Высокоточная магнитная съемка с использованием БПЛА при поиске и исследовании курганов археологического памятника Новая Курья в Западной Сибири

**Е. В. Балков¹, П. Г. Дядьков^{1,4}, О. А. Позднякова², Д. А. Кулешов¹
Н. Д. Евменов¹, Ю. Г. Карин¹, Д. А. Гоглев³**

¹ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *ООО «Геоскан»
Санкт-Петербург, Россия*

⁴ *Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Представлены результаты высокоточной магнитной съемки квантовым магнитометром с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Объектом исследований являлась площадь 10 га (500 × 200 м) на археологическом памятнике Новая Курья в Западной Сибири. Точность регистрации модуля индукции геомагнитного поля была не ниже 0,3 нТл. Пространственная точность координат GPS лежит в субметровом диапазоне. Выявлены магнитные аномалии, вызванные древними курганами, с амплитудой до 5–10 нТл. Методика выделения таких низкоамплитудных аномалий включала учет геомагнитных вариаций внешнего поля, регионального аномального поля и использование ряда алгоритмов статистической обработки первичных данных. Выявленные магнитные аномалии позволяют достоверно определить особенности устройства и размеры курганов, в том числе не выраженных в рельефе. Полученная информация дает возможность на качественно ином уровне планировать стратегию археологического изучения данного памятника. Отмечается перспективность дальнейшей разработки и использования рассматриваемой технологии для решения археологических задач.

Ключевые слова

археологический памятник, курганы, магнитометрия, беспилотные летательные аппараты (БПЛА)

Благодарности

Работа (2017–2018) выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-29-04314). Коллектив авторов благодарит сотрудников Института археологии и этнографии СО РАН канд. ист. наук Ж. В. Марченко и канд. ист. наук А. Е. Гришина за помощь в организации и проведении геофизических исследований.

Для цитирования

Балков Е. В., Дядьков П. Г., Позднякова О. А., Кулешов Д. А., Евменов Н. Д., Карин Ю. Г., Гоглев Д. А. Высокоточная магнитная съемка с использованием БПЛА при поиске и исследовании курганов археологического памятника Новая Курья в Западной Сибири // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2019. Т. 17, № 4. С. 5–12. DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-4-5-12

High-Precision Magnetic Survey with UAV for the Archaeological Barrows at Novaya Kurya Monument in Western Siberia

E. V. Balkov¹, P. G. Dyadkov^{1,4}, O. A. Pozdnyakova², D. A. Kuleshov¹
N. D. Evmenov¹, Yu. G. Karin¹, D. A. Goglev³

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Archeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

³ LLC "Geoscan"
St. Petersburg, Russian Federation

⁴ Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

Annotation

The paper presents the results of high-precision magnetic surveys by a quantum magnetometer using an unmanned aerial vehicle (UAV). The object of research was an area of 10 hectares (500×200 m) at the archaeological site of New Kurya in Western Siberia. The accuracy of the registration of the induction module of the geomagnetic field was not lower than 0.3 nT. The spatial accuracy of GPS coordinates lies in the submeter range. Magnetic anomalies caused by ancient mounds with an amplitude of up to 5–10 nT were revealed. The technique for isolating such low-amplitude anomalies included taking into account the geomagnetic variations of the external field, the regional anomalous field, and the use of a number of algorithms for the statistical processing of primary data. Identified magnetic anomalies can reliably determine the features of the device and the size of the mounds, including those not expressed in relief. The information received makes it possible to plan a strategy for archaeological study of this monument at a qualitatively different level. The prospects of further development and use of the technology in question for solving archaeological problems are noted.

Keywords

archaeological site, mounds, magnetometry, unmanned aerial vehicles (UAV)

Acknowledgments

The work (2017–2018) was carried out with the financial support of the Russian Federal Property Fund (Grant No. 17-29-04314).

The team of authors thanks the staff of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS PhD Zh. V. Marchenko and PhD A. E. Grishin for help in organizing and conducting geophysical research.

For citation

Balkov E. V., Dyadkov P. G., Pozdnyakova O. A., Kuleshov D. A., Evmenov N. D., Karin Yu. G., Goglev D. A. High-Precision Magnetic Survey with UAV for the Archaeological Barrows at Novaya Kurya Monument in Western Siberia. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2019, vol. 17, no. 4, p. 5–12. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-4-5-12

Введение

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука и Институт археологии и этнографии Сибирского отделения Российской академии наук сотрудничают уже более 20 лет. За это время выполнен большой объём работ по проведению геофизических исследований (магниторазведка и электроразведка) для поиска и изучения погребённых археологических объектов [1]. В основном для этих целей использовалась наземная магнитная съёмка, с помощью которой очень хорошо выделялись магнитные аномалии величиной несколько нанотесла (нТл), соответствующие археологическим объектам различного типа (погребения, ритуальные и хозяйственные ямы, жилища и т. п.). Также удавалось достоверно фиксировать более масштабные сооружения – курганы, визуальные признаки которых были полностью утрачены [2]. Анализ карт магнитных аномалий позволял установить особенности их устройства еще до начала археологических раскопок. Однако не всегда условия для проведения наземных работ благоприятны (высокая растительность, заболоченность и т. д.), поэтому существует необходимость разработки и применения новых альтернативных технологий

магнитной съемки. При этом нужно учитывать, что для поиска археологических объектов необходима более высокая точность измерений, а также достаточная близость съёмки к поверхности земли (обычно первые метры). Активно развивающееся направление съемок с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открывает для магниторазведки, в том числе и археологической, широкие перспективы. Известно, что в настоящее время для таких задач выпущена специальная аппаратура фирмами «Geometrics» (США) и «Геоскан» (Россия). Хотя объем аэромагнитных съемок с использованием БПЛА в настоящее время существенно возрос, примеров таких работ на археологических памятниках пока немного [3–5]. В рамках данного исследования была выполнена магнитная съёмка с помощью БПЛА на курганном могильнике Новая Курья. Памятник расположен на гриве, в северной части Кулундинской степи (Карасукский район Новосибирской области, РФ). Представлен 8 округлыми насыпями, диаметром 20–35 м и высотой 0,2–0,7 м. Некрополь, вероятнее всего, относится к эпохе кочевников (середина I тыс. до н. э. – конец I тыс. н. э.). Поверхность археологического памятника подвергалась неоднократной распашке, что существенно повлияло на параметры курганов и могло уничтожить внешние признаки некоторых из них. На этапе подготовки к археологическим исследованиям необходимо было получить информацию о границах памятника и особенностях устройства курганов, что позволило бы более обоснованно планировать стратегию археологического изучения. Целью проведенных работ была оценка перспектив использования низковысотной аэромагнитной съемки для поиска и определения структурных особенностей курганов.

Методика магнитной съемки и аппаратура

Аэромагнитная съемка выполнялась в 2019 г. на курганном могильнике Новая Курья специально разработанным комплексом «Геоскан 401 Геофизика» [5], в котором в качестве носителя использован «Геоскан 401» – квадрокоптер промышленного класса, способный выполнять полёты по заданному маршруту. В качестве магнитометра использовался компактный и высокоточный квантовый магнитометр, сконструированный специалистами ГК Геоскан. Общая площадь съемки составила около 10 Га (500×200 м). Таким образом, суммарная длина профилей составила около 100 км. Расстояние между профилями – около 1 м. Частота измерений магнитометра – 10 Гц, что при средней скорости полёта 5 м/с соответствует расстоянию между соседними замерами около 0,5 м. Девиационная погрешность измерений модуля вектора индукции геомагнитного поля датчиком Geoscan не превышает 0,3 нТл. Для учёта влияния солнечно-суточных геомагнитных вариаций использовалась протонная магнитовариационная станция МВ-07М, точность регистрации модуля вектора магнитной индукции которой не хуже, чем 0,1 нТ. Точность датчика GPS соответствовала области субметрового диапазона. Фото с места проведения работ, используемый БПЛА и квантовый магнитометр представлены на рис. 1.

Рис. 1. БПЛА «Геоскан 401» (слева) и квантовый магнитометр (справа) при проведении магнитной съёмки на археологическом могильнике Новая Курья, 2019 г.

Fig. 1. UAV “Geoscan 401” (left) and a quantum magnetometer (right) when conducting magnetic surveys at the archaeological site Novaya Kurya, 2019

Полученные результаты

Из всех серий пролетов в качестве ближайших по высоте к объектам и наиболее полно охватывающих исследуемую территорию были выбраны пролеты на высотах в интервале от 2 до 5 м (рис. 2).

Рис. 2. Google-карта с точками замеров в высотном окне 2–5 м (слева) и ее фрагмент с обозначениями рельефно выраженных курганов (справа)
 Fig. 2. Google map with measuring points in a high-altitude window of 2–5 m (left) and its fragment with the designations of relief mounds (right)

Для обработки полученной первичной информации был предложен и реализован следующий порядок действий.

Во-первых, был произведен учет внешних геомагнитных вариаций путем вычитания из каждого измеренного значения магнитного поля на профиле значений поля на вариационной станции.

Во-вторых, методом кригинга выполнена интерполяция полученных значений по сетке 1×1 м, всего для $\sim 100\,000$ узлов.

Далее, с целью учета и исключения регионального магнитного поля $F_{\text{рег}}$, выбрано 300 точек, расположенных вне зон влияния локальных магнитных аномалий, обусловленных как археологическими объектами, так и возможными современными железными предметами. Для построения карты регионального поля с аналогичной сеткой 1×1 м был вновь использован метод кригинга (рис. 3), после чего значения регионального поля $F_{\text{рег}}$ были вычтены из соответствующих значений поля $F_{\text{а}}$.

Для уменьшения локальных вариаций итоговых значений поля, обусловленных неравномерностью галсов полета квадрокоптера, было проведено сглаживание массива данных плавающим окном 3×3 точки. Окончательные результаты приведены на рис. 4.

Рис. 3. Первичное поле F_a (слева) и региональное магнитное поле $F_{\text{рег}}$ (справа)
 Fig. 3. Primary F_a (raw data, on the left) and regional magnetic field $F_{\text{рег}}$ (on the right)

Рис. 4. Карта аномального магнитного поля F_a (после исключения региональной аномалии) на археологическом памятнике Новая Курья (слева) и фрагмент участка (справа), где расположены курганы, нумерация которых показана на рис. 2
 Fig. 4. Map of the anomalous magnetic field F_a (after excluding the regional anomaly) at the archaeological site Novaya Kurya (left) and a fragment of the site (right) where the mounds are located, the numbering of which is shown in fig. 2

На момент проведения магнитной съемки проводились археологические исследования кургана 5. Этот раскоп хорошо фиксируется на полученных картах. Реализация предложенного и описанного выше методического подхода к обработке данных позволила многократно повысить детальность отображения отдельных элементов структуры курганов в аномальном магнитном поле. Это также позволило выявить археологические объекты между курганами 3 и 4 (см. рис. 4), которые визуальным образом не фиксируются и, по-видимому, представляют собой полностью распаханые курганы. На итоговом рис. 4 в аномальном поле хорошо видны рвы, признаки которых на поверхности отсутствуют. Это позволяет точно определять границы курганов. В центре хорошо выделяются положительные аномалии, связанные с нарушениями насыпей в процессе их ограбления. В центральной части некоторых курганов (например, 2 и 3) выделены круговые положительные аномалии диаметром до 12–14 м, предположительно связанные с особенностями структуры насыпи либо с устройством подкурганной площадки.

Анализ полученной в результате исследования карты аномального магнитного поля позволяет определить границы памятника и уверенно судить об отсутствии археологических объектов подобного рода на остальном участке съемки. Это имеет большое значение для планирования археологических работ и для постановки памятника на государственный учет.

Заключение

Использование БПЛА в магниторазведке в археологии позволяет добиться значительной производительности съемки по сравнению с наземной. При этом техническая точность приборов, устанавливаемых на БПЛА, не хуже аналогичной при наземной съемке. Но для достижения такой же детализации необходимо использовать дифференциальные GPS приемники (RTK), тогда пространственная точность измерений приблизится к субдециметровой, что повысит детализацию наблюдаемых аномалий.

Использованная методика проведения магнитной съемки с применением БПЛА на курганном могильнике Новая Курья позволила выявить магнитные аномалии величиной до 5–10 нТл, обусловленные археологическими объектами – курганами. Полученное разрешение и детальность карты аномального поля позволяют оценить особенности устройства курганов, в том числе не выраженных в рельефе.

Данная методика является универсальной и применима также для поиска нефти, газа и других полезных ископаемых, если наблюдаемая магнитная контрастность объектов и вмещающих пород такова, что аномальное магнитное поле от них составляет не менее первых единиц нТл на минимально заданной высоте съемки, определяемой рельефом и особенностями местности.

Список литературы

1. **Епов М. И., Молodin В. И., Manshtein A. K., Balkov E. V., Dyadkov P. G., Matasova G. G., Kazansky A. Yu., Bortnikova S. B., Pozdnyakova O. A., Karin Yu. G., Kuleshov D. A.** Integrated Archaeological and Geophysical studies in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, I.3, p. 473–482.
2. **Дядьков П. Г., Позднякова О. А.** Итоги и перспективы применения метода магнитометрии для изучения археологических памятников Западной Сибири // Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы: Материалы международного симпозиума «Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы» (Новосибирск, 22–26 июня 2015 г.). Новосибирск, 2017. С. 60–68.
3. **Эпов М. И., Молодин В. И., Позднякова О. А., Злыгостев И. Н., Фирсов А. П., Савлук А. В., Колесов А. С., Дядьков П. Г.** Опыт магнитометрического картирования археологических памятников с использованием беспилотных летательных аппаратов // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2016. Т. 22. С. 478–282.

4. 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.
5. Гоглев Д. А. Маловысотная аэромагнитная съёмка с применением беспилотных воздушных систем на базе квадрокоптера в археологии // Геопрофи. 2018. Т. 6. С. 20–22.

References

1. Epov M. I., Molodin V. I., Manshtein A. K., Balkov E. V., Dyadkov P. G., Matasova G. G., Kazansky A. Yu., Bortnikova S. B., Pozdnyakova O. A., Karin Yu. G., Kuleshov D. A. Integrated Archaeological and Geophysical studies in West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, I.3, p. 473–482.
2. Dyadkov P. G., Pozdnyakova O. A. Results and prospects of using the magnetometry method to study archaeological sites in Western Siberia. In: Multidisciplinary methods in archeology: latest results and prospects: Materials of the international symposium “Multidisciplinary methods in archeology: latest results and prospects” (Novosibirsk, June 22–26, 2015). Novosibirsk, 2017, p. 60–68. (in Russ.)
3. Epov M. I., Molodin V. I., Pozdnyakova O. A., Zlygostev I. N., Firsov A. P., Savluk A. V., Kolesov A. S., Dyadkov P. G. The experience of magnetometric mapping of archaeological sites using unmanned aerial vehicles. In: Problems of archeology, ethnography, anthropology of Siberia and adjacent territories. Novosibirsk, IAET SB RAS Publ., 2016, vol. 22, p. 478–282. (in Russ.)
4. Tishkin A. A., Firsov A. P., Zlygostev I. N., Savluk A. V., Kolesov A. S., Sheremet A. S. Magnetometric survey of the (royal) mound and the nearest territory at the archaeological site Balchikova-3 Tract using an unmanned aerial vehicle. *Theory and Practice of Archaeological Research*, 2017, no. 4 (20), p. 103–111. (in Russ.)
5. Goglev D. A. Low-altitude aeromagnetic survey using unmanned aerial systems based on a quadcopter in archeology. *Geoprofi*, 2018, vol. 6, p. 20–22. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию

Received

14.11.2019

Сведения об авторах

Балков Евгений Вячеславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
BalkovEV@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0002-3712-6585

Дядьков Петр Георгиевич, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, доцент кафедры геофизики НГУ (Новосибирск, Россия)
DyadkovPG@ipgg.sbras.ru
ScopusID 6507115361

Позднякова Ольга Анатольевна, научный сотрудник Института археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск, Россия)
olka.pozdnyakova@gmail.com
ORCID 0000-0001-8376-0344

Кулешов Дмитрий Александрович, научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
KuleshovDA@ipgg.sbras.ru

Евменов Николай Денисович, лаборант лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
evmenovnd@ipgg.sbras.ru

Карин Юрий Григорьевич, научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия)
KarinYG@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0003-1469-5336

Гоглев Дмитрий Александрович, руководитель проекта по аэромагнитной съемке с БПЛА в ООО «Геоскан» (Санкт Петербург, Россия)
d.goglev@geoscan.aero

Information about the Authors

Evgeny V. Balkov, PhD, Senior Researcher, Laboratory of Electromagnetic Fields, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russia)
BalkovEV@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0002-3712-6585

Petr G. Dyadkov, PhD, Head of the Laboratory of Natural Geophysical Fields of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS, Associate Professor, Department of Geophysics, NSU (Novosibirsk, Russia)
DyadkovPG@ipgg.sbras.ru
ScopusID 6507115361

Olga A. Pozdnyakova, Researcher, Institute of Archeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)
olka.pozdnyakova@gmail.com
ORCID 0000-0001-8376-0344

Dmitry A. Kuleshov, Researcher, Laboratory of Natural Geophysical Fields, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russia)
KuleshovDA@ipgg.sbras.ru

Nikolay D. Evmenov, laboratory assistant at the laboratory of natural geophysical fields of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russia)
evmenovnd@ipgg.sbras.ru

Yuri G. Karin, Researcher, Laboratory of Electromagnetic Fields, Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk SB RAS (Novosibirsk, Russia)
KarinYG@ipgg.sbras.ru
ORCID 0000-0003-1469-5336

Dmitry A. Goglev, project manager for aeromagnetic imaging from UAVs at “Geoscan” LLC (St. Petersburg, Russia)
d.goglev@geoscan.aero