

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МАГНИТОМЕТРА ДЛЯ ЛЁГКИХ БПЛА ПРИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОМ ИЗУЧЕНИИ ТРУБОК ВЗРЫВА**

### ***Андрей Петрович Фирсов***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, тел. (383)330-07-81, e-mail: FirsovAP@ipgg.sbras.ru

### ***Игорь Николаевич Злыгостев***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-12, e-mail: ZligostevIN@ipgg.sbras.ru

### ***Петр Георгиевич Дядьков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

### ***Андрей Васильевич Савлук***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)333-30-12, e-mail: SavlukAV@ipgg.sbras.ru

### ***Петр Андреевич Вайсман***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-07-81, e-mail: ipgg@ipgg.sbras.ru

### ***Александр Карлович Вальд***

Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, тел. (391)206-22-22, e-mail: akwald@web.de

### ***Александр Сергеевич Шеремет***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, ведущий инженер, тел. (383)330-07-81, e-mail: SheremetAS@ipgg.sbras.ru

### ***Николай Денисович Евменов***

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, студент, тел. (383)333-03-99, e-mail: evmennik@mail.ru

Полевые испытания разработанного высокочастотного магнитометра для БПЛА сверхлегкого класса при исследовании Ербинского некка анкаратритов (Хакасия) показали высокую производительность при проведении магнитометрической съёмки. Применение высокочастотных магнитометров позволило получить более детальную информацию о пространственной структуре аномального магнитного поля. За счет высокой плотности наблюдения сделаны выводы о более сложном строении некка, чем считалось ранее.

**Ключевые слова:** магнитометр, аэрогеофизика, БПЛА, беспилотник, трубки взрыва.

## THE USE OF HIGH-FREQUENCY MAGNETOMETER FOR LIGHT UAV GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF VOLCANIC PIPES

### *Andrey P. Firsov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., tel. (383)330-07-81, e-mail: FirsovAP@ipgg.sbras.ru

### *Igor N. Zlygostev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Senior Researcher, tel. (383)333-30-12, e-mail: ZligostevIN@ipgg.sbras.ru

### *Petr G. Dyadkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru

### *Andrey V. Savluk*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)333-30-12, e-mail: SavlukAV@ipgg.sbras.ru

### *Petr A. Veisman*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Chief Engineer, tel. (383)330-07-81, e-mail: ipgg@ipgg.sbras.ru

### *Aleksandr K. Vald*

Siberian Federal University, 660041, Russia, Krasnoyarsk, 79/10 Svobodny Prospect, Ph. D., Senior Scientific Researcher, tel. (391)206-22-22, e-mail: akwald@web.de

### *Aleksandr S. Sheremet*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Chief Engineer, tel. (383)330-07-81, e-mail: SheremetAS@ipgg.sbras.ru

### *Nikolay D. Yevmenov*

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Student, tel. (383)333-03-99, e-mail: evmennik@mail.ru

Field tests of a high-frequency magnetometer for ultra-light UAV used to study the Erbinskiy ankaratrite neck (Khakasia) have shown high efficiency of magnetic survey by means of a new complex. The use of high-frequency magnetometers allows one to obtain more full information about structure of anomalous magnetic field. High density of observations permits one to conclude that the neck has a more complex structure than it thought previously.

**Key words:** magnetometer, aerogeophysics, UAV, unmanned aerial vehicle, volcanic pipes, explosive pipes.

Повышение ресурсной базы полезных ископаемых требует применения не только новых технологий добычи и обогащения, но в первую очередь проведения более детального геологического исследования плохо изученных территорий. Как правило, такие работы необходимо проводить в труднодоступных местностях, в тяжелых климатических условиях. Всё большую роль в мире

приобретают аэрогеофизические исследования, позволяющие локализовать площади для последующего детального геологического изучения. Стоимость выполнения таких работ растёт и становится сдерживающим фактором для поиска месторождений. Возможные открытия могут не окупить проведённые работы. Особенно это актуально в регионах с плохой инфраструктурой, например, редкой сетью аэродромов, что справедливо для большей части территории России. Для мелкомасштабной съёмки альтернативы традиционной аэрогеофизике нет. Использование аэрогеофизических методов становится финансово недоступным, особенно на стадии крупномасштабных поисков. Большое количество уже открытых аномалий требует их заверки: оконтуривания тел, изучения их морфологии. В этом случае заменить наземную съёмку ничем, несмотря на высокую стоимость работ. Совершенно очевидно, что возникла потребность проведения «технической революции» в этой области.

В 2014 году в ИНГГ СО РАН был разработан опытный образец аэрогеофизического комплекса с магнитометрическим каналом (ВМК), размещённым на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) сверхлёгкого класса. Летящая платформа комплекса представляет собой мультиротор (октокоптер) оригинальной конструкции со стандартным автопилотом. Полёты выполняются как в автоматизированном режиме (полёт по точкам), так и режиме ручного управления. Общий взлётный вес комплекса составляет около 7 кг. Измеритель индукции магнитного поля Земли выполнен на базе магнитомодуляционного преобразователя с полосой пропускания 3 кГц. Общий уровень магнитных помех магнитометрического канала при работе в составе комплекса, измеренный в условиях обсерватории Новосибирск, не превышает 1 нТл. Уровень магнитных шумов измерительной части, измеренный в условиях естественного магнитного поля Земли вдали от промышленных объектов и линий электропередач, не превышает 0.2 нТл. Частота измерений созданного магнитометрического канала – 1.5 кГц, при этом число достоверных двоичных разрядов равно 22.

Подобная система, смонтированная на беспилотном вертолёте среднего класса, создана в Германии [1], но она имеет уровень магнитных помех около 10 нТл, что значительно сокращает область её применения в геофизических исследованиях.

В июле 2014 года при помощи разработанного комплекса был исследован Ербинский нект ультраосновных щелочных пород, который, как нам представляется, может служить моделью для постановки работ по поиску алмазносных трубок взрыва.

Ербинский нект (рис. 1) анкаратритов находится в пределах Минусинской котловины в южной части Копьевского поднятия, в 8 км от крупнейшего Сорского медно-молибденового месторождения [2]. Эти породы образованы в ходе раннетриасового суперплюмового импульса за счет частичного плавления метасоматически измененной мантии [3]. Если на севере Сибирской платформы эти процессы привели к широкому развитию ультраосновных щелочных пород и карбонатитов в Маймеча-Котуйской провинции, то в Южной Сибири это отдельные дайки, неки, трубки взрыва. В анкаратритах Ербинского некта

наблюдаются высокие содержания легких лантаноидов, меди, молибдена, платины, урана, тория. По-видимому, пространственная связь анкаратритов Ербинского некка и Сорского месторождения не случайна.

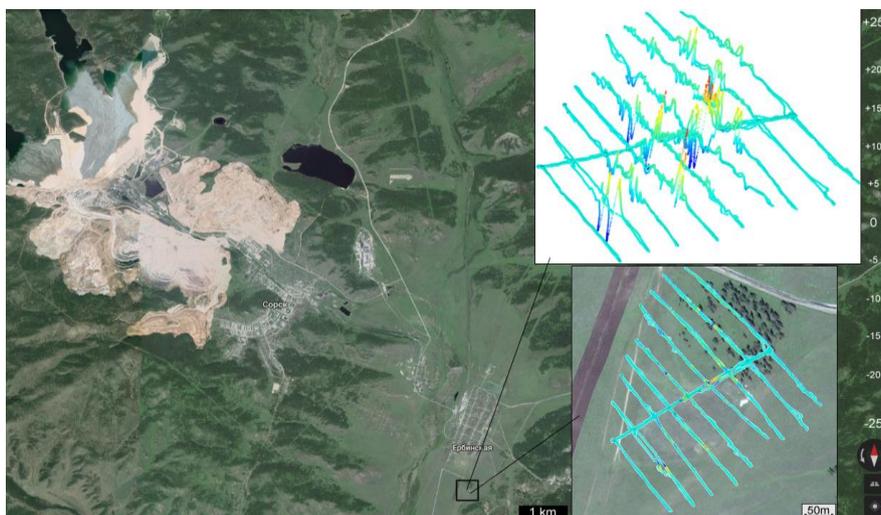


Рис. 1. Схема расположения Ербинского некка: в левой верхней части снимка – Сорский ГМК. Правая нижняя врезка – снимок Ербинского некка со схемой профилей магнитной съемки. Правая верхняя врезка – магнитное поле, измеренное ВМК

Морфологически некк представлен небольшим холмом элювиально-делювиальных обломков без выхода коренных пород размером около 350 м на 150 м. С помощью разработанного ВМК для БПЛА была проведена наземная съёмка некка. На рис. 2а показан профиль магнитного поля по магистрали, полученный по данным ВМК, а на рис. 2б – профиль, построенный по результатам съёмки протонным магнитометром ММРОС-1 с расстоянием между точками измерений 5 м. Измерения проводились при высоте первичного преобразователя около 0.8 м над поверхностью Земли в первом случае и около 1.5 м – во втором. Чувствительность ММРОС-1 – 0.02 нТл в 3-сек цикле и 0.05 нТл в 1-сек цикле, абсолютная погрешность –  $\pm 0.5$  нТл.

Сравнение аномального магнитного поля, полученного разными способами, показывает, что магнитное поле, измеренное ВМК, в целом совпадая с данными съёмки с помощью ММРОС 1, имеет более сложную структуру: содержит больше экстремумов с большей амплитудой.

Для более корректного сопоставления полученных данных была проведена пространственная фильтрация данных ВМК. Для этого данные, полученные с помощью ВМК, последовательно усреднялись по длине профиля в 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 раз. При усреднении в 64 раза (рис. 3) экстремумы на данных по совпадающим профилям совпали по количеству, но были в некоторых случаях смещены на несколько метров, а их амплитуда несколько выше, чем у данных, полученных с помощью протонного магнитометра.

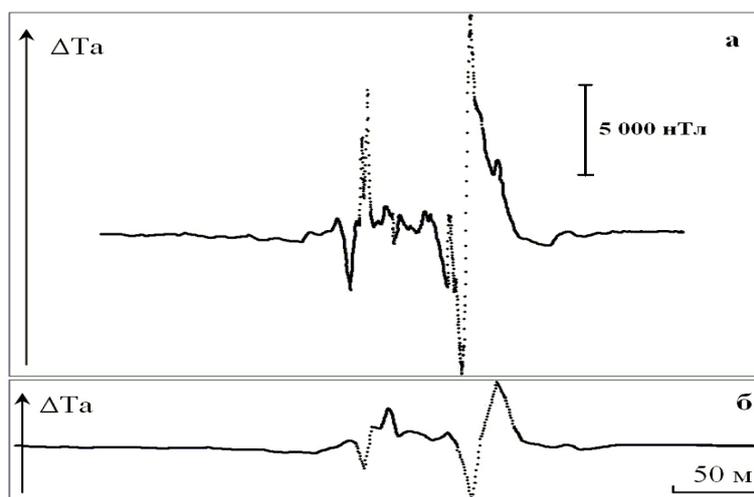


Рис. 2. Аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$  вдоль магистрали, измеренное ВМК (а) и ММРОС-1 (б)

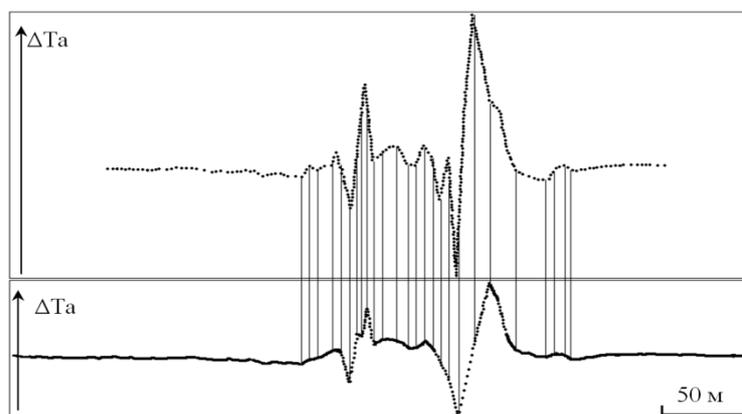


Рис. 3. Сравнение усредненных данных магнитной съёмки, полученных с помощью ВМК (верхний график) и ММРОС-1 (нижний график)

Имеющиеся различия при высоких градиентах аномального магнитного поля на данном объекте могут быть объяснены: - различной высотой первичного преобразователя магнитного поля над поверхностью Земли; - погрешностью определения координат точек измерения; - пропуском экстремальных значений магнитного поля.

Для наглядного объяснения преимуществ измерений с высокой пространственной плотностью предлагается простая модель. Предположим, что есть магнитное поле, которое будет измеряться абсолютно точным магнитометром с шагом 5 м и магнитометром, имеющим некоторую ошибку, но с частотой измерения в 20 раз больше. Такая модель представлена на рис. 4. Очевидно, что, несмотря на абсолютную точность измерений в точках в первом случае, общая кривая магнитного поля имеет существенно меньшее подобие «реальному» магнитному полю, чем поле, измеренное с помощью менее точного, но более

высокочастотного магнитометра. 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. Важно следующее: так как величина аномалий магнитного поля на порядки больше чувствительности приборов, определяющим для точности описания магнитного поля является не точность магнитометра, а его рабочая частота. Увеличение плотности наблюдения с помощью более точного магнитометра ведет либо к существенному увеличению времени работ при сохранении точности измерений, либо, при увеличении частоты измерений падает их точность. В последнем случае точности приборов становятся сравнимы.

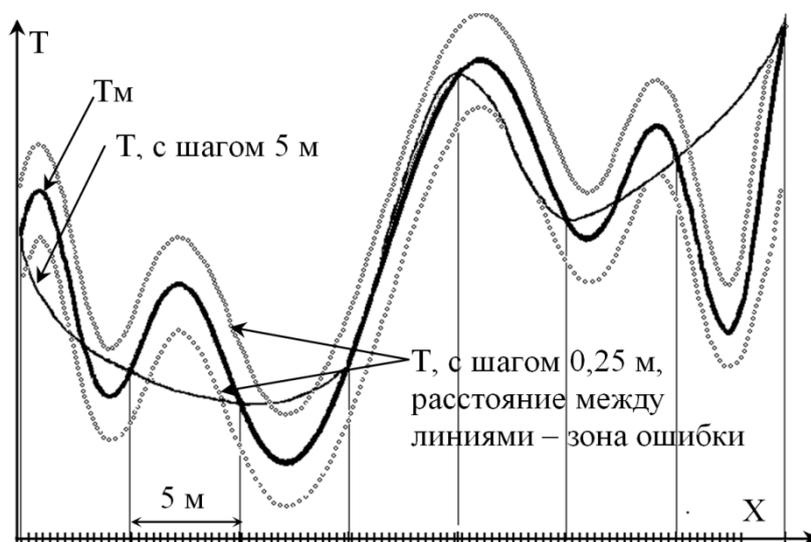


Рис. 4. Поле, измеренное с помощью абсолютно точного магнитометра: будет определяться точками на пересечении кривой «реального» магнитного поля с отсчетами на профиле по его длине, проведенными через определенный интервал

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Tezkan B., Stoll J.B., Bergers R., Großbach H. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys // *First Break*. - 2011. - V. 29, N 4. - P. 103–105.
2. Геря В.И., Единцев Е.С. Постдевонский магматизм в северо-западном обрамлении Южно-Минусинской впадины // *Геология и геофизика*. - 1975. - № 4. - С. 39–44.
3. Рихванов Л.П., Ершов В.В., Сарнаев С.И. Геохимические ассоциации редких и радиоактивных элементов в рудных и магматических комплексах. Новосибирск: Наука, 1991. - С. 97–109.

© А. П. Фирсов, И. Н. Злыгостев, П. Г. Дядьков, А. В. Савчук, П. А. Вайсман, А. К. Вальд, А. С. Шеремет, Н. Д. Евменов, 2015