

**Сопоставление результатов опытно-методических работ по магниторазведке в наземной и БПЛА технологиях**

*Е.Ю. Ермолин<sup>1</sup>, Д.А. Мелешкина<sup>1,2</sup>, И.А. Угрюмов<sup>3</sup>*

[GeophysMethod@gmail.com](mailto:GeophysMethod@gmail.com)

*1 - ООО «ДЖИ М Сервис», г. Санкт-Петербург*

*2 - Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург*

*3 – Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург*

**Аннотация**

В статье представлены результаты опытно-методических магниторазведочных работ (ОМР), проведенных осенью 2022 года на полигоне вблизи производственной базы «ДЖИ М Сервис», расположенной на севере Ленинградской области. Цель опытно-методических работ заключалась в усовершенствовании методики магнитных съемок с использованием БПЛА. В работе описаны методические особенности выполненных исследований. При выполнении съемки с использованием измерительного комплекса «GM-MAG» с применением БПЛА удалось достичь точности съемки 0.9 нТл. Высокая точность обусловлена использованием квантового датчика на парах цезия.

**Ключевые слова:** полигон для магниторазведки БПЛА, квантовый магнитометр

**Summary**

The article presents the results of magnetic surveying acquisition tests carried out in the autumn of 2021 at the test site near the base "GM Service", located in the north of the Leningrad region. The purpose of the experimental and methodological work was to improve the methodology of magnetic surveys using UAV. The paper describes the methodological features of the completed test studies. When performing a survey using the measuring complex "GM-MAG" using a UAV, it was possible to achieve an accuracy of 0.9 nT. High accuracy due to the use of a quantum sensor on cesium vapors.

**Key words:** polygon for UAV magnetic survey, quantum magnetometer.

**Введение**

Современная технология выполнения аэромагниторазведочных исследований на основе применения БПЛА коптерного типа набирает всё большую популярность в настоящее время. Данная технология имеет преимущество перед съемкой с применением пилотируемой авиации самолётного типа, т.к. БПЛА коптерного типа может выполнять съемку с детальным огибанием рельефа на малой высоте. Дополнительно БПЛА коптерного типа имеет ряд преимуществ по производительности по сравнению с наземной магнитной съемкой, в связи с чем снижается стоимость магниторазведочных работ. В угоду низкой стоимости съемки БПЛА заказчик готов заменить методику наземной съемки, которая имеет большую детальность и разрешающую способность. Для ряда задач такой подход оправдан, когда поисковый объект или его структурные признаки имеют высокоамплитудные аномалии магнитного поля. Таким образом, усовершенствование методики магнитной съемки с применением БПЛА коптерного типа является актуальным. Усовершенствование касается как измерительной части (усовершенствование имеющихся систем и создание новых систем измерения), так и методики обработки данных.

Авторы поставили перед собой ряд задач: создание измерительной системы (магнитометр + БПЛА), тестирование её на полигоне, сравнение результатов наземной магнитной съемки и съемки с применением БПЛА, определение перспектив развития измерительной системы.

## Методика

Опытно-методические работы выполнены на полигоне вблизи производственной базы компании «ДЖИ М Сервис». Данная территория привлекательна тем, что на ней присутствует несколько объектов, создающих аномалии магнитного поля. В частности, полигон граничит с памятником истории «ДОТ Карельского укрепрайона». Общий вид Долговременной огневой точки (ДОТ) показан на рисунке 1. ДОТ представляет из себя сложную железобетонную конструкцию с массивным стальным двутавром внутри. Дополнительно в качестве аномалеобразующих объектов следует отметить железобетонный столб ЛЭП и засыпанную свалку бытовых отходов. Также на полигоне присутствуют малоамплитудные аномалии различной природы (валуны гранита, металлический мусор, техногенные объекты, оставшиеся после военных действий и прочее).



*Рисунок 1. Общий вид ДОТа карельского укрепрайона, создающего наиболее амплитудную аномалию магнитного поля.*

Для того чтобы анализировать данные магнитной съёмки, полученные с использованием БПЛА, на полигоне выполнена высокоточная наземная съёмка по сети 20 метров (расстояние между профилями) на 5 метров (расстояние между пикетами). Всего на участке было выполнено 10 профилей. Азимут профилей 70 градусов. В качестве магнитовариационной станции (МВС) использовался протонный магнитометр МИНИМАГ (производство компании «ГЕОДЕВАЙС», Санкт-Петербург). В качестве рядового измерителя использовался протонный магнитометр ММРОС-1 (производство «Лаборатория Квантовой Магнитометрии», Екатеринбург). Регистрация вариаций выполнялась с частотой дискретизации 1 Гц (период 1 секунда). На каждом рядовом пикете выполнялось от 3 до 5 измерений. Значения на пикете усреднялись. Для обработки было использовано программное обеспечение GM-MAG, разработанное компанией «ДЖИ М Сервис». По результатам контрольных наблюдений СКО составило 0.6 нТл, что позволяет отнести результаты съёмки к классу высокоточных [2].

Вторым этапом проводилась магнитная съёмка с помощью БПЛА. Использовался измерительный комплекс «GM-MAG», созданный на базе беспилотного летательного аппарата коптерного типа и квантового магнитометра с магниточувствительным датчиком на парах цезия, который позволяет измерять модуль вектора индукции магнитного поля. Общий вид магниторазведочного комплекса БПЛА «GM-MAG» показан на рисунке 2. Комплекс включает:



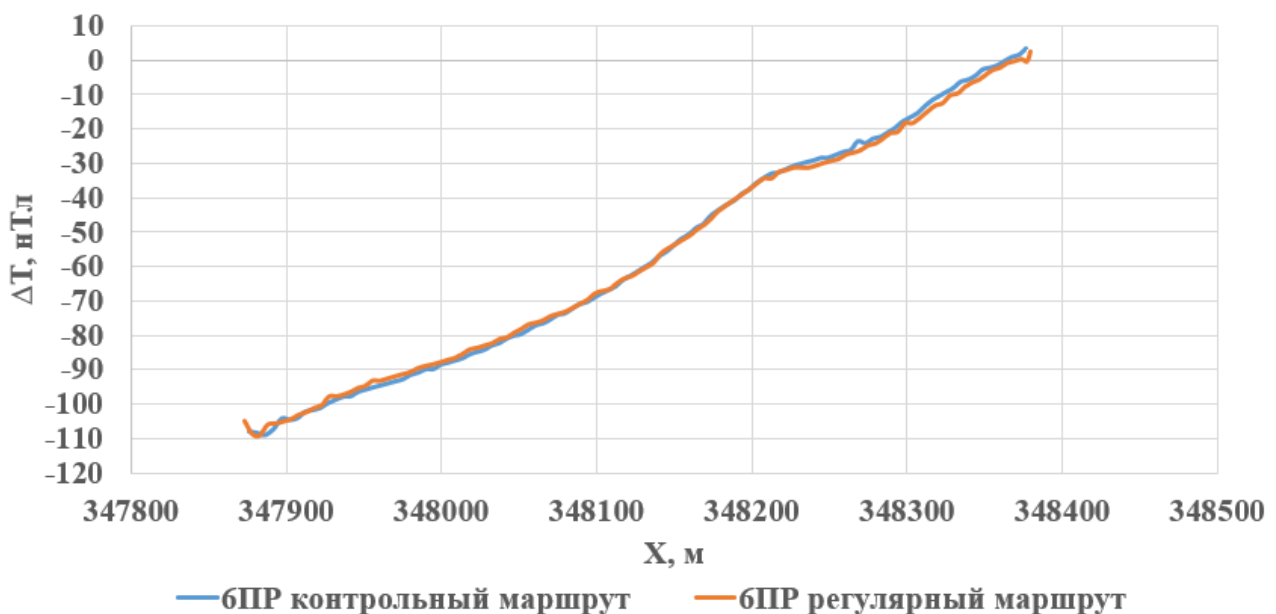
**Рисунок 2.** Аэромагнитный комплекс «GM-MAG».

- магниточувствительный блок на паре цезия с оптической накачкой;
- блок регистрации;
- система GNSS навигации;
- блок питания на литиевых аккумуляторах;
- блок для предстартовой визуализации данных, подключаемый по Wi-Fi модулю;
- жёсткую систему подвески с регулируемым расстоянием между датчиком и БПЛА;
- квадрокоптер DJI профессиональной серии Matrice (300/600/1000) RTK или любой другой БПЛА-носитель, способный поднимать более 1.8 кг (общий вес измерительной системы GM-MAG).

В качестве БПЛА для эксперимента, описанного в данной работе, использовался квадрокоптер DJI Matrice 300. Съёмка выполнялась на высоте 45 м. Опытным путём было определено, что коптер не оказывает влияния на датчик на расстоянии 5 м. Для фиксации расстояния между датчиком и блоком регистрации использовалась жесткая конструкция,

изготовленная из углепластика. Съёмка выполнена за два полёта, со скоростью 5 м/с. Следует отметить, что для данного эксперимента авторы не ставили задачи высокой производительности. Т.к. система способна регистрировать данные с частотой до 1000 Гц, то производительность съёмки ограничивается скоростью БПЛА.

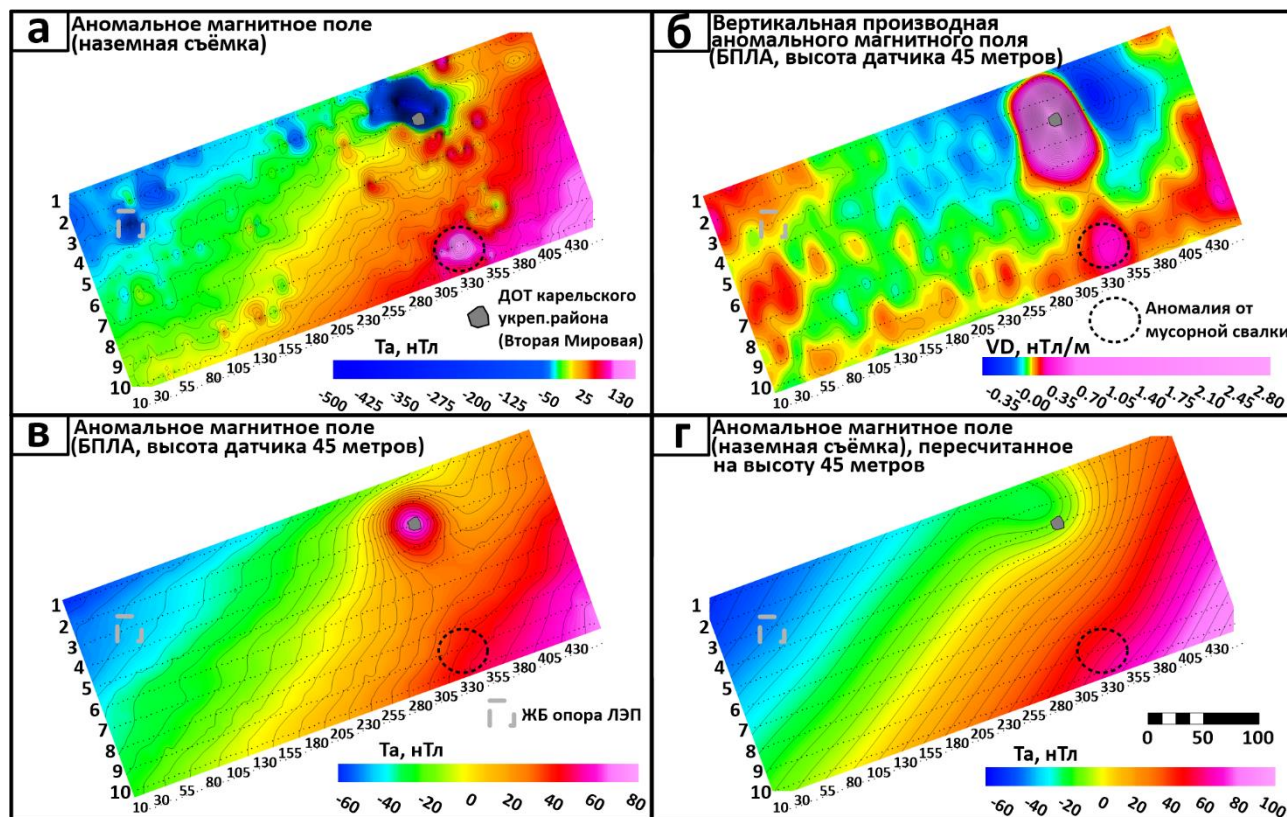
Для расчёта СКО выполнено два контрольных маршрута по 6 и 8 профилю. В результате СКО съёмки составило 0.92 нТл. На рисунке 3 представлены графики модуля вектора магнитной индукции на 6 профиле.



**Рисунок 3.** Графики  $\Delta T$  контрольного и рядового маршрута вдоль 6 профиля

## Анализ данных

В результате обработки данных наземной съёмки и съёмки БПЛА была получена карта аномального магнитного поля (рис. 4 а,б).



**Рисунок 4.** Результаты обработки данных. а – карта аномального магнитного поля (наземная съёмка), б - карта аномального магнитного поля (съёмка с применением БПЛА на высоте 45 метров), в – вертикальная производная аномального магнитного поля, полученного с использованием БПЛА, г – карта аномального магнитного поля (наземная съёмка) пересчитанная на высоту 45 метров.

При сопоставлении данных наземной съёмки и съёмки с БПЛА можно отметить более гладкий характер поля съёмки с применением беспилотника. Наземная съёмка осложнена рядом локальных аномалий шириной в первые десятки метров. Общая структура поля одинакова. Такая ситуация вполне логична т.к. наземная съёмка имеет высокую разрешающую способность и узкие аномалии в результате измерения на высоте 45 метров сглажены в отклике, полученном с использованием БПЛА. Если говорить об отражении на картах трёх наиболее контрастных объектов, то ДОТ Карельского укрепрайона ярко проявляется на обеих картах аномального магнитного поля. В то время как свалка мусора и железобетонная (ЖБ) опора линии электропередач (ЛЭП) проявляются только на результатах наземной съёмки.

Аномалия от ДОТа на карте магнитного поля, полученного с использованием БПЛА имеет изометричную форму и максимум непосредственно над ДОТом. В то время как на результатах наземной съёмки эта аномалия является биполярной и оценить положение ДОТа можно при помощи алгоритмов экспресс интерпретации Логачёва-Захарова [1].

Для качественной оценки положения локальные аномалеобразующих объектов авторы использовали трансформацию магнитного поля – вертикальную производную. Карта вертикальной производной результатов съёмки БПЛА показана на рисунке 4в. На этой карте мы можем определить положение ещё одного аномалеобразующего объекта, ярко проявляющегося в результатах наземной съёмки – присыпанной мусорной свалки. Тем не менее аномалию от ЖБ опоры ЛЭП выявить по результатам съёмки БПЛА не удаётся. Таким образом, выбирая методику съёмки БПЛА приходится в угоду производительности работ

отказываться от детальности и разрешающей способности, которые достигаются при выполнении наземной магнитной съёмки.

Следует напомнить, что мы всегда можем рассчитать поле на уровень полёта квадрокоптера с использованием алгоритмов пересчёта потенциальных полей в верхнее полупространство [3]. Эта процедура однозначна и наряду с другими методиками регулярно применяется при анализе данных потенциальных полей для расчёта региональной составляющей и подавления помех от приповерхностных локальных аномалий. Авторы применили процедуру пересчёта результатов наземной магнитной съёмки на высоту полёта квадрокоптера (45 метров). Результат показан на рисунке 4г. Можно увидеть, что пересчет наземной съёмки в верхнее полупространство в целом подобен результату съёмки с использованием БПЛА, однако аномалия от ДОТа практически исчезает с карты. Такую ситуацию можно объяснить тем, что алгоритмы пересчета не всегда корректно работают с модулем вектора магнитной индукции. На участках, где модуль вектора магнитной индукции близок к вертикальной компоненте поля  $Z$  пересчет более корректен. В случае аномалии от ДОТа, пересчет оказывается некорректным, т.к. поле резко неоднородно и направление вектора магнитной индукции сильно отклоняется от вертикали. В этом случае целесообразно использование векторного (трёхкомпонентного) магнитометра.

### **Выводы**

Выполненные опытно методические работы позволяют сделать следующие выводы:

Использование квантового датчика на парах цезия в составе измерительного комплекса «GM-MAG» позволяет проводить высокоточные магнитные съёмки с применением БПЛА достигая погрешности ниже 1 нТл.

Выбирая производительность методики БПЛА приходится отказываться от высокой разрешающей способности, которую можно достичь с применением наземной магнитной съёмки.

Полигон для испытаний геофизической аппаратуры вблизи производственной базы «ДЖИ М Сервис» является весьма удачным местом для испытания методик магнитной съёмки с использованием БПЛА. На полигоне отмечается несколько ярких аномалий магнитного поля и общий горизонтальный градиент аномального магнитного поля составляет 150 нТл на 400 метров.

Обнаружено, что аномалия от ДОТа карельского укрепрайона имеет уникальную структуру поля. Пересчёт поля в верхнее полупространство не позволил получить аномалию, аналогичную измеренной на высоте 45 метров. Высказано предположение, что алгоритм пересчёта поля вверх плохо работает с параметром  $\Delta T$  и для более правильного пересчёта необходимо измерять полный вектор с использованием 3-х компонентной системы измерений.

### **Список литературы**

1. Захаров В.П., Логачев А.А. Магниторазведка // Недра, Ленинград, 1979 г., 351 с.
2. Инструкция по магниторазведке/ Мин-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1981.
3. Мартышко П.С., Ладовский И.В., Федорова Н.В., Бызов Д.Д., Цидаев А.Г. Теория и методы комплексной интерпретации геофизических данных. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – 94 с