УДК 550.838.4

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СЪЁМКИ С ЛЁГКИМ БПЛА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ**

В.Н. Глазнев1, В.Е. Семенов1, В.С. Стариков2

1 Воронежский государственный университет (Воронеж), Россия

2 АО Предприятие подводно–технических работ «Пётр» (Воронеж), Россия

glaznev@geol.vsu.ru, [vlsemenov20002@yandex.ru](mailto:vlsemenov20002@yandex.ru),

**Аннотация**. Предложена имитационная модель магнитной съёмки с лёгким БПЛА, при решении задач инженерной геофизики. Рассмотрена простейшая модель приземного турбулентного ветрового воздействия на пространственное положение трассы движения лёгкого БПЛА и характер вариаций наблюдаемого магнитного поля, получаемого в рамках такой съёмки. Моделирование материалов съёмки позволяет оценить роль ветрового воздействия при производстве реальных наблюдений магнитного поля над инженерными коммуникациями.

**Ключевые слова**: БПЛА, ветровое воздействие, магниторазведка, инженерные объекты.

Методы инженерной геофизики является современным инструментом обнаружения и пространственной локализации скрытых подземных сооружений и различного рода инженерных коммуникаций [1, 2]. Геофизические методы широко применяются при изучении реального положения и контроле технического состояния различного рода магистральных трубопроводных систем, используемых в нефтегазовом комплексе [3-6]. При решении таких задач, как правило, используются методы георадиолокации, различных модификаций электроразведки и магниторазведки. Из них магниторазведка является самым эффективным с точки зрения исследуемых площадей и затрачиваемых на это времени и финансовых средств, что стало ещё более очевидно при внедрении съёмки БПЛА, затраты на которую существенно ниже, чем на наземную съёмку [7].

Отметим, что пространственная разрешающая способность магнитной съёмки с БПЛА ниже, чем у других геофизических методов, использующих строго фиксированное положение датчиков полей, поскольку на практике летательный аппарат - носитель магнитометра, подвержен сложному ветровому воздействию в приземном слое воздуха. Существуют разные типы БПЛА [8], каждый из которых имеет различную устойчивость к ветровой нагрузке. При решении задач поиска и локализации инженерных объектов методами магниторазведки как правило используются лёгкие БПЛА вертолётного типа с массой 5-10 кг и рабочей скоростью движения 4-12 м/с. Высота полёта аппарата при производстве магнитной съёмки обусловлена требованиями гарантированной пространственной локализации искомого объекта [9], в нашем случае намагниченной трубы, залегающей на глубинах в несколько метров. Именно специфика такой магнитной съёмки с лёгким БПЛА, в условиях значимого воздействия турбулентного воздушного потока в пограничном слое вблизи поверхности Земли [10], и является объектом нашего исследования.

Для моделирования ветровой нагрузки на траекторию движения лёгкого БПЛА была составлена программа в системе компьютерной математики MathCad14 [11], в которой характеристики турбулентности приземного ветрового потока, согласно данным аэрометеорологических исследований, определяются законом распределения Вейбулла-Гудрича [12]. В процессе проведения магнитной съёмки на летательный аппарат воздействует также и ламинарная компонента движения воздушного потока [13]. В программе рассчитываются координаты движения летательного аппарата при заданных характеристиках случайной и постоянной компоненты ветрового потока и заданной скорости движения собственно БПЛА.

В качестве простейшего модельного тела, создающего аномальное магнитное поле, принимался бесконечный тонкий горизонтальный цилиндр, который в первом приближении аппроксимирует модель трубопровода [14, 15]. Глубина положения центра источника поля является задаваемым параметром модельного объекта. Магнитный момент аналитического источника модельного поля отвечает геометрическим характеристикам стальных труб, диаметров от 426мм до 1420мм [16], и определённой нами ранее [17], типичной величине намагниченности таких изделий.

Специфика полевой магнитной съёмки с использованием лёгких БПЛА заключается также в различиях временной дискретизации датчика GPS (стандартный протокол NMEA) и частоты опроса используемого датчика квантового или феррозондового магнитометра, составляющей 1 КГц [18]. Этот аспект практических полевых наблюдений также учитывается в предложенной имитационной модели магнитной съёмки на основе использования линейной интерполяции данных измерений поля между двумя точками с известными по GPS пространственными координатами.

Моделирование результатов измерений магнитного поля, обусловленного нашей аналитической аппроксимационной моделью источника поля, выполнялись при различных скоростях полёта БПЛА, соответствующих требованиям технической инструкции магнитной съёмки с такими аппаратами. Скорость ламинарного ветрового потока и статистические характеристики турбулентного приземного ветрового потока, воздействующие на летательный аппарат, являются задаваемыми параметрами моделирования. Средняя высота полёта БПЛА относительно горизонтального рельефа местности также является параметром моделирования.

Пример результатов имитационного моделирования магнитной съёмки показан на рис. 1. Параметры моделирования: скорость движения БПЛА при неподвижном воздушном потоке - 4 м/с, скорость ламинарного ветрового потока – 1 м/с. Безразмерные параметры формы распределения Вейбула для турбулентного приземного потока воздуха по координата X,Y,Z составляют соответственно 8, 2, 2. Масштабные коэффициенты скоростей турбулентного приземного потока воздуха по всем координата приняты равными 5 м/с. Последние параметры взяты для реальных условий относительно слабо расчленённой дневной поверхности Русской платформы при наличии растительного покрова [12, 19]. Вычисления выполнялись при высоте полёта БПЛА над поверхностью Земли равной 5 м.

|  |
| --- |
|  |
| Рис**.** 1. Карта модуля вектора индукции магнитного поля: (а) - в условиях ветрового воздействия на аппарат; (б) - теоретическая модель поля от объекта. Показаны трассы движения БПЛА.  Положение намагниченного объекта (трубопровода) соответствует координате Х=20 м. |

Как можно видеть на рисунке 1-а, влияние ветрового воздействия проявляется в первую очередь в отклонениях летательного аппарата по оси Z, что создаётся ряд аномалий, существенно отличающихся по амплитуде от теоретической модели поля при отсутствии ветрового воздействия (рис. 1-б). Может сложиться впечатление, что данные аномалии не несут в себе больших помех при определении местоположения искомого объекта, так как из-за большей контрастности поля, можно легко выделить аномалию, создаваемую модельным объектом, и определить, где находится ось трубопровода. Однако поле реальной трубопроводной системы, составленной из отдельных звеньев разнородно намагниченных труб, характеризуется наличием т.н. «чёточных» аномалий магнитного поля, которые представляют последовательность вытянутых вдоль трассы трубопровода локальных экстремумов поля. Природа таких типичных аномалий объясняется авторами [20], как результат векторного сложения полей отдельных труб, составляющих трубопровод, и обладающих случайными противоположно направленными векторами остаточного намагничения элементов труб [17]. В силу этого обстоятельства суперпозиция факторов приземного турбулентного ветрового воздействия на летательный аппарат, используемый для магнитной съёмки, и наличие «чёточных» магнитных аномалии от отдельных сегментов труб, значительно затрудняет решение задачи поиска и точной локализации местоположения трубопроводной системы.

Предложенная программа имитационного моделирования результатов магнитной съёмки с лёгким БПЛА позволяет рассматривать особенности получаемых результатов наблюдений при различных параметрах собственно съёмки поля и сложного ветрового воздействия на летательный аппарат. В дальнейшем на основе этой программы будут выработаны необходимые рекомендации по применению магнитометрии для решения задач инженерной геофизики в сложных условиях полевых наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манштейн А.К. Малоглубинная геофизика. (Пособие по спецкурсу). Новосибирск: Изд. НГУ. 2002. 135 с.

2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач. М.: ГСД Продакшен. 1998. 67 с.

3. Галлямов И.И., Крылов А.А., Галлямов А.И. Опыт применения магнитной съёмки на внутрипромысловых трубопроводах как способа технического диагностирования / Тезисы докладов Всерос. научн.-техн. конф. «Современные технологии нефтегазового дела». Уфа, УГНТУ. 2007. С. 46-47.

4. Глазнев В.Н., Стариков В.С. Применение методов магнитометрической съёмки для исследования подводных переходов трубопроводов различной протяжённости в условиях мелководья / Сборник докладов 5-ой Междун. научн.–прак. конф. и выставки. «Инженерная и рудная геофизика 2009» DOI: 10.3997/2214-4609.201403827.

5. Крапивский Е.И., Некучаев В.О. Дистанционная магнитометрия газонефтепроводов. Ухта: Изд. УГТУ. 2011. 142 с.

6. Любчик А.Н. Способ дистанционного магнитометрического контроля технического состояния магистральных трубопроводов // Записки Горного института, 2012. Т. 195. С. 268-271.

7. Полетаев С. Н. Аэромагнитная съемка с БПЛА как наиболее прогрессивный метод геологоразведки / Глобальные проблемы Арктики и Антарктики : Сборник материалов Всероссийской конференции. Ред: А.О. Глико, А.А. Барях, К.В. Лобанов, И.Н. Болотов. – Архангельск: ФИЦ комплексного изучения Арктики РАН, 2020. С. 289-292.

8. Трофимова В.А. Применение беспилотных летательных аппаратов при выполнении кадастровых работ. Квалификационная работа. / СПбГУ, 2018. 104 с. [Электронный ресурс] https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/14580/1/VKR\_Trofimova\_V\_A.pdf?ysclid=lotxec4kbq606230426 (дата обращения: 05.11.2023).

9. Глазнев В.Н. Оценка границ применимости стохастических моделей потенциальных полей // Вестник ВГУ, сер. Геология. 1999, № 8. С.153-156.

10. Абрамович А.А. Прогнозирование воздушных потоков: руководство по прогнозированию метеорологических условий. Л.: Лен. типография, 1985. 301c.

11. Кирьянов Д. В. Mathcad14. СПб.: БХВ-Петербург. 2007. 704 с.

12. Рыхлов А.Б. К Вопросу об аппроксимации скоростей ветра на юго-востоке европейской территории России законом распределения Вейбулла-Гудрича // Известия Саратовского университета. 2010. Т. 10. Сер. Науки о Земле. Вып. 2. С. 31-37.

13. Наровлянский Г.Я. Авиационная климатология. Л.: Гидромет. изд-во, 1968. 268c.

14. Агиней Р.В., Мусонов В.В., Гуськов С.С. Моделирование магнитных аномалий при проведении магнитометрического контроля трубопроводов с поверхности грунта // Трубопроводный транспорт. 2013, №1. С. 40-44.

15. Загидулин Т.Р. Расчёт магнитного поля стальной трубы конечной протяжённости в постоянном однородном намагничивающем поле // Контроль и диагностика. 2014, № 6. С.15-24. DOI:10.14489/td.2014.06.

16. Сокуренко В.П., Ворона В.М., Ившин П.Н., Кузенко Н.Ф., Ганзина В.Ф. Трубы стальные электросварные прямошовные. ГОСТ 10704-91 / М.: Росстандарт. 2015.

17. Глазнев В.Н., Стариков В.С. Остаточная намагниченность и внешнее магнитное поле прямошовных стальных труб как объекта инженерных изысканий // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018, № 3. С. 83–92. DOI:10.17308/geology.2018.3/1625.

18. Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. СПб. Наука, 2002. 228 с.

19. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник СПбУ Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016, № 2. С. 7-15.

20. Стариков В.С., Глазнев В.Н. Особенности построения физико-математической модели магнитного поля стальной прямошовной трубы // Территория Нефтегаз. 2023, № 1-2. С. 12-17.

**SIMULATION MODELING OF MAGNETIC SURVEY WITH A LIGHT UAV IN SOLVING PROBLEMS OF ENGINEERING GEOPHYSICS**

V.N. Glaznev1, V.E. Semenov1,V.S. Starikov2

1 Voronezh State University (Voronezh), Russia

2 «PETER» Joint – Stock C°. Diving Services (Voronezh), Russia

**Annotation.** A simulation model of magnetic survey with a light UAV is proposed to solve the problems of engineering geophysics. The simplest model of surface turbulent wind impact on the spatial position of the light UAV trajectory and the nature of variations in the observed magnetic field obtained within the framework of such a survey are considered. Simulation of survey materials makes it possible to assess the role of wind action in the production of real observations of the magnetic field over engineering communications.

**Key words:** UAV, wind impact, magnetic exploration, engineering facilities.