

Th P 08

Low-Altitude Aeromagnetic Survey: Drones and High Frequency Magnetometers. Experiences and Perspectives

M.I. Epov (IPGG SB RAS), A.P. Firsov* (IPGG SB RAS), I.N. Zligostev (IPGG SB RAS), A.V. Savluk (IPGG SB RAS), A.Y. Bondarenko (IPGG SB RAS), P.A. Weisman (IPGG SB RAS), A.S. Kolesov (IPGG SB RAS) & A.S. Sheremet (IPGG SB RAS)

SUMMARY

Growth of the mineral resource base requires geological and geophysical studies in difficult-access conditions. Airborne geophysical survey is usually carried out during small-scale works. Large-scale surveys are conducted on foot. Most of Russia's territory is characterized by harsh conditions for such magnetic surveys - which is one of the main tools of geological and geophysical study of the territory. That is differentiated relief, boreal forests with thick undergrowth, stone runs, marshy tundra and so on. This increases the cost of the work. The use of large-scale airborne geophysical surveys is almost impossible for several reasons. Very high cost of using the carrier use (helicopters and planes). Detailed work requires a very low areal speed — below 10 m/s, and the high frequency of the magnetometer, above 100 Hz, which in turn dramatically reduces the accuracy of the survey. We propose to designate a special kind of low-altitude surveying at extremely low altitudes using a high-frequency magnetometer. Designed specifically for this type of surveys, our magnetometer complex has a frequency greater than 1.5 kHz, and the accuracy of the measurement system of the entire field is not less than 1 nT. The surveying complex is designed on base of light and ultralight drones. Experimental work on various objects (from archaeological to geological: burial mounds, skarn deposits, kimberlite pipes, geological mapping of volcanic and sedimentary rocks, etc.) has shown high efficiency of this survey type. High performance and low cost combined with the level of details in results, comparable to surveying on foot at high altitude flights, and exceeding it at low altitudes

Введение

Повышение ресурсной базы полезных ископаемых требует проведение более детального геологического исследования плохо изученных территорий в труднодоступных местностях, в тяжелых климатических условиях. Традиционные аэрогеофизические исследования, выполняемые с помощью пилотируемых летательных аппаратов, позволяют локализовать площади для последующего детального геологического изучения. Стоимость выполнения таких работ растёт в регионах с редкой сетью аэродромов. Использование аэрогеофизических методов становится недоступным на стадии крупномасштабных поисков. Большое количество уже открытых аномалий требует их заверки: оконтуривания тел, изучение их морфологии. В этом случае заменить наземную съемку ничем, несмотря на высокую стоимость работ. Выполнение наземных работ невозможно на особо охраняемых территориях. Совершенно очевидно, что возникла потребность новой технологии в этой области, которая могла бы совместить возможности аэрометодов и детальность наземных.

Очевидно напрашивается применение в таких случаях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Чтобы избежать потребности в аэродромной инфраструктуре — это должны быть БПЛА легкого класса. Если рассматривать магнитометрическую съёмку с помощью БПЛА как альтернативу пешеходной съёмке, то необходимо проводить её на предельно допустимой высоте, которая зависит от расчленённости рельефа высоты деревьев, ЛЭП, буровых вышек и т.д. С увеличением высоты полета падает величина вектора магнитной индукции. Для тел разной морфологии эта зависимость может быть от линейной до кубической. Увеличение высоты полёта за счет суперпозиции полей от разных источников приводит к их наложению и, соответственно, ухудшению пространственного разрешения аномального поля. Для поддержания возможности пространственного разрешения сравнимой с наземной съёмкой, частота определения поля должна быть выше. При детальной наземной съёмке точки измерения магнитного поля расположены по профилю на расстоянии от 1 м до 20 м для разных масштабов. При скорости полёта 10 м/сек это требует частоты измерения как минимум 10 Гц. С учётом всех вышеперечисленных параметров желательна минимальная частота измерения магнитного поля в 100 Гц и суммарная точность измерения в пределах 1 нТл. С учётом того, что точность измерения магнитного поля квантовыми магнитометрами зависит от корня квадратного от частоты измерения, то современные магнитометры для этих целей не подходят. Точность в первые десятки пкТл достигается при частоте измерения ниже 10 Гц.

Метод и/или Теория

В 2014 году в ИНГГ СО РАН разработан аэрогеофизический комплекс с высокочастотным магнитометрическим каналом (ВМК). Измеритель индукции магнитного поля Земли выполнен на базе магнитомодуляционного преобразователя с полосой пропускания 3 кГц. Общий уровень магнитных помех ВМК при работе в составе комплекса не превышает 1 нТл. Уровень магнитных шумов измерительной части в условиях естественного магнитного поля Земли вдали от промышленных объектов не превышает 0,2 нТл. Частота измерений созданного ВМК — 1,5 кГц. Возможная точность измерения магнитного поля ниже, чем у лучших серийных образцов. При частоте 100 Гц точности становятся сравнимы. На большие частоты современные магнитометры не рассчитаны.

Для наглядного объяснения преимущества измерений с высокой пространственной плотностью предлагается простая модель (рис.1). Предположим, что есть магнитное поле, которое будет измеряться абсолютно точным магнитометром с шагом 5 м и магнитометром, имеющим некоторую ошибку, но с шагом в 20 раз меньше.

Видно, что проведение измерений с меньшим шагом более достоверно описывают структуру реального магнитного поля. При ширине магнитных аномалий, сравнимых с шагом на профиле, невозможно каждый раз попадать на точку перегиба значения магнитного поля, что

сдвигает измеренный экстремум относительно его реального положения и уменьшает его амплитуду.

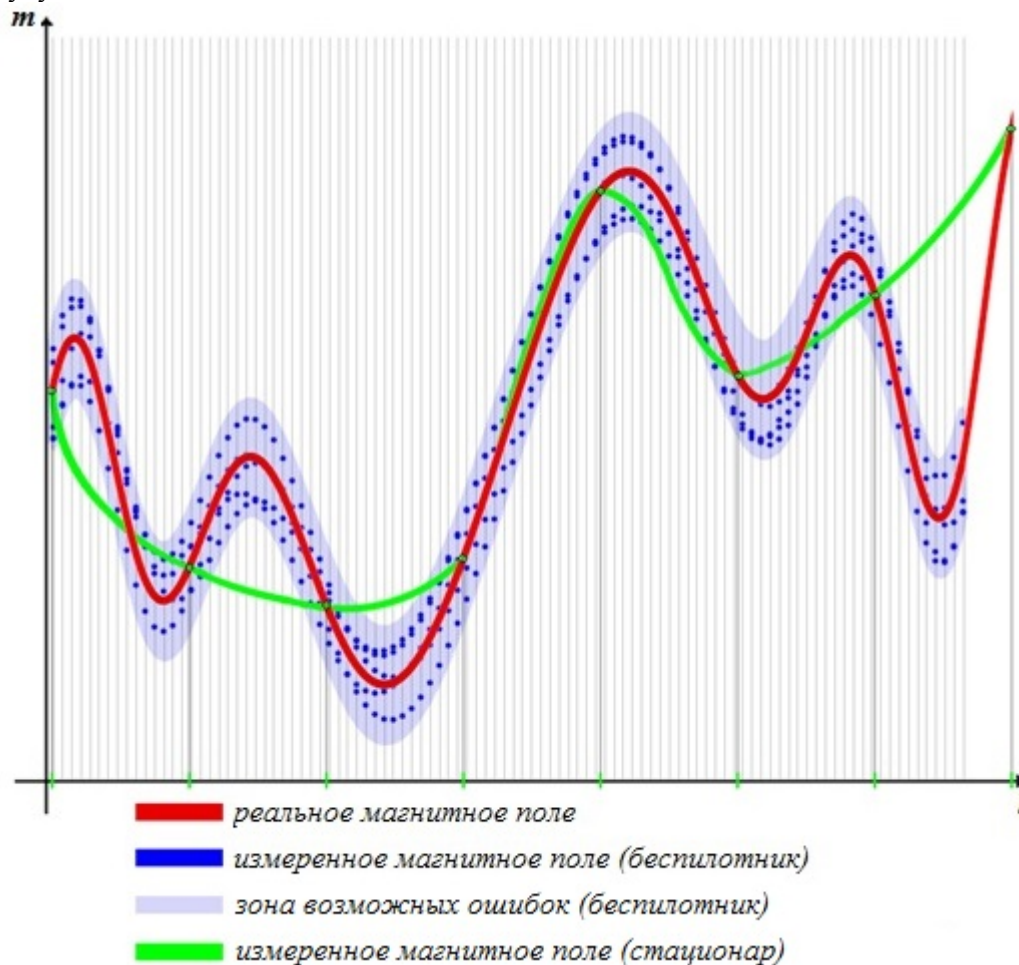


Рисунок 1 Модель магнитного поля.

В течении 2014–2015 годов нами проводились опытные работы на различных объектах в различных условиях.

Исследования на археологическом кургане в Венгеровском районе Новосибирской области проводились в условиях плоского нерасчлененного рельефа с большим количеством водных преград (озер, болот) на предельно малых высотах около 0.5 м. Все найденные аномалии подтверждены стандартной съёмкой с помощью современных магнитометров. Выявленные аномалии оказались меньшего размера и большей амплитуды, чем при наземной съёмке [Эпов М., Фирсов А, и др. (2015) Тезисы международного симпозиума «Мультидисциплинарные методы в археологии: новейшие итоги и перспективы»].

В Хакасии были исследованы различные геологические объекты [Эпов М., Фирсов А. и др. (2015) Тезисы международного симпозиума «WMESS»]. Наиболее ярким примером является Ербинский некр. Магнитное поле снималось на высоте ~0.5 м, и протонным магнитометром на ~1.5 м. Данные по магнитному полю, полученные с помощью ВМК, в целом совпадают с данными наземной съёмки, полученной с помощью протонных или квантовых магнитометров. Сравнение данных по совпадающим профилям на разных участках показало, что данные по магнитному полю, полученные с помощью ВМК, часто имеют существенно более сложную структуру: больше экстремумов с большей амплитудой. Данные по одному из профилей приведены на рис.2. Видно, что аномальное поле, определенное с помощью высокочастотного магнитометра больше, а ширина аномалий меньше.

При усреднении данных высокочастотного магнитометра в 128 раз, приводящее к расширению ширины аномалий и снижению их амплитуды, график аномального поля начинает совпадать с графиком аномального поля, полученного протонным магнитометром. Экстремумы графиков все же продолжают незначительно не совпадать по амплитуде и по месту положения (рис.3).

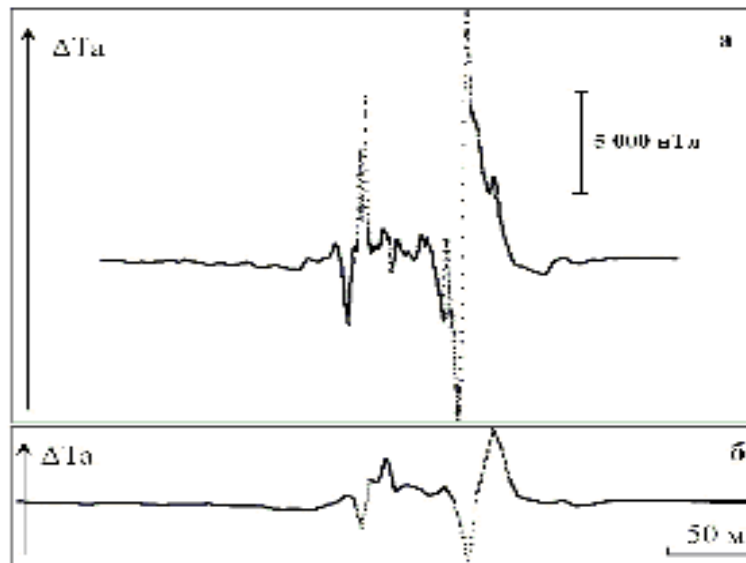


Рисунок 2 Аномальное магнитное поле ΔT_a вдоль магистрали, измеренное высокочастотным магнитометром (а) и протонным магнитометром ММРОС-1 (б).

Такое сравнение позволяет утверждать, что аномалии, найденные с помощью ВМК отражают поля реально существующих объектов и не являются артефактом. Таким образом, на фоне общего повышенного магнитного поля выделяются очень узкие, шириной около 1 м, линейные структуры. Это позволяет создать более сложную геологическую модель объекта.

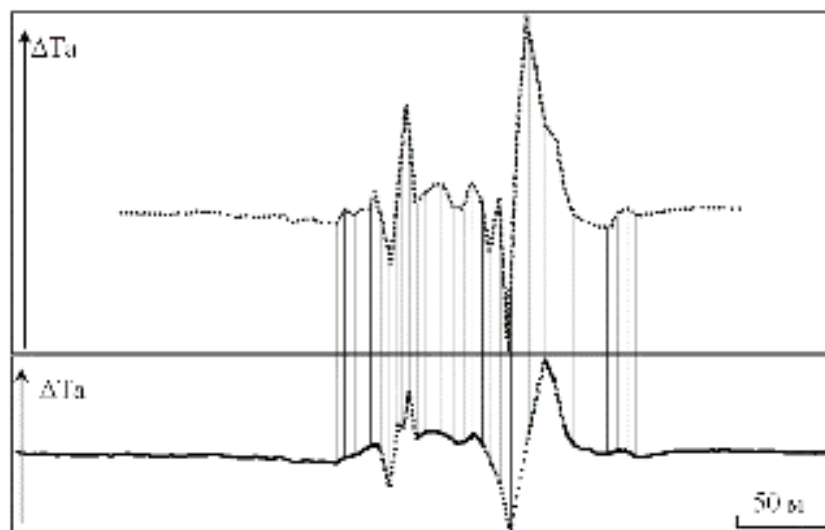


Рисунок 3 Сравнение усредненных результатов магнитной съёмки, полученных с помощью высокочастотного магнитометра (а), и протонного магнитометра ММРОС-1 (б).

В 2015 году по заданию ПАО «АЛРОСА» была проведена низковысотная магнитометрическая съёмка полигона с трубкой взрыва. Работы проводились в тяжелых труднопроходимых таежных условиях. Съёмка с помощью БПЛА проводилась на высоте около 40 м на скорости 15 м/сек. Сравнение полученных в ходе работ карты аномального магнитного поля с данными наземной магнитной съёмки показало их прекрасную сходимость (рис.4).

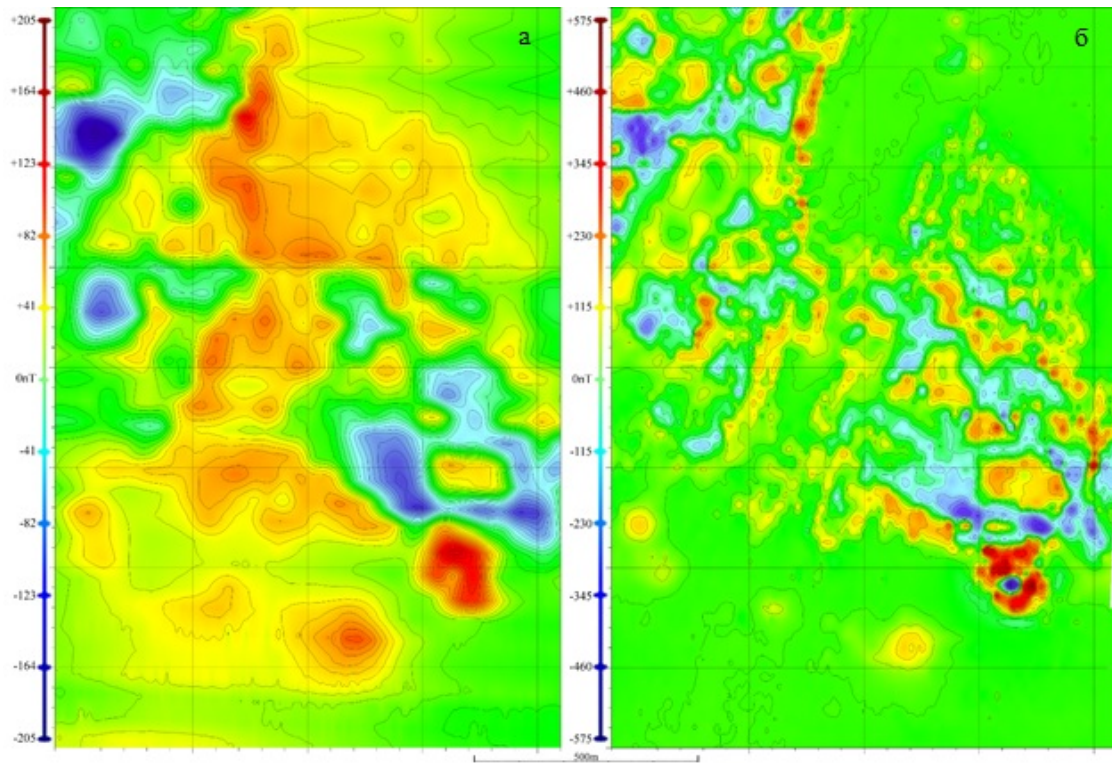


Рисунок 4 Карта аномального поля: ВМК на БПЛА (а); стандартная наземная съемка (б).

Выводы

Возможность проведения магнитометрической съёмки на разных высотах, а также с помощью созданного градиентометра, позволяет создавать сложные геолого-геофизические модели исследуемых объектов.

Возможность получения при аэрогеофизических работах данных сравнимых по детальности и точности с наземной съёмкой при применении высокочастотных магнитометров на низколетящих БПЛА позволяют выделить низковысотную магнитометрическую съёмку в отдельную разновидность геофизических работ, сочетающую в себе преимущества как аэро-, так и наземной магнитометрической съёмки.

Практическое применение низковысотной магнитометрии показало её существенно большую производительность и экономичность по сравнению со стандартными методами магнитометрической съёмки. Применение её возможно и в смежных отраслях, где есть потребность точного крупномасштабного картирования магнитного поля. Отсутствие требований к инфраструктуре, возможность проведения съёмки в труднопроходимых условиях (тайга с густым подлеском, курумы, плотные заросли кустарников, расчлененный рельеф) или непроходимых условиях (болота, озера, реки) позволяет использовать комплекс в различных условиях и для решения широкого круга задач.

Список литературы

Эпов, М.И., Фирсов, А.П., Злыгостев, И.Н., Дядьков, П.Г., Савлук, А.В., Вайсман, П.А., Колесов, А.С., Кулешов, Д.А., Шеремет, А.С., Цибизов, Л.В. [2015] Магнитометрический комплекс на легких БПЛА для археологических исследований. *ИИиЭ СО РАН*, тезисы.

Эпов, М.И., Фирсов, А.П., Злыгостев, И.Н., Савлук, А.В., Вайсман, П.А. [2015] Application of innovative high-frequency magnetometric probe (HFMP) on light UAVs in geology, archeology and related fields. *WMESS 2015*, тезисы.