

УДК 550.838.3

С.В. Черкасов¹, Б.В. Стерлигов², Л.А. Золотая³

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АНОМАЛИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ⁴

Выполнен краткий обзор истории развития отечественной аэромагниторазведки, показано, что работы по созданию аэромагнитных комплексов на основе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) востребованы в настоящее время. Приведены теоретические и опытно-экспериментальные данные по разработке оптимальной конфигурации БЛА с целью установки на них квантового аэромагнитометра нового поколения (с использованием рубидиевого датчика с оптической накачкой). Разрабатываемый беспилотный аэромагнитный комплекс (БАМК) планируется использовать для производства высокоточных аэромагнитных съемок на небольшой высоте (от 30 м) для решения геологических, инженерных и экологических задач.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, беспилотный летательный аппарат, аэромагнитометр, аэромагнитная съемка.

The article presents a review of Russian airborne geomagnetic evolution and shows that nowadays the creation of airborne geomagnetic complexes based on air drones (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) is much in demand. The theoretical and research data on the development on UAV optimal configuration to place a new-generation quantum aeromagnetometer (using a rubidium sensor with optical injection) on the UAV are shown. The authors have developed an unmanned aeromagnetometer complex (UAC) to use in high-quality aeromagnetometric surveys at low altitudes (from 30 m) for geological, engineering, and ecological goals.

Key words: magnetic field, an unmanned aerial vehicle, magnetometer, aeromagnetometric survey.

Введение. Измерения аномального магнитного поля Земли представляют собой основу для построения структурно-тектонических карт, используемых как при геологическом картировании, так и при поисках месторождений полезных ископаемых. Использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в качестве носителя для проведения высокоточной аэромагнитной съемки требует решения задач минимизации девиационной погрешности, связанной с влиянием магнитных элементов БЛА на датчики магнитного поля. Современные БЛА представлены широким спектром летательных аппаратов, различающихся по массе и полезной нагрузке, скорости, продолжительности автономного полета, способам запуска и посадки. Рассмотрим оптимальные выбор БЛА и компоновку беспилотного аэромагнитного комплекса (БАМК) на основе измерений собственного магнитного поля БЛА и аэродинамического моделирования.

Радикальные изменения в методике и технологии магнитных съемок связаны с переходом от

точечных измерений к непрерывным, осуществляемым на базе мобильных, прежде всего аэромагнитных систем наблюдений. В нашей стране первые опыты с индукционным Z-магнитометром, установленным на самолете, были выполнены А.А. Логачевым и А.Т. Майбородой в 1936 г. на маршруте Новгород–Валдай [Гордин, 2004]. Развитию отечественной аэрогеофизики способствовали успешные достижения в самолетостроении. К концу 1970-х гг. практически вся территория страны была покрыта Государственной аэромагнитной съемкой масштаба 1:200 000, позволяющей выявлять магнитные аномалии с амплитудой ≥ 100 нТл. Аэромагнитные исследования проводятся на пилотируемой основе с самолетов Ан-26, Ан-3 и вертолетов Ми-8. Современные технические и методические решения, применяемые при проведении аэромагнитной съемки с использованием в качестве носителя пилотируемых летательных аппаратов, обеспечивают погрешность съемки в пределах 1,5–2 нТл при высоте полета 250–300 м.

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный геологический музей имени В.И. Вернадского Российской академии наук, зам. директора; *e-mail:* s.cherkasov@sgm.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, зав. отделением; *e-mail:* b.sterligov@sgm.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизики, доцент; *e-mail:* zolotaya@eag.ru

⁴ Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение о предоставлении субсидии от 16.10.2014 № 14.607.21.0081, #RFMEFI60714X0081).

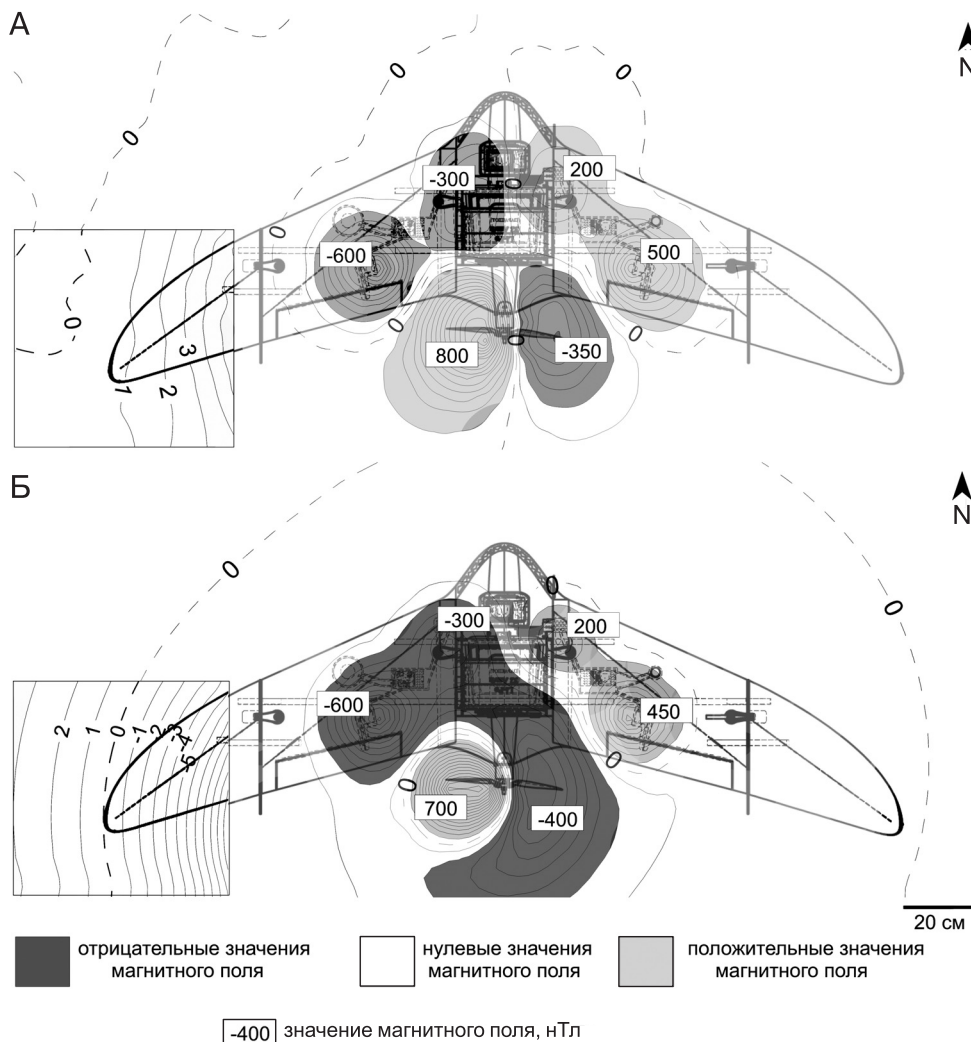


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и модельных данных (сечение изолиний 50 нТл, на врезках — 1 нТл): А — аномальное магнитное поле от БЛА «Геоскан-201»; Б — магнитное поле от модели (аппроксимация магнитных элементов диполями)

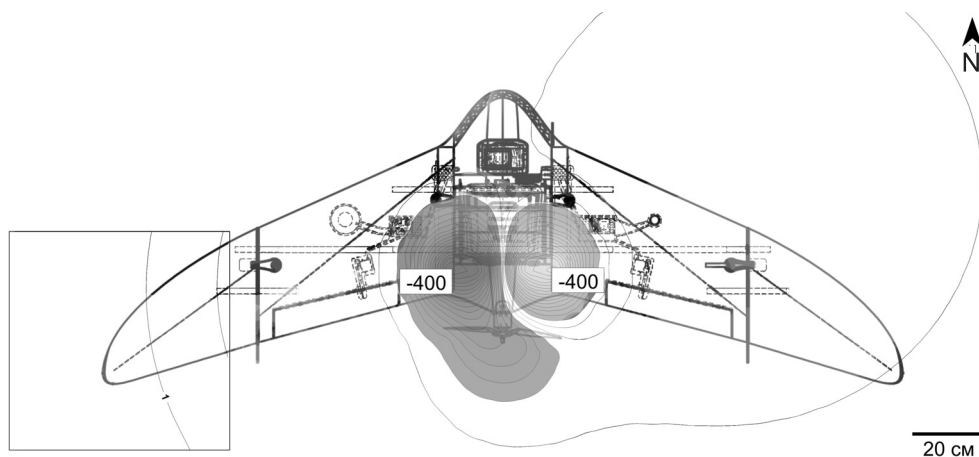
Целесообразность применения БЛА определяется возможностью достижения сопоставимых параметров съемки при улучшении экономических характеристик полевых работ за счет сокращения логистических затрат на их проведение. Это связано с тем, что при увеличении взлетной массы БЛА увеличивается сложность его разработки и, соответственно, стоимость, но снижаются надежность и безопасность эксплуатации [Иноземцев, 2013]. При использовании БЛА легкого класса такое сокращение обеспечивается тем, что взлет и посадка БЛА осуществляются без использования аэродромной инфраструктуры, существенно снижается энергопотребление носителя. При этом основными проблемами, требующими решения, становятся требования к магнитным датчикам и минимизация девиационных помех [Коротков, 2014]. Требования к датчикам связаны со скоростью движения БЛА (частота измерений при скорости 60 км/ч должна быть ≥ 10 Гц, что обеспечивает производство измерений через каждые 2 м) и с ограничениями по полезной нагрузке. Для БЛА легкого класса малого радиуса действия (10–120 км) [Иноземцев, 2013] общая масса полезной нагрузки не должна превышать 2 кг, что накладывает дополнительные

требования к бортовому аэромагнитометру. Разработан новый аэромагнитометр, где в качестве магнитометрического датчика использован рубидиевый датчик с оптической накачкой.

Материалы и методы исследований. Задачу минимизации девиационных помех можно решать только применительно к конкретному классу БЛА. Выбор БЛА легкого класса осуществлен исходя из возможности транспортировки БЛА в пешем порядке и запуска с ограниченной (50 м) площадки бригадой из двух человек. Для экспериментальных исследований и дальнейшей модификации использован БЛА серии «Геоскан», характеризующийся взлетной массой 5 кг и массой полезной нагрузки до 1,5 кг. Минимизация девиационных помех осуществляется как путем модификации БЛА, так и за счет оптимального расположения магнитометрических датчиков.

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования магнитного поля с помощью БЛА «Геоскан-201» проводились квантовым магнитометром «Geometrics G-858» с магнитовариационной станцией на базе ММПОС-1 по сети 10×10 см на немагнитном поворотном стенде с жестко закрепленным БЛА. В результате измерений (рис. 1,

Рис. 2. Математическое моделирование аномального магнитного поля модифицированного БЛА. Условные обозначения см. на рис. 1



А) фиксируются аномалии магнитного поля напряженностью от -700 до $+350$ нТл, вызванные влиянием электродвигателя в хвостовой части БЛА, и аномалии несколько меньшей интенсивности, связанные с сервоприводами, расположенными в центральной части крыльев, а также магнитными компонентами БЛА, находящимися в передней части фюзеляжа. Для изучения влияния магнитного поля силовой системы (двигателя) в ходе полета на результаты измерений сравнивали уровень шумов на записях магнитного поля при разных режимах работы двигателя. Результаты измерений показывают скачкообразные изменения уровня магнитного поля при переходе от одного режима к другому и значительное изменение уровня записи при возвращении к фоновому режиму. Изменения уровня записи обусловлены разным положением подвижных железных составляющих самого самолета относительно друг друга и датчиков до и после работы двигателя и элеронов (смена полярности).

Поскольку при проведении магнитной съемки один из важнейших параметров, влияющих на погрешность съемки, — точность привязки измерений, магнитный датчик должен быть жестко закреплен на БЛА. На рис. 1, А видно, что с точки зрения влияния магнитных компонентов БЛА на показания датчика оптимально его расположение в концевой части крыла, где даже для серийного БЛА градиент магнитного поля не превышает $3-4$ нТл/м.

Для оптимизации компоновки БЛА выполнено моделирование магнитного поля БЛА с имитацией источников магнитными диполями [Roу, 1977]. Методом подбора определены расположение и магнитные характеристики 5 магнитных диполей (электродвигатель заменен диполем на глубине 20 см, намагниченность $1,5$ А/м, угол вектора намагниченности 50° , магнитный момент $0,05$ А·см²; сервоприводы — диполи на глубине 15 см, намагниченность 1 А/м, угол вектора намагниченности 90° , магнитный момент $0,042$ А·см²; металлические детали в носовой части БЛА — диполи на глубине

15 см с намагниченностью $0,5$ А/м, углом вектора намагниченности 90° и магнитным моментом $0,021$ А·см²), магнитное поле которых наилучшим образом аппроксимирует экспериментальные данные (рис. 1, Б). Схожие исследования по разработке компоновки БЛА предполагали изучение магнитных полей отдельных узлов БЛА для взаимной компенсации создаваемого магнитного поля [Forrester, 2011].

При моделировании оптимальной компоновки БЛА электрический двигатель с постоянными магнитами заменяется на практически немагнитный (из стали выполнены коленчатый вал, подшипники и поршневой палец) компрессионный двигатель внутреннего сгорания, а сервоприводы элеронов, с учетом расположения магнитного датчика в концевой части крыла, смещаются в фюзеляж БЛА; металлические детали в передней части фюзеляжа заменяются на немагнитные. Градиент магнитного поля на конце крыла при предложенной компоновке БЛА не превышает 1 нТл/м (рис. 2). Аэродинамическое моделирование подтверждает возможность такого расположения датчика.

Исследования доказывают возможность использования легких беспилотных летательных аппаратов для производства высокоточных измерений аномалий магнитного поля Земли. Минимизация девиационных помех осуществляется за счет расположения магнитного датчика в концевой части крыла, замены электродвигателя на компрессионный ДВС и выноса магнитных элементов из крыльев в фюзеляжную часть БЛА.

Заключение. На основе БЛА разработан беспилотный комплекс дистанционного мониторинга природных и техногенных сред (БКДМ), где с помощью комплексирования оптической мультиспектральной и магнитометрической съемки получают информацию о спектрах излучения, являющихся индикаторами вещественного состава объектов земной поверхности, а также о магнитном поле разноглубинных объектов. Продолжительность полета БЛА не менее 5 ч, дальность полета 70 км, высота полета $20-50$ м. Итоговая

погрешность измерений БКДМ магнитного поля составляет ± 2 нТл, разрешение мультиспектральных снимков не менее 10 см/пиксел, что позволяет решать задачи тектонического и геологического

районирования для съемок в масштабе 1:50 000 и крупнее, фиксировать аномалии магнитного поля амплитудой от 20 нТл и выявлять техногенные объекты с линейными размерами 10 м и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. М.: ИФЗ РАН, 2004. 162 с.

Иноземцев Д.П. Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Ч. 1. Обзор летательных средств // АТИП. 2013. № 2. С. 49.

Коротков В.В., Глинский Н.А., Кирсанов В.Н. и др. Съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов — новый этап развития отечественной

аэрогеофизики // Российский геофиз. журнал. 2014. № 53–54. С. 122–126.

Forrester R.W. Magnetic signature control strategies for an unmanned aircraft system. Canada, Carleton University, 2011. 235 p.

Tomas N.R. Spacecraft magnetic field modeling. Magnetics, IEEE Transactions. 1977. Vol. 13. Iss. 1. P. 914–919.

Поступила в редакцию
10.11.2015