2017. №4(20). Pp. 103–111.

Shul'ga P.I. «Carskij» kurgan v Senteleke i ego osobennosti kak ob'ekta poznavatel'nogo turizma [The "Royal" Barrow in Sentelek and its Features as an Object of Educational Tourism]. I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Kul'tura v evrazijskom prostranstve: tradicii i novacii». Barnaul, 12–13 maya 2016 g. [The 1st International Scientific and Practical Conference "Culture in the Eurasian Space: Traditions and Innovations". Barnaul, May 12–13, 2016]. Barnaul: Altajskij gosudarstvennyj institut kul'tury, 2016. Pp. 105–110.

Shul'ga P.I., Gorbunov V.V. Fragment dospekha iz tyurkskogo kenotafa v doline r. Sentelek [The Fragment of Armor from the Turkic Cenotaph in the Valley of the River Sentelek]. Materialy po voennoj arheologii Altaya i sopredel'nyh territorij [Materials on the Military Archeology of Altai and Adjacent Territories]. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 2002. Pp. 112–130.

Sel'skoe, lesnoe i vodnoe hozyajstvo : elektronnyj nauchno-prakticheskij zhurnal [Agriculture, Forestry and Water: an Electronic Scientific and Practical Journal]. URL: <http://agro.snauka.ru/2013/11/1205> (Data obrashcheniya: 21.10.2019).

Calleja J.V., Pages O.R., Diaz-Alvarez N., Peon J., Gutierrez N., Martin-Hernandez E., Relea A.C., Melendi D.R., Alvarez P.F. Detection of buried archaeological remains with the combined satellite multi-spectral images and UAV data // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2018. N73. Pp. 555–573.

Doneus M., Verhoeven G., Atzberger C., Wess M., Rus M. New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels // Journal of Archaeological Science. 2014. 52. Pp. 84–96.

E.P. Krupochkin^{1,2}, D.V. Papin^{1,2}, Ya.V. Frolov¹, A.A. Rednikov¹, P.I. Shulga²

¹Altai State University, Barnaul, Russia;

²Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Novosibirsk, Russia

THE RESULTS OF MULTI-SPECTRAL UAV-SHOOTING OF ARCHAEOLOGICAL OBJECTS FROM THE UROCHISHCHE BALCHIKOVA-3 BURIAL USING THE Parrot Sequoia CAMERA

With the expansion of technical and technological capabilities of scientific methods of archaeology, the methods of geoarchaeology used in combination with classical methods of exploration and field archaeological excavations prove to be very supportive.

The Urochishche Balchikov-3 Necropolis is a unique object for the northern foothills of Altai. This is the only elite barrow of the Pazyryk culture in this territory. The dimensions of the barrow structures are comparable with the "royal" necropolises of Pazyryk, Shibe, Berel and Katanda. Unlike most of the elite barrows of the Pazyryk culture, the Urochishche Balchikov-3 site contains the structural elements of the gravestone structure, represented by a bypass fence and crepe from slabs around the perimeter of the burial. These features make it possible to use the site as an experimental ground. The technique presented in this article develops the topic of the use of UAVs in archaeology not to obtain the images of an object or excavation, but to explore the possibilities of shooting with a variable work load. According to the authors, search and experimental work involving the use of a multispectral camera and determining its capabilities in joint (with a conventional camera) shooting is relevant and promising. All shooting materials were obtained using the DJI Inspire-1. Realization of flight tasks and control of shooting were carried out in the Pix4D Capture program. The Agisoft PhotoScan program was used to obtain photogrammetric processing products (orthophotomaps and 3D models of the site). For processing multispectral images, the ENVI and ArcGIS programs were used. Multispectral shooting, based on the use of portable cameras for UAVs, is an important part of prospecting and exploration. The materials obtained contain very valuable and often new information about the territory and archaeological sites containing artifacts. However, such data do not represent an independent source; they should not be considered apart from the landscape, natural and geographical conditions.

Key words: archaeological mapping, methods of geoinformatics and cartography in archaeology, unmanned systems and aerial photography.