РУБРИКА: ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА

Использование беспилотных авиационных систем самолётного типа для аэромагнитных съёмок

Ю.И. Егорова (АО «НПП «Радар ммс»), В.Г. Анцев (АО «НПП «Радар ммс»), А.Е. Симаков* (АО «НПП «Радар-ммс»), Е.Ю. Ермолин (ООО «ДЖИ М»)

Аннотация

В статье описана методика аэромагнитной съёмки с использованием беспилотных авиационных систем самолётного типа. Приведена информация о конструкции магнитометрических систем, устанавливаемых на беспилотные самолёты и проанализированы их возможности. В качестве примера применения технологии представлены результаты аэромагнитной съёмки масштаба 1: 10 000 на участке площадью 65 км^2, располагавшемся на большом удалении от точки старта. Работы проводились в условиях гористой местности с генеральным обтеканием рельефа на базовой высоте 70м. Результаты работ демонстрируют высокое качество полученных данных и эффективность описываемой технологии.

Ключевые слова

Беспилотные авиационные системы, аэромагнитная съёмка, беспилотные самолёты

The technique of magnetometry surveys using fixed-wing UAS

Ju.I. Egorova (Radar mms), V.G. Ancev (Radar mms), A.E. Simakov* (Radar mms), E.Yu. Ermolin (GM-Service)

Abstract

Paper contains short overview of drone-based magnetometry survey technique using unmanned airplanes. Some features of airplane magnetometer system are described. Magnetometry survey results obtained at the remote area of 65km^2 are shown. The survey has been carried out in hard-to-fly mountain conditions at the base altitude of 70 m. The results demonstrate high data quality and efficiency of the applied technique.

Key words

Unmanned aerial systems, aeromagnetic survey, fixed-wing UAS

Введение

Бурное развитие беспилотных авиационных систем (БАС), наблюдающееся последние 10-15 лет [1] повлекло за собой их активное применение в различных отраслях, в том числе разнообразные методики беспилотной съёмки успешно внедряются в геологоразведку сразу по нескольким направлениям, которые раньше закрывались работами с привлечением пилотируемой авиации или наземными методами.

Своего рода прорыв был достигнут в последние годы в области аэромагниторазведки [2, 3]. Данное обстоятельство обусловлено, в первую очередь тем, что была разработана и стала массово доступна лёгкая и компактная магнитометрическая аппаратура, в которой применяются различные модификации скоростных цезиевых, калиевых и рубидиевых датчиков.

Современные магнитометрические комплексы на базе беспилотных носителей различных типов позволяют решать широкий круг задач и производить съёмку в различных масштабах, являясь промежуточным звеном между традиционными пешеходными наземными и аэросъёмками с использованием пилотируемой авиации.

Чаще всего, маловысотные аэромагнитные съёмки с использованием БАС осуществляются с помощью магнитометров, смонтированных в специальных гондолах, подвешиваемых в качестве полезной нагрузки к носителям мультироторного или вертолётного типов (Рисунок 1). Подобная методика позволяет проводить съёмку на высотах 20-40 м с детальным обтеканием рельефа, выигрывая по производительности у классической наземной съёмки и в разрешающей способности и себестоимости у пилотируемой авиации. Всё больше и больше съёмок крупного масштаба (М 1: 2 000 – 1: 5 000) выполняется именно в аэроварианте с использованием манёвренных БВС мультироторного или вертолётного типов. Основным недостатком данной методики является относительно небольшое время полёта (20-50 мин) и, вследствие этого, ограниченный радиус действия, не превышающий нескольких километров от точки старта.

Для решения геологических задач, решаемых с помощью среднемасштабных съёмок (М 1: 10 000 1: 100 000) далеко не всегда требуется точно удерживать фиксированную высоту над земной поверхностью и можно проводить аэромагниторазведочные работы с генеральным обтеканием форм рельефа, и тут хотелось бы вспомнить о самолётном носителе. Существующие БВС самолётного типа, в силу своих лётных характеристик, не способны детально обтекать сложный рельеф, однако отличаются продолжительным временем полёта (до 12 часов) и большим, по сравнению с мультироторными и вертолётными носителями, радиусом действия, который может легко превышать 100 км при производительности до 1000 пог.км за один вылет.

Если речь идёт о проведении одной лишь аэромагнитной съёмки на больших площадях, то, конечно, использование пилотируемых воздушных судов, привязанных к оборудованным взлётно-посадочным полосам, будет нерациональным. В то же время, применение беспилотных самолётов в качестве носителей магнитометрических систем открывает широчайшие перспективы среднемасштабных съёмок в труднодоступных удалённых районах.

Поскольку использование подвесной немагнитной гондолы с носителем самолётного типа, особенно с беспилотным, сопряжено с очевидными трудностями, логичным ходом является жёсткое крепление датчика магнитометра к корпусу самолёта. Как правило, датчик устанавливается на выносной штанге на максимально-возможном удалении от магнитных частей конструкции. Несмотря на это, носитель всё равно создаёт определённую магнитную помеху, которую необходимо скомпенсировать, чтобы избежать появления ложных аномалий и соблюсти требования к качеству аэромагнитной съёмки. Наработки по компенсации магнитной помехи носителя, созданные для пилотируемой авиации, в равной степени применимы и для

авиации беспилотной. Таким образом магнитометрическая система на базе беспилотного самолёта может успешно применяться для аэрогеофизических съёмок, пример одной из которых приведён в данных тезисах.

Описание технологии

До недавнего времени, съёмки с беспилотными носителями самолётного типа, по крайней мере в Российской Федерации, не были распространены, пока в 2019г. не началась разработка магнитометрической системы в основе которой лежит цезиевый магнитометр типа ДМ (АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург) с системой компенсации на основе трёхкомпонентного феррозондового магнитометра [4]. Система адаптируется под установку на БВС самолётного типа (Рисунок 1).

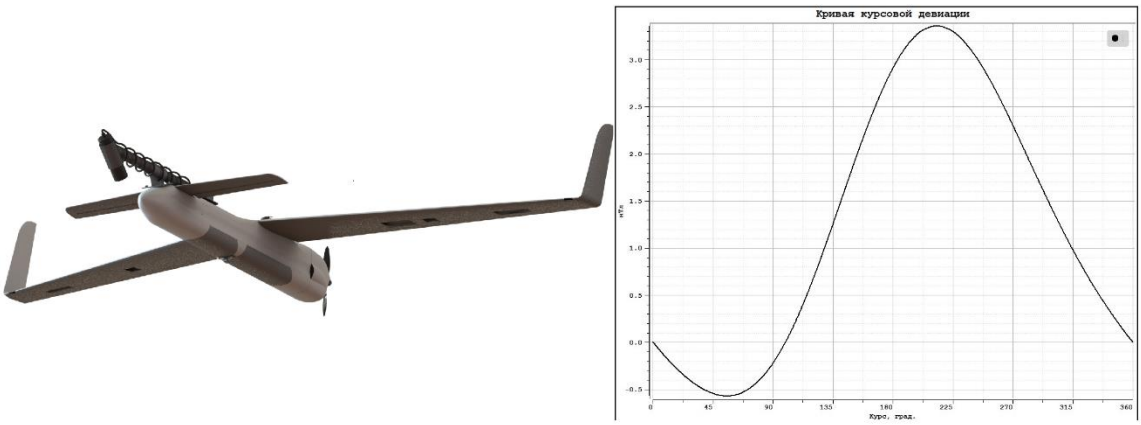

Рисунок 1 *Беспилотный магнитометрический комплекс с системой компенсации помехи носителя смонтированный на БВС СТ ДИАМ-20 (слева). Кривая курсовой девиации ММС (справа)*

Функциональная схема бортовой ММС, устанавливаемой на беспилотный самолет представлена на Рисунок 2. Данные в исходной частоте, передаваемые с квантового и феррозондового магнитометров, а также с приёмника системы спутниковой навигации, записываются в энергонезависимую память блока сбора и обработки. Кроме того, данные на частоте 2 Гц транслируются по радиоканалу автоматической системы управления (АСУ) БВС на наземный центр управления (НЦУ), что позволяет операторам контролировать качество собираемых данных и работоспособность ММС непосредственно в процессе полёта.

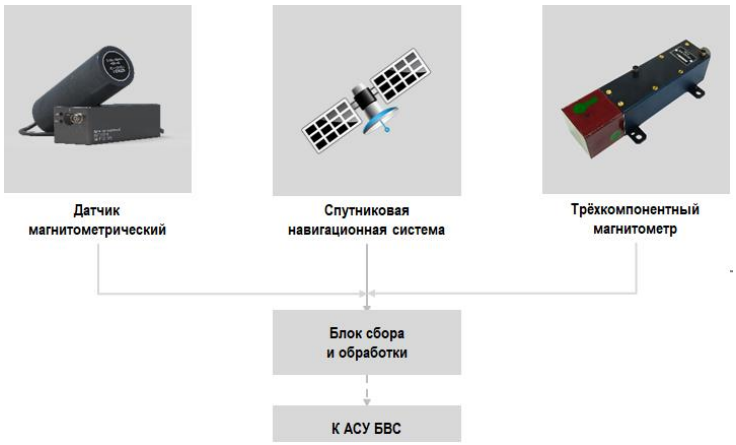

Рисунок 2 *Структура бортовой ММС с системой компенсации магнитной помехи носителя*

Пример применения

Аэромагнитная съёмка с использованием ММС на базе беспилотного самолёта впервые в России была реализована в 2020г. на одном из лицензионных участков ПАО «Газпром нефть» в рамках опытно-методических работ. Съёмка проводилась на двух высотных уровнях, при этом общий объём составил около 500 пог.км, а уже к 2024г., объём выполненных работ в интересах ряда крупных недропользователей а также государственных заказчиков превысил 18 000 пог.км.[5]

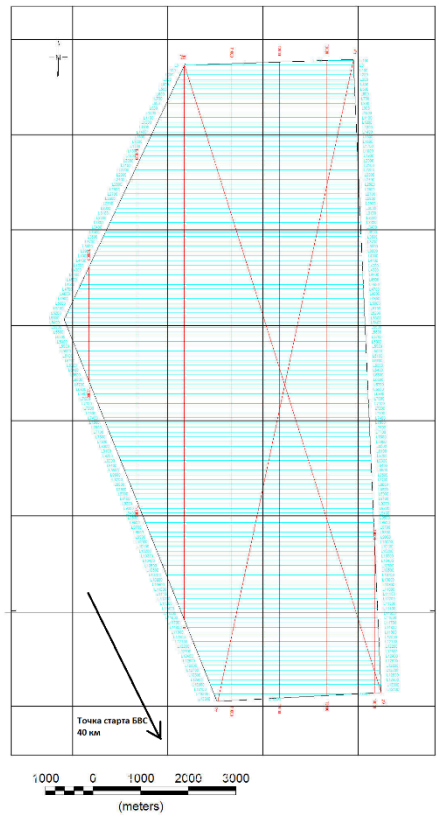

Рисунок 3 *Схема аэромагниторазведочных работ масштаба 1: 10 000 на участке съёмки площадью 65 км^2 (Россия, Дальний Восток)*

Ниже приведён пример применения магнитометрической системы на базе БВС самолётного типа при проведении аэрогеофизической съёмки масштаба 1: 10 000 на участке площадью 65 км^2, расположенном в одном из удалённых регионов России (Дальний Восток). Стоит отметить, что работы, в том регионе, проводились на нескольких участках площадью от 60 до 600 км^2 из одной точки старта БВС. При этом плечо подлёта до участков работ достигало 120 км. При проведении съёмки на участках, удалённых от точки старта БВС более, чем на 50 км организовывался пункт регистрации вариаций вблизи места работ. Расстояние до участка, описываемого в данной работе, не превышало 40 км и учёт вариаций магнитного поля производился в базовом лагере вблизи точки старта.

Измерения проводились с генеральным огибанием рельефа на базовой высоте 70м по 134 рядовым маршрутам (РМ) длиной 4 000 - 7000 м по азимутам: 90 и 270^0 с межмаршрутным расстоянием 100 м. Для увязки данных по рядовым маршрутам, ортогонально им были проложены шесть опорных маршрутов (ОМ) длиной 3 000 – 13 400 м (азимут 0 и 180^0). Расстояние между опорными маршрутами составляло 1000 метров. По главным диагоналям участка съёмки были проложены два секущих маршрута (СМ) длиной 14 000 м, которые пересекали все РМ. Азимуты СМ составили 150 и 210^0. В начале и в конце каждого вылета проводилась съёмка в прямом и обратном направлениях на контрольных

маршрутах (КМ) протяженностью 3 км каждый. Продолжительность съёмки составила два дня (14 самолёто-часов).

Съёмка проводилась в сложных условиях полярного нагорья с перепадами высот до 200 м на километр маршрута. Общий перепад высот в пределах участка достигал 600 м. На **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлен пример траектории БВС при полёте с генеральным обтеканием в таких условиях.

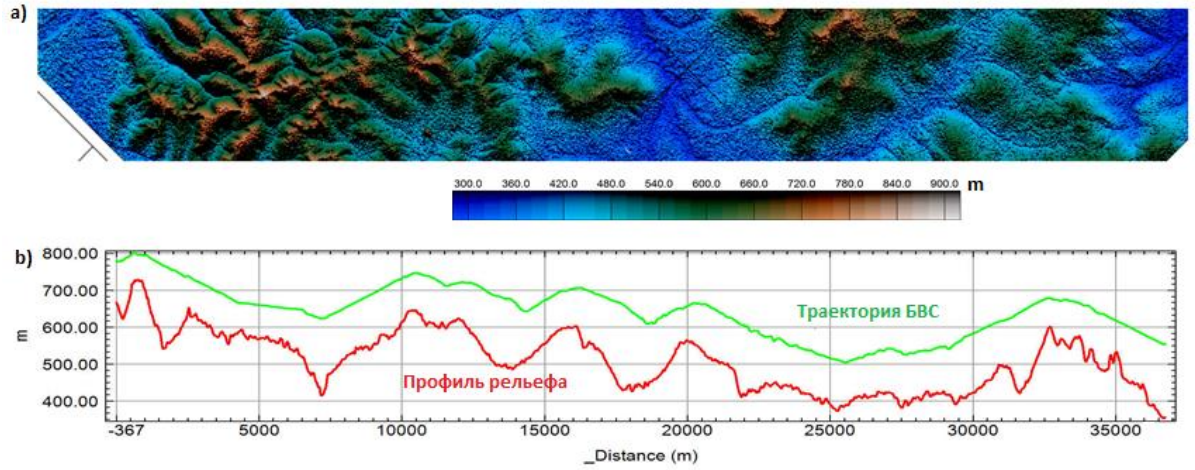

Рисунок 4 *Фрагмент карты высот (a) и пример обтекания БВС сложного рельефа (b).*

По результатам съёмки были подготовлены электронные базы данных и комплект карт аномального магнитного поля и его трансформант (Рисунок 5).

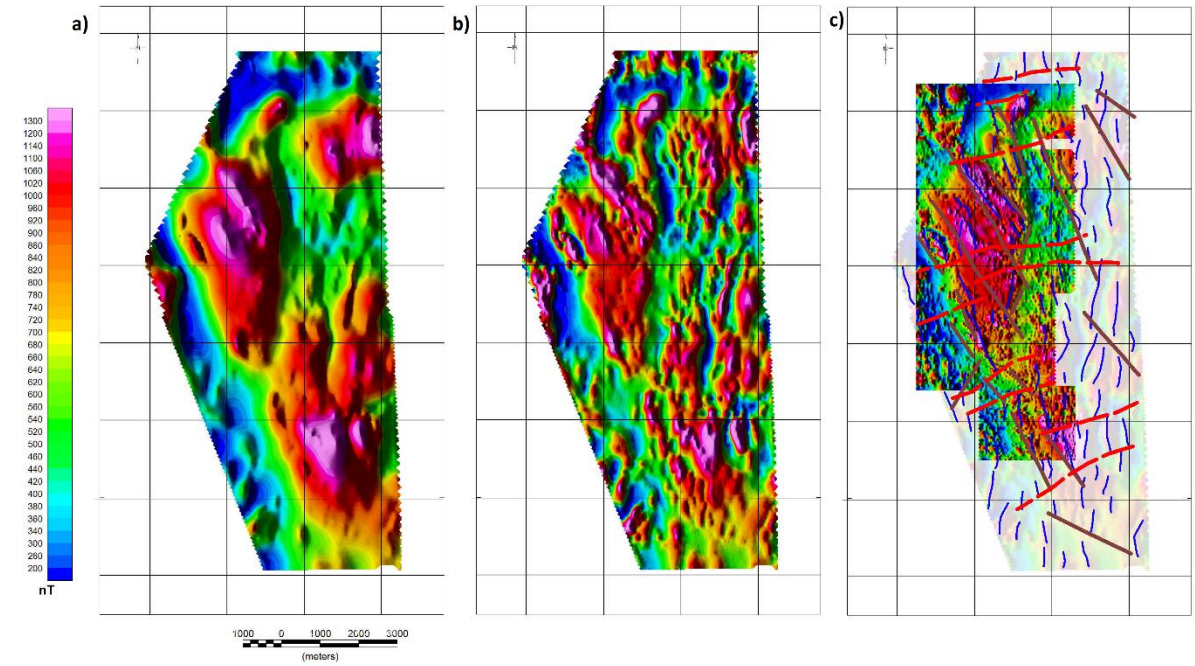

Рисунок 5 *Карты аномального магнитного поля (a), его вертикальной производной (b), полученные по результатам аэромагнитной съёмки м 1:10 000 на участке площадью 65 км2, а также карта dTa по результатам наземной съёмки масштабов 1:5 000 и 1: 10 000 с линеаментами, выделенными по результатам анализа данных аэросъёмки (c).*

По результатам линеаментного анализа данных аэромагнитной съёмки были выделены основные геологические границы и тектонические нарушения.

Схема линеаментов (Рисунок 5с) получена на основании карты локальной составляющей, карты АМПЗ, и карты вертикальной производной. Выделялись линейные положительные и отрицательные аномалии локальной составляющей, (выделенны синим цветом), связанные с осями положительных линейных аномалий, часто связанных с дайками среднего и основного состава. На карте Рисунок 5с представлены только отрицательные аномалии, чтобы не перегружать карту и видно, что они в основном имеют субмеридианальное направление. После анализа уже построенных линеаментов было замечено, что некоторые из их окончаний тоже выстраиваются в линию. Здесь, по концам осей корреляции были выделены субширотные зоны ослабления (заглубления) линейных аномалий, которые могут быть связаны с неотектоническими движениями и метасоматозом, не сопровождающимися привнесением магнитного материала или интрузивным магматизмом. Таким образом были выделены линеаменты второго порядка (на *Рисунок 5*с выделены красным цветом), имеющие субширотное – северовосточное простирание. Они могут быть связаны с неотектонической активностью и тектоническими нарушениями, по которым могли проходить перемещения блоков в вертикальном направлении. Такие разломы не связаны напрямую с магматизмом, или метасоматозом, сопровождающимися привносом и выносом магнитного материала и тем не менее могут быть выделены по результатам магнитной съемки с БВС. С одним из этих линеаментов хорошо коррелируется зона кварцевых жил субширотного простирания ранее выделенных в центральной части площади, на предыдущих этапах геолого-разведочных работ.

Также были выделены зоны высокого градиента наблюденного поля, и границы, связанные с сменой характера наблюденного поля, которые могут быть приурочены к границам крупных блоков глубинного заложения, (на *Рисунок 5*с выделены коричневым цветом)

Поскольку в распоряжении исполнителей имелись результаты наземных магнитных съёмок масштаба 1: 5 000 и 1: 10 000, выполненных на части исследуемой площади в сезоне 2007г., закономерным шагом было провести сравнение результатов двух съёмок.

Разумеется, наземная съёмка отличается более высокой разрешающей способностью, по сравнению с той, что была сделана помощью беспилотного самолёта, однако, практически все структурные элементы, границы и тектонические нарушения, выделяемые по данным наземной съёмки, проявлены также в аэроданных. При этом, данные наземной съёмки, по понятным причинам, в большей степени подвержены влиянию геологических шумов, вызванных приповерхностными малоразмерными объектами.

На Рисунок 5.с представлена карта аномального магнитного поля, полученная по результатам наземной съёмки 2007г, с нанесёнными на неё границами, выделенными до этого по данным аэромагнитной съёмки. В качестве полупрозрачной подложки на Рисунок 5.с использована карта вертикальной компоненты dTa, построенная по данным аэромагнитной съёмки 2022г.

Конечно, на данном участке аномальное поле отличается значительными градиентами, однако, с помощью аэросъёмки были выделены объекты амплитудой от 20 нТл и размером от 20-30м.

Оценка качества съёмки проводилась в несколько этапов в соответствии с существующими нормативными требованиями [6].

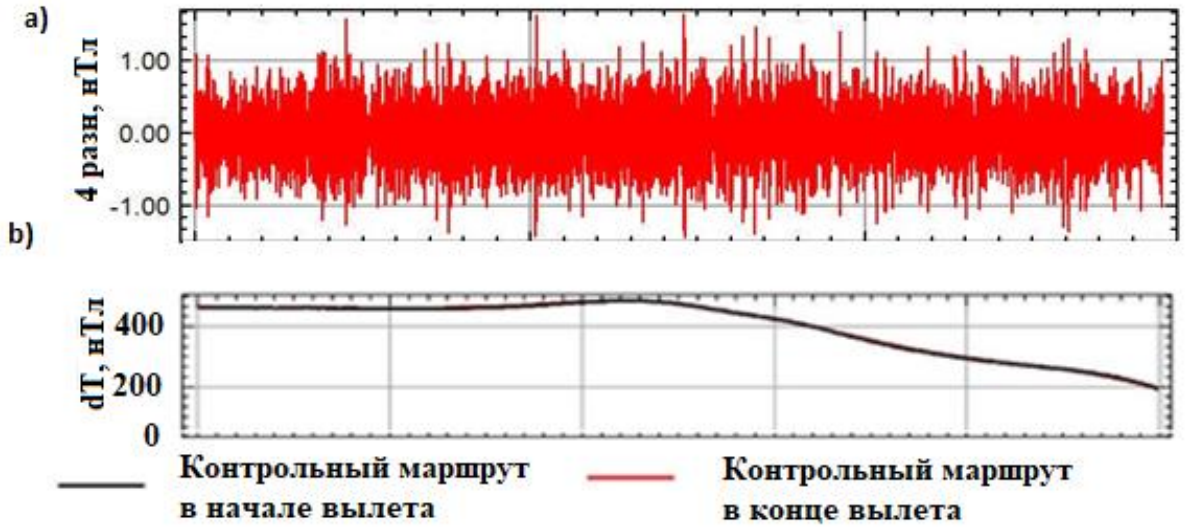

Рисунок 6 *Значение четвёртой разности (a), результаты пролёта по контрольному маршруту (b).*

Первичный контроль качества работы магнитометра оценивается по величине четвертой разности (Рисунок 6-a), которая была вычислена в ходе обработки данных по формуле:

F.D=Xt-2 – 4Xt-1 + 6Xt –4Xt+1 + Xt+2

(1)

где X обозначает измеренную амплитуду для пяти последовательных наблюдений магнитного поля (от t-2 до t+2). Значения четвёртых разностей в анализируемых интервалах не превышало нормативного порога ±1,6 нТл. Максимальные пороговые значения для приведённого на Рисунок 6-a участка составили 1.23-0. 99 нТл, при этом СКО составило 0.277 нТл.

Также в каждом вылете производилось прохождение контрольного маршрута в прямом и обратном направлении. На Рисунок 6-b приведены графики поля на контрольном маршруте КМ №-1000 длиной 4 900 м. Красным и чёрным изображены значения dT, полученные при прохождении контрольного маршрута в начале и конце вылета. При этом СКО разницы значений dT составило 1.2 нТл.

Кроме того, оценка погрешности аэромагнитной съемки проводилась согласно нормативным требованиям по точкам пересечения рядовых и секущих маршрутов, на участках, где значения горизонтального градиента не превышали 50- нТл/км. Для оценки использовались данные по 132 точкам пересечений секущих и рядовых маршрутов.

Среднеквадратичное отклонение (СКО) рассчитывалось по точкам пересечения секущих и рядовых маршрутов следующей формуле [2]:

$$\text{СКО } (\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2}{2*(n-1)}}$$

(2)

Для описываемой съёмки СКО (δ) по пересечениям секущих маршрутов с рядовыми составило 4.79 нТл, что является неплохим результатом, принимая во внимание сложный рельеф и большие градиенты поля.

Выводы

Аппаратура и методика аэромагнитных съёмок с использованием беспилотных воздушных самолётного типа зарекомендовала себя положительно и может успешно применяться для выполнения аэромагнитных съёмок, масштаба 1: 10 000 и мельче, что позволит существенно расширить область применения беспилотных воздушных систем при проведении геолого-разведочных работ, частично заняв нишу пилотируемой авиации, при этом производительность съемки на БВС самолетного типа, дальность полета до площади работ, устойчивость в воздухе при повышенном ветре существенно превышает возможности съемки на мультикоптерах и БВС вертолётного типа.

В приведённом в примере показано, что все основные геологические особенности участка работ, выделенные при наземной съёмке масштабов 1:5 000 и 1: 10 000, также проявлены в данных аэросъёмки масштаба 1: 10 000, выполненной с помощью БВС самолётного типа. Таким образом, подобный вид аэросъёмок можно с уверенностью рекомендовать к использованию при выполнении подобного вида работ.

Список литературы

1. Drone geophysics and remote sensing, ed. by Ron Bell // FastTimes Vol 25. #3, 2020, 172 pages.
2. Паршин А.В., Цирель В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки с применением БПЛА // Изд-во ВИМС, М. 2018, 32 стр.
3. UAV Total and Vector Field Magnetics Surveying Guidelines, ed. by Ron Bell // Near-Surface Geophysics Inter-Society Committee on UAV Geophysics Guidelines, November 2022, 114 pages.
4. А.Е. Симаков, Ф.Г. Гуторов, В.Г. Анцев, В.С. Цирель, Е.Ю. Ермолин, А.Н. Драненков, Аэромагнитные съёмки с использованием беспилотных авиационных систем самолётного типа // 25-ая научно-практическая конференция «Геомодель 2023», Геленджик, Россия, 04-07 сентября 2023г, Сборник материалов конференции с.210-214, ISBN: 978-5-9651-1486-3
5. Симаков А.Е., Гуторов Ф.Г., Анцев В.Г., Цирель В.С., Ермолин Е.Ю., Драненков А.Н., Перспективы применения беспилотных авиационных систем самолётного типа для аэромагнитных съёмок// Материалы конференции «Инженерная и рудная геофизика 2024», Казань, Россия, 13-16 мая 2024г. с. 66-69, ISBN №978-5-9651-1491-7
6. Асламов Ю.В., Бабаянц П.С., Глинский Н.А., Зубов Е.И., Мельников П.В., Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съёмок // Картографическая фабрика ФГБУ ВСЕГЕИ, СПб. 2021.

References

1. Drone geophysics and remote sensing, ed. by Ron Bell // FastTimes Vol 25. #3, 2020, 172 pages.
2. A.V. Parshin, V.S. Tsirel, A.K. Rzhevskaya. Methodology recommendations for the low-altitude aeromagnetic survey fulfillment using UAS // Ed. VIMS, Moscow. 2018, 32 pages (in Russian).
3. UAV Total and Vector Field Magnetics Surveying Guidelines, ed. by Ron Bell // Near-Surface Geophysics Inter-Society Committee on UAV Geophysics Guidelines, November 2022, 114 pages.

4. A.Simakov, F.Gutorov, V. Antsev, V.Tsirel, E. Ermolin, A. Dranenkov, The technique of magnetometry surveys using unmanned airplanes // 25-th conference “Geomodel 2023”, September 04-07 2023, Gelendzhik, Russia, pp.210-214, ISBN: 978-5-9651-1486-3 (in Russian)
5. A. Simakov, F. Gutorov, V. Antsev, V. Tsirel, E. Ermolin, A. Dranenkov, Prospects of application of fixed-wing unmanned aerial systems for aeromagnetic surveys // 20-th International conference “EngGeo-2024”, May 13-16 2024, Kazan, Russia, pp. 66-69, ISBN 978-5-9651-1491-7 (in Russian)

Aslamov Yu.V., Babayants P.S., Glinsky N.A. et al. Methodology recommendations for the multi-method aero geophysical surveying. St.Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2021, p. 50 (in Russian).