

УДК 621.317.444

EDN AGEMCY

## ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВЫХ МАГНИТОМЕТРОВ В МАГНИТОРАЗВЕДКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

**Д.Б. Петленко**

ORCID: 0009-0004-1299-4791 e-mail: dpetlenko@yandex.ru

МИРЭА – Российский технологический университет

*Москва, Россия***Е.А. Авдонин**

ORCID: 0009-0003-0309-8138 e-mail: avdonin.e.a@edu.mirea.ru

МИРЭА – Российский технологический университет

*Москва, Россия*

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в настоящее время нашли широкое применение в различных областях человеческой деятельности, в том числе, в области магниторазведки в интересах геологии и археологии. Применение БПЛА для магниторазведки позволяет проводить сканирование и измерение магнитных характеристик земной поверхности в труднодоступных или опасных районах. Часто для этих исследований используются квантовые рубидиевые магнитометры. Описан вариант реализации подобного прибора. Для оценки геологических запасов полезных ископаемых и определения мест их наиболее вероятного расположения, а также расположения исторических памятников необходимо построение магнитной карты местности.

Магниторазведка с применением технологий БПЛА как геофизический метод исследования отличается наиболее высокой производительностью в сравнении с другими методами измерений. Современные измерительные приборы могут быть успешно установлены на промышленные беспилотные аппараты мультироторного типа из-за своих небольших размеров и малого веса (до 1-2 кг). Рассмотрены преимущества использования квантового магнитометра для решения прикладных задач.

**Ключевые слова:** БПЛА, квантовый рубидиевый магнитометр, магнитная карта местности, магниторазведка, методика получения данных магниторазведки.

**Для цитирования:** Петленко Д.Б., Авдонин Е.А. Применение квантовых магнитометров в магниторазведке с использованием беспилотных систем // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 71-85. EDN AGEMCY

## APPLICATION OF QUANTUM MAGNETOMETERS IN MAGNETIC EXPLORATION USING UNMANNED SYSTEMS

**D.B. Petlenko**

ORCID: 0009-0004-1299-4791 e-mail: dpetlenko@yandex.ru  
MIREA – Russian Technological University  
*Moscow, Russia*

**E.A. Avdonin**

ORCID: 0009-0003-0309-8138 e-mail: avdonin.e.a@edu.mirea.ru  
MIREA – Russian Technological University  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** Unmanned aerial vehicles (UAVs) are now widely used in various fields of human activity, including magnetic reconnaissance for geology and archaeology. The use of UAVs for magnetic reconnaissance allows scanning and measuring the magnetic characteristics of the earth's surface in areas that are difficult or dangerous to access. Quantum rubidium magnetometers are often used for these studies. The paper describes a variant of realization of such a device. In order to estimate geologic mineral reserves and determine where they are most likely to be found, as well as the location of historical monuments, it is necessary to construct a magnetic map of the area.

Magnetic survey using UAVs as a method of geophysical research is characterized by the highest productivity compared to other measurement methods. Modern measuring devices can be successfully installed on industrial drones of multicopter type due to their small size and low weight (up to 1-2 kg). The article discusses the advantages of using a quantum magnetometer for solving applied problems.

**Keywords:** magnetic exploration, magnetic terrain map, methods of obtaining magnetic exploration data, quantum rubidium magnetometer, UAV.

**For citation:** D.B. Petlenko and E.A. Avdonin, "Application of quantum magnetometers in magnetic exploration using unmanned systems", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 71-85, 2024. EDN AGEMCY

### I. Введение

Активный рост темпов развития технологий проектирования, сборки и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за последние годы привел к значительному развитию многих направлений человеческой деятельности. В частности, беспилотные летательные аппараты нашли широкое применение в области магниторазведки и геологии.

БПЛА представляют собой автономные электротехнические комплексы, для которых применение каких-либо электроприборов требует решения задач обеспечения их надежного электропитания, снижения потребления электроэнергии, а также вопросов электромагнитной совместимости.

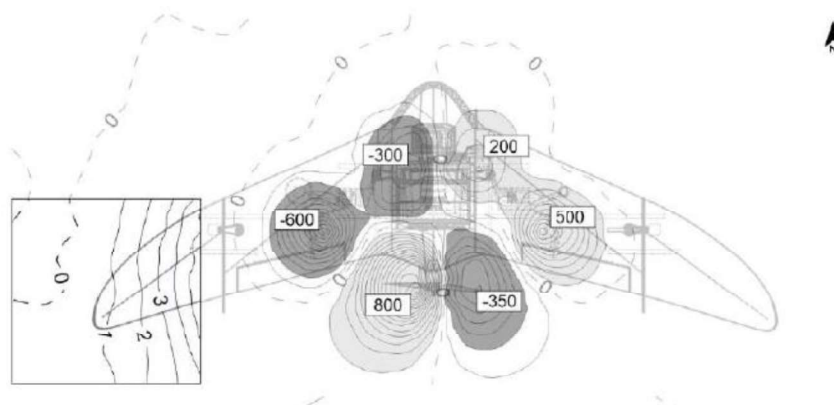
Магниторазведка с использованием беспилотных летательных аппаратов имеет высокую актуальность в области геологии, горнодобывающей промышленности и оборонных технологий [1, 2]. Это связано с возможностью быстрого, точного и масштабного сбора геофизических данных о магнитных полях на больших территориях [3, 4]. Применение БПЛА для магниторазведки позволяет проводить сканирование и измерение магнитных характеристик земной поверхности в труднодоступных или опасных районах, где традиционные методы проведения разведочных работ могут сталкиваться с ограничениями или определенными рисками для человека. Эти данные могут быть использованы для поиска полезных ископаемых или различных техногенных объектов, для определения структуры подземных образований, а также для обеспечения безопасности и контроля над магнитными аномалиями в определенных районах [5]. С появлением компактных квантовых магнитометров открылись широкие перспективы в беспилотной магниторазведке [6]. Разработка квантовых магнитометров позволяет в значительной степени оптимизировать процесс воздушной магниторазведки и повысить ее эффективность. Цель данной работы – изучение и систематизация актуальных прикладных методов получения данных магниторазведки с использованием квантового магнитометра, обсуждение технических аспектов и перспектив рассматриваемых методов аэромагнитной съемки.

Для магниторазведки использование БПЛА актуально, как ни для одного другого геофизического метода [7, 8]. Современные магнитометры – относительно легкие и малопотребляющие электроэнергию геофизические приборы, которые обеспечивают высокую точность измерения компонент вектора магнитного поля [9]. Это позволяет успешно использовать их на компактных летательных аппаратах. Таким образом, с развитием современных технологий беспилотных систем появилась совершенно новая методика получения данных магниторазведки: маловысотная аэросъемка с БПЛА. Проведение работ по магнитной съемке с помощью БПЛА позволяет значительно ускорить и автоматизировать процесс получения данных и сводит к минимуму человеческий фактор и шанс ошибок измерений, по сравнению, например, с традиционной наземной магниторазведкой [10].

## **II. Влияние магнитного поля БПЛА на проведение измерений**

Магнитометр не может быть установлен непосредственно на сам БПЛА, так как магнитное поле силовой установки, систем управления и навигации самого летательного аппарата будет очень сильно влиять на измерения. В частности, данная проблема была подробно рассмотрена при

проектировании промышленных БПЛА компанией «ГЕОСКАН» [8]. Результаты измерений собственных магнитных полей БПЛА «Геоскан-201» показали наличие сильного магнитного поля (рис. 1). Магнитное поле, создаваемое электродвигателем, системой управления и бортовой электроникой могло достигать нескольких сотен нТл, в то время как характерные ошибки измерений в геофизике лежат в пределах 1-2 нТл.



**Рис. 1. Значения магнитных полей (в нТл), создаваемых бортовой электроникой самолета «Геоскан-201»**

**Fig. 1. Values of magnetic fields (in nTl) generated by the onboard electronics of the Geoscan-201 aircraft**

С появлением беспилотных аппаратов мультироторного типа (квадрокоптеров и гексакоптеров) открылись новые методики проведения измерений магнитного поля. Мультироторные БПЛА обладают возможностью вертикального взлета и посадки, что обеспечивает гибкость в выборе места старта и приземления. Кроме того, промышленные квадрокоптеры могут нести достаточную полезную нагрузку и способны точно огибать рельеф местности, постоянно поддерживая заданную высоту маршрута. Мультироторные БПЛА позволяют повысить точность магниторазведочных работ по сравнению с БПЛА самолетного типа.

Магнитометр подвешивается на тросе к квадрокоптеру на расстоянии нескольких десятков метров [11]. Затем летательный аппарат совершает полет вдоль заданных траекторий над исследуемой местностью. Таким образом, промышленные квадрокоптеры успешно используются в геофизике при построении карт магнитных полей местности и геологоразведке. В беспилотной магниторазведке в настоящее время довольно часто используются квантовые рубидиевые магнитометры.

### III. Принцип работы квантового рубидиевого магнитометра

В квантовых магнитометрах, предназначенных для измерения абсолютных значений модуля индукции магнитного поля, используют эффект Зеемана. В электронной структуре атомов, обладающих магнитным моментом, при попадании в магнитное поле происходит расщепление энергетических уровней на подуровни, с разницей энергии и, соответственно, частотой излучения, пропорциональной модулю полного вектора магнитной индукции в точке наблюдения.

Квантовый рубидиевый магнитометр работает на основе явления квантового поглощения света атомами рубидия, а также других щелочных металлов (цезий *Cs*, натрий *Na*, калий *K*) и инертных газов. Если пары рубидия облучать поляризованным монохроматическим светом, длина волны которого соответствует одной из спектральных линий используемого элемента, то атомы уходят на верхние уровни и через короткое время (быстрее 1 мкс) скапливаются на одном энергетическом подуровне, переходы с которого запрещены. Их магнитные оси будут сориентированы одинаково. В результате появится прецессия электронов относительно геомагнитного поля на частоте Лармора:

$$\omega = \gamma \cdot H,$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение;  $\omega$  – частота Лармора;  $H$  – напряженность магнитного поля.

Используя разные варианты схмотехнической реализации, можно добиться, чтобы колебалась и интенсивность света. Если сигнал с фотоэлемента усилить и подать на катушку, намотанную на колбе с рабочим веществом (пары цезия или рубидия), то можно получить автоподстраиваемый резонансный осциллятор. Измерив его частоту, можно рассчитать величину поля. Таким образом, интенсивность магнитного поля представляется через частоту. При этом изначально непрозрачный пар рабочего вещества – щелочного металла (нерадиоактивный цезий, калий или рубидий), находящийся в герметичной ячейке – электронно-оптическом чувствительном модуле (ЧМ), подвергается облучению (накачке) поляризованным монохроматическим светом, длина волны которого соответствует спектральной линии вещества. Свет поглощается, и атомы, возбуждаясь, переходят со второго на третий энергетический уровень – пар становится прозрачным. Через короткое время (~1 мкс) атомы спонтанно переходят на уровень 1 (полностью его заполняя) и 2 (незаполненный). ВЧ-магнитное деполаризирующее поле с частотой  $f$  (обеспечивается соленоидом), соответствующей разнице энергий этих уровней, перемещает электроны с первого уровня ко второму, при этом

пар опять становится менее прозрачным. Происходящая прецессия электронов на частоте Лармора пропорциональна величине окружающего магнитного поля. С этой же частотой изменяется интенсивность света, регистрируемая фотодетектором. Сигнал с фотоэлемента усиливается и подается на соленоид, реализующий автоподстраиваемый ВЧ-осциллятор, резонансная частота которого пропорциональна модулю индукции магнитного поля. Измерительная часть квантового магнитометра по сути представляет собой фотоприемник и высокоточный частотомер, работающий в режиме периодического счета, – чем больше период, тем выше разрешение [12]. Схема конструкции квантового рубидиевого магнитометра показана на рис. 2. Возможный вариант реализации изложен в [13].

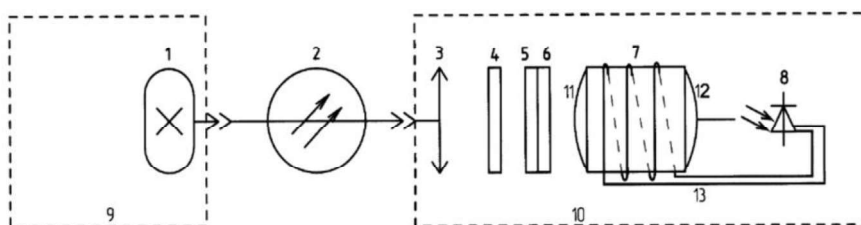


Рис. 2. Вариант конструкции квантового рубидиевого магнитометра

Fig. 2. Design variant of a quantum rubidium magnetometer

Квантовый рубидиевый  $Mz$  аэромагнитометр может включать в себя: 1 – лампу накачки с системой питания и стабилизации температуры, 2 – световод, 3 – собирающую линзу, 4 – интерференционный фильтр, 5 – поляризатор, 6 – четверть-волновую пластинку, 7 – камеру поглощения с системой стабилизации температуры, 8 – фотодиод, 9 – блок электроники, 10 – датчик магниточувствительный, 11 – входную линзу камеры поглощения, 12 – выходную линзу камеры поглощения, 13 – радиочастотную катушку.

Работает устройство следующим образом: свет от лампы накачки, расположенной в блоке электроники, транслируется по световоду в магниточувствительный датчик. Лампа накачки содержит изотоп  $Rb^{87}$ . Свет из световода попадает на линзу в магниточувствительном датчике, которая вместе с входной линзой камеры поглощения формирует пучок света, близкий к параллельному, проходящий через камеру поглощения. Камера поглощения содержит буферный газ  $He$  и изотоп  $Rb^{87}$ . Буферный газ снижает диффузию оптически ориентированных атомов к стенкам камеры поглощения и, таким образом, уменьшает число дезориентирующих соударений, что увеличивает амплитуду сигнала и сужает линию магнитного резонанса. Ин-

терференционный фильтр выделяет из широкого спектра, излучаемого лампой накачки, оптическую линию с длиной волны 7947,47 ангстрем, которая используется для оптической ориентации атомов изотопа  $Rb^{87}$ . Поляризатор выделяет свет с линейной поляризацией. Четвертьволновая пластинка используется для преобразования линейно поляризованного света в циркулярно поляризованный, который несет момент количества движения. При поглощении квантов циркулярно поляризованного света их момент количества движения передается атомам изотопа  $Rb^{87}$ , что приводит к оптической ориентации. Выходная линза камеры поглощения собирает прошедший через камеру поглощения свет и направляет его в фотодиод.

Одновременно с оптическим воздействием атомы изотопа  $Rb^{87}$  подвергаются воздействию поля, создаваемого радиочастотной катушкой. Частота поля поддерживается равной частоте магнитного резонанса атомов. При этом частота магнитного резонанса  $f_{\text{res}}$  связана со значением индукции магнитного поля  $B$  через гиромантическое отношение. Его величина зависит от рабочего вещества магниточувствительного датчика и для  $Rb^{87}$  составляет  $K \approx 6,995795$  Гц/нТл.

Для обеспечения нормальной работы системы слежения за центром линии магнитного резонанса в частоту резонансного поля вводится низкочастотная фазовая модуляция, которая вызывает изменение прозрачности камеры поглощения. При точном совпадении значения частоты резонансного поля частоте магнитного резонанса на выходе фотодиода имеется только вторая гармоника частоты модуляции. При несовпадении частот поля и магнитного резонанса на выходе фотодиода появляется первая гармоника частоты модуляции, фаза которой несет информацию о знаке расстройки, а амплитуда – о величине расстройки. Таким образом, сигнал с фотодиода управляет работой системы слежения, заставляя радиочастотную катушку менять частоту поля так, чтобы она была равна частоте магнитного резонанса. Синхронизация со временем и навигационным модулем ведется 10 раз в секунду.

В настоящее время широкое распространение получил квантовый рубидиевый магнитометр *Geoscan GeoShark*, успешно использующий БПЛА в качестве носителя [14]. На рис. 3 показана схема конструкции устройства, где: ВИП – вторичный измерительный преобразователь; ПИП – первичный измерительный преобразователь; А1 – цифровой вычислитель (ЦВ); А2 – система стабилизации температуры камеры (ССТК); А4 – источник тока; А5 – цифровой синтезатор частоты (ЦСЧ); А6 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 1 – контуры обратной связи; 2 – полупроводниковый лазер с вертикальной структурой; 3 – многомодовый световод; 4 – собирающие линзы; 5 – круговой поляризатор; 6 – радиочастотная катушка; 7 – камера с парами щелочного металла; 8 – нагреватель камеры; 9 – фотодиод.

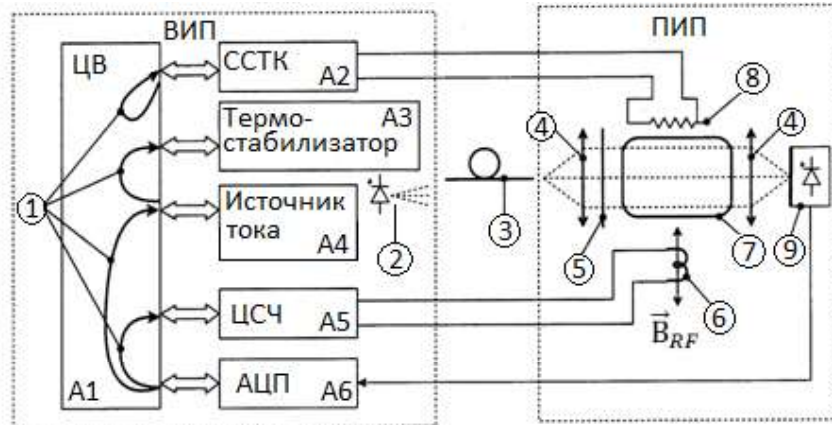


Рис. 3. Устройство квантового магнитометра «Geoscan GeoShark»

Fig. 3. Design of the «Geoscan GeoShark» quantum magnetometer

#### IV. Методика проведения измерений с использованием БПЛА, оборудованных квантовым магнитометром

Методика получения данных магниторазведки с использованием беспилотных летательных аппаратов включает в себя несколько основных этапов.

1. Перед началом измерений определяется целевая область для магниторазведки, и формируются требования к задаче, включая высоту полета, скорость, область исследуемой площади и т. д. При этом необходимо учитывать длину троса, на котором магнитометр прикреплен к квадрокоптеру. С учетом практики в зависимости от типа квадрокоптера и магнитометра длина троса не менее 15 м. В этом случае влияние от магнитного поля БПЛА становится несущественным.

2. Далее выбирается подходящий БПЛА, на который устанавливается специализированный магнитометр с другими необходимыми сенсорами и системы, которые могут использоваться для магниторазведки.

3. Осуществляется запуск БПЛА, и выполняется маршрут полета над исследуемой областью. Исследуемая площадь разбивается на параллельные маршруты – профили, которые располагаются на равном расстоянии друг от друга. Аэромагнитная съемка проводится по системе профилей при непрерывной записи показаний магнитометра на каждом профиле (маршруте) [3]. Магнитное поле измеряется вдоль каждого маршрута. Каждому профилю соответствует график изменения магнитного поля. Расстояние между профилями выбирается в зависимости от планируемого масштаба съемки. Для учета вариаций магнитного поля прибора перед началом исследования



и после его окончания делается специальный вылет на опорный (контрольный) маршрут. При обработке магнитограмм аномальные значения рассчитываются путем вычитания из наблюдаемого значения нормального поля.

4. После сбора данных начинается их обработка и интерпретация. По результатам измерений строят графики магнитного поля для каждого профиля, а также карты магнитных полей. Одна из основных задач магниторазведки – это визуализация магнитного поля на участке изучаемой земной поверхности. Для этих целей используются геоинформационные системы (ГИС). Данные магниторазведки импортируются в ГИС при помощи соответствующих инструментов и функций. С помощью специального программного обеспечения файлы с точечными значениями магнитного поля (в Тл) в конкретных точках маршрута визуализируются в виде цветовой гаммы [1] в зависимости от значений измеренного магнитного поля. Далее между точками производится аппроксимация и строится карта магнитного поля.

5. После успешного осуществления визуализации магнитных полей в виде графиков и карт начинается анализ и интерпретация полученных результатов. Начинается решение обратной задачи магниторазведки [15, 16]. Она заключается в определении размеров, структуры, объема и глубины залегания горных пород или техногенных объектов по полученным распределениям магнитных полей.

Один из первых ярких примеров успешного применения БПЛА – аэромагнитная съемка при поиске рудных месторождений в Казахстане в 2017 г. [9]. Исследуемый участок аэромагнитной съемки находится в Восточном Казахстане на южном склоне горного хребта на юго-западе Казахстанского Алтая. Аэромагнитная съемка выполнялась в составе комплексных геологоразведочных работ на руды золотокварцевого типа. Съемка была выполнена квантовым рубидиевым магнитометром. В качестве носителя использовался БПЛА мультироторного типа.

Для проведения измерений использовался квадрокоптер «Геоскан 401». БПЛА был оснащен системой автоматического управления, инерциальной навигационной системой, двухчастотным навигационным приемником сигналов *GPS*/ГЛОНАСС, контроллером управления полезной нагрузкой, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации.

За это время было выполнено 22 погонных км магнитной съемки. За один день измерений удалось пройти до 160 км маршрута. Магнитометр подвешивался к БПЛА на капроновом шнуре длиной 20 м. Магнитное поле регистрировалось с частотой 1000 Гц. Частота записи данных *GPS* приемника составляла 10 Гц. Антенна *GPS* приемника была закреплена на штанге на расстоянии 1 м от датчика магнитометра.

Во время аэромагнитной съемки датчик находился на высоте 50 м. Исследуемая область была разбита на параллельные маршруты с шагом в 50 м. На рис. 4, а представлены результаты аэромагнитной съемки в виде цветного изображения карты аномального магнитного поля.

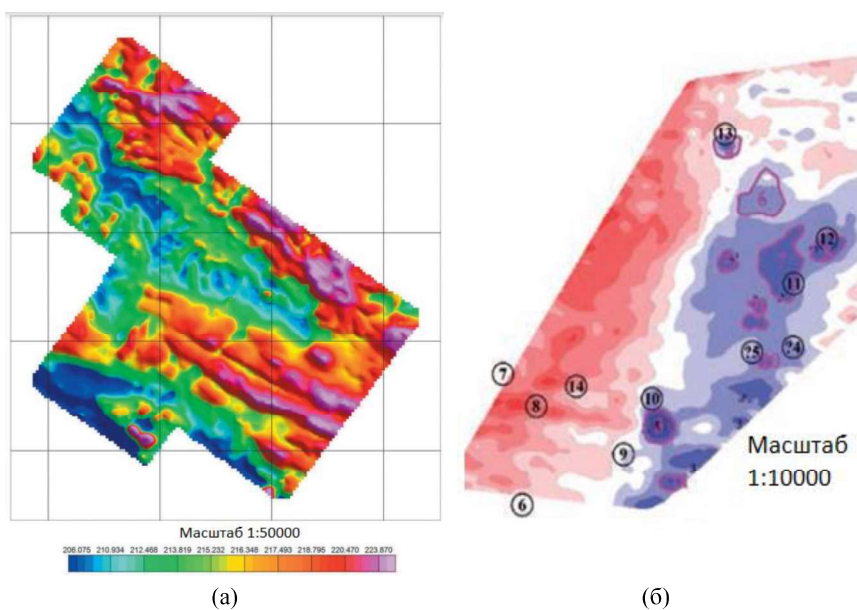


Рис. 4. Карты магнитных полей: при поиске рудных месторождений (а); при поиске археологических памятников (б)

Fig. 4. Maps of magnetic fields: in the search for ore deposits(a); in the search for archaeological monuments (b)

В результате применения новых технологий удалось повысить детальность и производительность магнитной съемки в десятки раз, а также существенно улучшить точность измерений по сравнению с существующими данными.

Помимо геологоразведочных работ, беспилотные системы также нашли применение и в области археологии [17]. До начала раскопок магниторазведка может помочь определить местоположение и характеристики потенциальных археологических объектов. Это позволяет более эффективно оптимизировать процесс. Магниторазведка может быть использована для изучения культурных слоев, обнаруживая аномалии в магнитных свойствах грунта, которые могут указывать на присутствие археологических объектов разных временных эпох [18]. Так, например, в 2019 г. проводились

магниторазведочные работы при поиске курганов в Шелаболихинском районе Алтайского края. В задачи геофизического исследования входило выявление магнитных аномалий на месте визуально не фиксирующихся насыпей на площади исторического памятника, а также выяснение структуры надмогильных сооружений крупных курганов. В ходе исследовательских работ применялся метод разновременной аэромагнитной съемки с использованием БПЛА мультироторного типа и портативного высокочастотного магнитометра. Результаты аэромагнитной съемки представлены в виде карты аномального магнитного поля, созданной с помощью программного комплекса «*Surfer*» (рис. 4, б). Цифрами отмечены возможные места расположения археологических объектов, обнаруженных на основании анализа карты магнитных полей и спутниковых снимков. В результате проведения магниторазведки была получена информация о крупных погребальных сооружениях. Выявленные аномалии магнитного поля помогут усовершенствовать методику получения данных об археологических памятниках.

#### V. Заключение

Использование беспилотных летательных аппаратов в геофизических исследованиях обладает рядом преимуществ. БПЛА могут быстро и легко доставляться в удаленные или труднодоступные области, где проведение геофизических изысканий с использованием традиционных методов может быть существенно затруднено или вообще невозможно. Преимущества беспилотной магниторазведки перед наземной очевидны: аэромагнитная съемка обладает гораздо большей производительностью и эффективностью. БПЛА предоставляют новые возможности в выборе маршрутов и параметров исследования, позволяя проводить исследования на больших площадях за более короткий период времени. Современные беспилотные системы обеспечивают высокую точность и разрешение данных благодаря применению передовых технологий и датчиков. В настоящее время основное преимущество данного метода заключается в снижении трудоемкости и затрат на проведение работ без ущерба для качества измерения магнитных полей на исследуемых территориях.

Среди перспективных направлений исследований остается повышение точности воздушной магниторазведки как геофизического метода исследования. Эта задача может быть частично решена за счет совершенствования навигации, оптимизация веса оборудования, скорости передвижения в процессе работы, автоматизации движения по маршруту при неблагоприятных погодных условиях, совершенствования технологий производства конструктивных материалов. Кроме того, актуальны исследовательские работы, связанные с удешевлением и повышением эффективности самих магнитометров, размещаемых на борту несущих летательных аппаратов.

В статье представлены варианты реализации магнитометра, размещаемого на промышленном БПЛА, приведена методика проведения магнито-разведки, частично с анализом результатов. Обоснована практическая значимость. Таким образом, современные промышленные БПЛА, оборудованные квантовыми магнитометрами, представляют собой достаточно эффективный и мощный инструмент для проведения геофизических исследований, обеспечивая экономическую выгоду, мобильность и высокую точность измерений.

© Петленко Д.Б., 2024

© Авдонин Е.А., 2024

*Поступила в редакцию 27.05.2024*

*Принята к публикации 09.07.2024*

*Received 27.05.2024*

*Accepted 09.07.2024*

#### Библиографический список

- [1] Петленко Д.Б. Применение магнитометров в геологии // Межд. межведомственная науч.-тех. конф. «Космические технологии-2023», Октябрь 26, 2023, Москва, Россия. М.: РТУ МИРЭА, 2024. С. 164-169.
- [2] Журбин И.В. Археология и геофизика: принципы комплексных исследований // Российская археология. 2004. № 3. С. 79-88.
- [3] Тарасов А.В., Ихина Э.Р., Каюков А.Е., Гоглев Д.А. Опыт применения низко-высотной аэромагнитной съемки с комплексом ГЕОСКАН-401-Геофизика на Сынырском ультракалийевом массиве // Разведка и охрана недр. 2019. № 10. С. 20-31.
- [4] Гоглев Д.А. Беспилотные технологии для геологоразведки: устоявшийся тренд или новое направление? // Конференция «Беспилотная отрасль — 2023», Февраль 16-17, 2023, Томск, Россия. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan\\_tpu\\_conf\\_2023/materials/Гоглев\\_Аэромагнитная%20съемка.pdf](https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan_tpu_conf_2023/materials/Гоглев_Аэромагнитная%20съемка.pdf) (дата обращения 23.11.2023).
- [5] Новиков К.В. Магниторазведка. Часть 1. М.: МГРИ-РГГРУ, 2013. — 141 с.
- [6] Хмелевской В.К., Костицын В.И. Основы геофизических методов. Пермь: Перм. ун-т, 2010. — 400 с.
- [7] Магнитная съемка // ГК «Геоскан». [Электронный ресурс]. URL: [https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic\\_survey](https://www.geoscan.ru/ru/services/aeromagnetic_survey) (дата обращения 24.11.2023).
- [8] Геоскан 401 Геофизика // ГК «Геоскан». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401/geophysics> (дата обращения: 23.11.2023).
- [9] Коврижных П.Н., Кожамсугиров Д.О., Кожевников С.Н., Макаров Д.В., Капштан Д.Я. Инновационная аэромагнитная съемка с применением беспилотного летательного аппарата при поисках рудных месторождений в Казахстане // Геология и охрана недр. 2017. № 4 (65). С. 34-42.

- [10] Груздев Р.В. Магниторазведочные работы – наземная технология, аэромагнитная съемка на самолете и беспилотном летательном аппарате: сопоставительный анализ результатов (на примере Восточного Забайкалья) // Вестник Забайкальского Государственного Университета. 2020. № 26 (8). С. 6-15. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-8-6-15
- [11] Лукьянова Р.Ю., Гвишиани А.Д. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля земли: Российский сегмент // Физика земли. 2015. № 2. С. 3-20. DOI: 10.7868/S0002333715020040
- [12] Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Квантовые магнитометры с оптической накачкой для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 3. С. 18-28.
- [13] Стерлигов Б.В., Курмаева В.В., Капштан Д.Я., Дмитриев К.А. Квантовый рубидиевый МЗ Аэромагнитометр, Пат. RU 169455 U1, заявл. 18.07.16; опубл. 21.03.17.
- [14] Капштан Д.Я. Способ измерения магнитного поля земли и квантовый магнитометр для реализации такого способа, Пат. RU 2784201 C1, заявл. 15.09.21; опубл. 23.11.22. – Бюл. № 33.
- [15] Блох Ю.И. Решение прямых задач гравиразведки и магниторазведки. М.: МГГА, 1993. – 79 с.
- [16] Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н, Морозов В.А., Михалев А.О., Просекин С.Н., Тарасова Ю.И., Спиридонов А.М. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № 56. С. 150-155. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)
- [17] Отажоновна Ш.Х.к., Вахобов Ж.А.у. Применение геофизических методов в археологических исследованиях в Узбекистане // Universum: общественные науки. 2023. № 8 (99). С. 4-8. DOI: 10.32743/UniSoc.2023.99.8.15884
- [18] Тишкин А.А., Фирсов А.П., Фролов Я.В., Колесов А.С., Останин В.А., Лукин А.А., Малетин Ю.Ю. Результаты трехуровневой аэромагнитной съемки на археологическом памятнике «Ивановка-I, курганная группа» (Шелаболихинский район Алтайского края) // Теория и практика археологических исследований. 2019. № 28 (4). С. 129-140. DOI: 10.14258/tpai(2019)4(28).-09

### References

- [1] D.B. Petlenko, “Application of magnetometers in geology”, in proc. *Int. interdepart. sci.-tech. conf. “Kosmicheskie tekhnologii-2023 [Space technologies-2023]”*, Oct. 26, 2023, Moscow, Russia, pp. 164-169.
- [2] I.V. Zhurbin, “Archaeology and geophysics: principles of complex investigation”, *Russian Archaeology*, no. 3, pp. 79-88, 2004.
- [3] A.V. Tarasov, E.R. Ikhina, A.E. Kayukov, D.A. Goglev, “Experience of using low-altitude aeromagnetic survey with the complex Geoscan-401-Geophysics at the Synyr ultrapotassic igneous massif”, *Razvedka i Ohrana Nedr [Exploration and Protection of Mineral Resources]*, no. 10, pp. 20-31, 2019.

- [4] D.A. Goglev, *Bespilotnye tekhnologii dlya geologorazvedki: ustoyavshijsya trend ili novoe napravlenie?* [Unmanned technologies for geological exploration: an established trend or a new direction?], presented at the *conf. Bespilotnaya otrasl' 2023 [Unmanned Industry 2023]*, Feb. 16-17, 2023, Tomsk, Russia [Online]. Available at: [https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan\\_tpu\\_conf\\_2023/materials/Гоглев\\_Аэромагнитная%20съёмка.pdf](https://www.geoscan.ru/themes/geoscan/assets/seminary/geoscan_tpu_conf_2023/materials/Гоглев_Аэромагнитная%20съёмка.pdf) [Accessed: Nov. 23, 2023] (in Russian).
- [5] K.V. Novikov, *Magnitorazvedka. CHast' 1 [Magnetic prospecting. Part 1]*. Moscow: MGRI-RGGRU, 2013 (in Russian).
- [6] V.K. Khmelevskoy and V.I. Kostitsyn, *Osnovy geofizicheskikh metodov [Fundamentals of geophysical methods]*. Perm: Perm. University, 2010 (in Russian).
- [7] *Magnitnaya s"emka [Magnetic survey]*. [Online]. Available at: [https://www.geoscan.ru/services/aeromagnetic\\_survey](https://www.geoscan.ru/services/aeromagnetic_survey) [Accessed: Nov. 24, 2023] (in Russian).
- [8] *Geoskan 401 Geofizika [Geoskan 401 Geophysics]*. [Online]. Available at: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoskan401/geophysics> [Accessed: Nov. 23, 2023] (in Russian).
- [9] P.N. Kovrizhnykh, D.O. Kozhamsugirov, S.N. Kozhevnikov, D.V. Makarov and D.Ya. Kapshtan, “Innovacionnaya aeromagnitnaya s"emka s primeneniem bespilotnogo letatel'nogo apparata pri poiskah rudnyh mestorozhdenij v Kazahstane [Innovative aeromagnetic survey using an unmanned aerial vehicle in the search for ore deposits in Kazakhstan]”. *Geologiya i ohrana neдр [Geology and subsoil protection]*, vol. 4, no. 65, pp. 34-42, 2017 (in Russian).
- [10] R.V. Gruzdev, “Magnetic survey – ground technology, aeromagnetic survey on aircraft and unmanned aerial vehicles: a comparative analysis of the results (on the example of Eastern Transbaikalia)”, *Transbaikal State University Journal*, vol. 26, no. 8, pp. 6-15, 2020. DOI 10.21209/2227-9245-2020-26-8-6-15
- [11] A.D. Gvishiani and R.Yu. Lukyanova, “Geoinformatics and observations of the earth's magnetic field: the Russian segment”, *Fizika zemli*, no. 2, pp. 3-20, 2015. DOI: 10.7868/S0002333715020040
- [12] S.S. Zvezhinsky and I.V. Parfentsev, “Kvantovye magnitometry s opticheskoy nakachkoj dlya poiska vzryvoopasnyh predmetov [Quantum magnetometers with optical pumping for searching explosive objects]”, *Spectekhnika i svyaz' [Special equipment and communications]*, no. 3, pp. 18-28, 2009 (in Russian).
- [13] B.V. Sterligov, V.V. Kurmaeva, D.Ya. Kapshtan and K.A. Dmitriev, “Kvantovyj rubidievyy MZ Aeromagnitometr [Quantum rubidium MZ Aeromagnitometer]”, Patent RU 169455 U1, Mar. 20, 2017 (in Russian).
- [14] D.Y. Kapshtan, “Method for measuring the earth's magnetic field and a quantum magnetometer for implementing such a method”, Patent RU 2784201 C1, Nov. 23, 2022.
- [15] Yu.I. Blokh, *Reshenie pryamyh zadach gravirazvedki i magnitorazvedki [Solving direct problems of gravity prospecting and magnetic prospecting]*. Moscow: MGGA, 1993 (in Russian).
- [16] A.V. Parshin, A.E. Bydyak, A.V. Blinov, A.N. Kosterev, V.A. Morozov, A.O. Mikhalev, S.N. Prosekin, Yu.I. Tarasova and A.M. Spiridonov, “Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2”, *Geografya i Prirodnye*

- Resursy*, no. S6, pp. 150-155, 2016. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)
- [17] S. Otajonova and J. Vakhobov, “Application of geophysical methods in archaeological research in Uzbekistan”, *Universum: Social Sciences*, vol. 8, no. 99, pp. 4-8, Aug. 2023. DOI: 10.32743/UniSoc.2023.99.8.15884
- [18] A.A. Tishkin, A.P. Firsov, Ya.V. Frolov, A.S. Kolesov, V.A. Ostanin, A.A. Lukin, Yu.Yu. Maletin, “Results of a three-level aeromagnetic shooting at the archaeological site of “Ivanovka-I, barrow group” (Shelabolikhinsky district of the Altai Territory)”, *Theory and Practice of Archaeological Research*, vol. 28, no. 4, pp. 129-140, 2019. DOI: 10.14258/tpai(2019)4(28).-09

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Петленко Дмитрий Борисович**, **Dmitry B. Petlenko**, Cand. Sci. (Eng.), кандидат технических наук, доцент МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, associate professor of the MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation.

**Авдонин Евгений Алексеевич**, **Evgeniy A. Avdonin**, postgraduate student аспирант МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация, of the MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation.