УДК 550.837

А.К.ВОЛКОВИЦКИЙ, *ведущий инженер*, *akv@gtcomp.ru,*
Е.В.КАРШАКОВ, *канд.физ.-мат.наук*, ведущий инженер, *karsh@gtcomp.ru*
Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, *Москва,*
В.В.ПОПОВИЧ, *главный инженер*, *gp@gtcomp.ru*,
ЗАО «*Геотехнологии*», *Москва*

A.K.VOLKOVITSKIY, *Leading Engineer*, *akv@gtcomp.ru,*
E.V.KARSHAKOV, *PhDr.phys.-mat.Sci*, *Leading Engineer*, *karsh@gtcomp.ru*
The A.V.Trapesnikov Institute of Control Problems of Russian Academy of Sciences, *Moscow*
V.V.POPOVICH, *Chief Engineer*, *gp@gtcomp.ru*
«*Geotechnology Ltd*», *Moscow*

НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИНДУКТИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ СИСТЕМА ЕМ-4Н

Практически все существующие варианты электроразведочной аэросъемки были опробованы на территории Российской Федерации. На сегодняшний день в нашей стране наиболее широко используется аэроэлектроразведочная система, реализующая метод низкочастотного дипольного индуктивного профилирования (ДИП-А). Аппаратура ЕМ-4Н, разработанная для этого метода компанией ЗАО «Геотехнологии», позволяет производить съемку и получать карты эффективных проводимостей масштаба 1:25000. При этом средняя производительная скорость съемки составляет около 100 км/ч.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, дипольно-индуктивное сопротивление, частотное возбуждение.

LOW FREQUENCY INDUCTIVE AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SYSTEM EM-4H

Nearly all existing airborne EM-survey systems have been tested in Russian Federation. And for today the most popular EM-system is the frequency-domain one, called EM-4H. The article gives the description of the EM-4H system, that have been developed by «Geotechnologies» JS. This instrument allows effective conductivity mapping on a 1:25000 scale. It provides performing of 100 kilometers of survey per hour on the average.

Key words: airborne electromagnetics, dipole inductive profiling, frequency domain.

Первая съемка с применением системы ЕМ-4Н была произведена компанией «Аэрогеофизика» в 2002 г. С тех пор почти каждый год компанией ЗАО «Геотехнологии» выпускаются новые электроразведочные комплексы, и объемы выполняемых работ непрерывно растут[1]. Эти результаты говорят о том, что данная аппаратура является очень удачным средством решения задачи картирования проводящих свойств пород с целью поиска полезных ископаемых, исследования грунтовых вод и т.д.

Аппаратура ЕМ-4Н позволяет производить одновременные измерения на четырех частотах: 130, 520, 2080 и 8320 Гц. В качестве источника поля используется закрепленная на фюзеляже летательного аппарата горизонтальная многовитковая рамка (вертикальный магнитный диполь). К настоящему моменту компанией ЗАО «Геотехнологии» разработа-

[1] *Жданов М.С.* Электроразведка: Учебник для вузов. М.: Недра. 1986. 316 с.

Zhdanov M.S. Prospecting electromagnetics: Textbook for the Higher School / M.: Nedra. 1986. 316 p.

ны варианты системы ЕМ-4Н для применения на следующих носителях: самолеты «Ан-2», «Ан-3» и вертолет «Ми-8». В самолетных вариантах петля передатчика натягивается между бипланными стойками и задним швартовочным узлом. В результате она имеет форму треугольника площадью около 40 м^2. При установке на вертолет «Ми-8» для монтажа передатчика конструируется специальная рама, к которой крепится петля (рис.1). Площадь витка составляет уже около 60 м^2. Форма тока в петле – синусоидальная. Сигнал возбуждения представляет собой сумму гармоник соответствующих частот. Ориентировочные значения дипольных моментов для четырех частот в порядке возрастания равны: 20000, 10000, 6000, 3000 А·м^2. Измерение параметров переменного магнитного поля осуществляется тремя взаимно ортогональными приемными рамками, расположенными в гондоле, буксируемой на тросе длиной 70 м. Геометрические центры рамок совмещены, чувствительность на рабочих частотах составляет доли микроампера на метр.

При применении описанной электроразведочной системы возникает известная проблема – компенсация влияния наведенных на борту летательного аппарата токов. Для ее решения в системе ЕМ-4Н устанавливаются две компенсирующие петли. В каждой из них возбуждается ток определенной частоты, отличной от рабочих частот. Сигнал на этих частотах измеряется приемником наравне с остальными. Закон распространения магнитного поля в воздухе одинаков для всех частот. Поэтому на высоте более 500 м, где отклик от земли пренебрежимо мал, можно подобрать линейную комбинацию векторов больших полуосей эллипсов поляризации на компенсирующих частотах, равную проекции мнимого вектора рабочей частоты на их плоскость. Таким образом, при вычитании этой линейной комбинации получается линейно-поляризованный сигнал. Эта операция проделывается с каждой из рабочих частот. Далее фаза детектирования выбирается так, чтобы векторы возбуждения оказались действительными.

Стабильность системы обеспечена введением специального эталонного сигнала, в результате чего достаточно производить компенсацию дважды за вылет – в начале и в конце (рис.2), в то время как аналоги

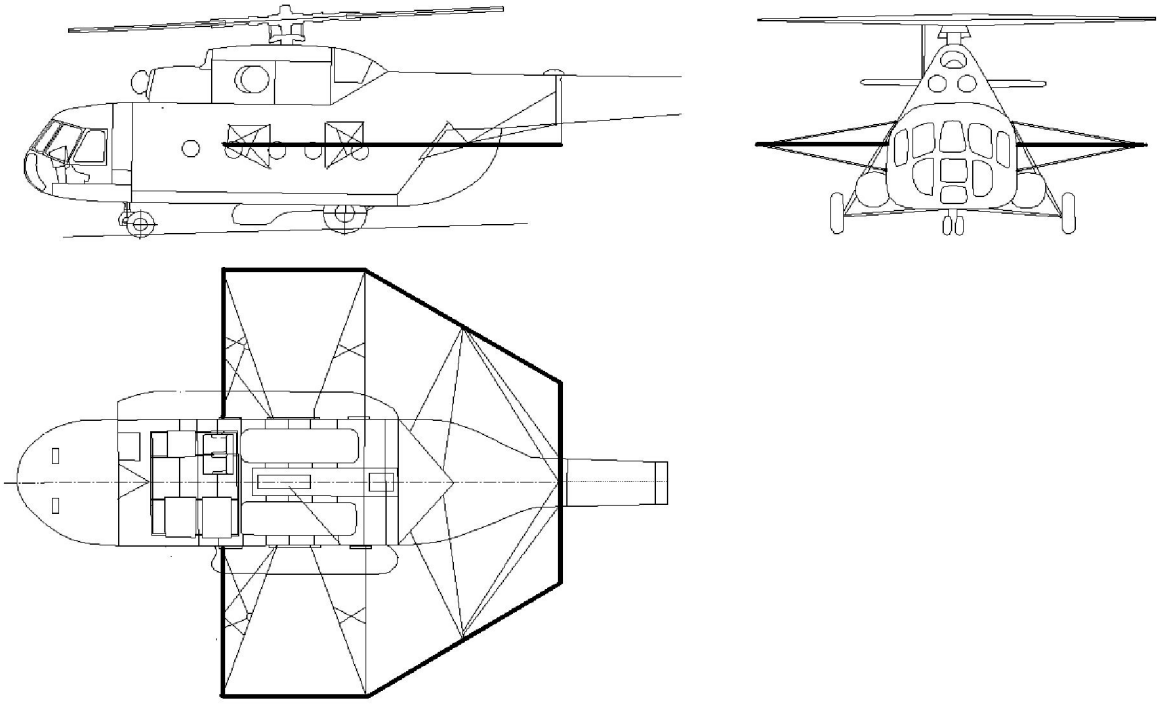


Рис.1. Система ЕМ-4Н на борту вертолета «Ми-8»

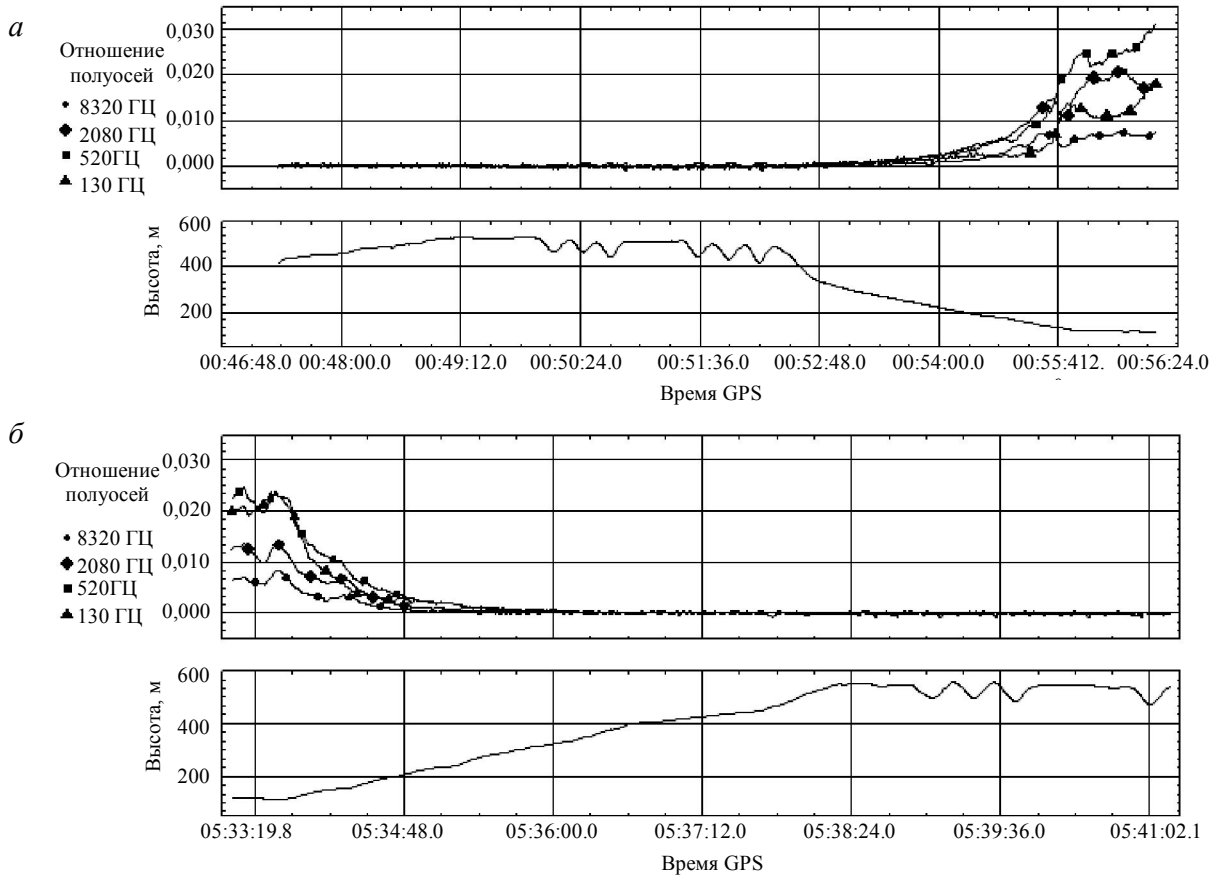


Рис.2. Зоны компенсации в начале (*а*) и в конце (*б*) вылета

системы ЕМ-4Н требуют проведения компенсации каждые 30 мин полета. Поскольку коэффициенты подбираются бортовым компьютером автоматически, на эти процедуры уходит 2-3 мин. Среднее значение отношения полуосей эллипсов поляризации в зонах компенсации при выполнении носителем различных эволюций составляет около $3\cdot10^{-5}$–$5\cdot10^{-5}$, среднеквадратичное отклонение – $2\cdot10^{-4}$–$5\cdot10^{-4}$. Общая продолжительность вылета составила около 5 ч, при этом качество компенсации не изменяется в течение всего полета.

Результатом работы системы ЕМ-4Н являются квадратурные компоненты или амплитуды и фазы компонент вектора переменного магнитного поля на каждой из рабочих частот (130, 520, 2080 и 8320 Гц). Кроме того, вычисляются традиционные для метода ДИП-А отношения полуосей, квадраты больших полуосей и углы в осях приемника больших полуосей эллипсов поляризации.

Система ЕМ-4Н позволяет определить расположение приемника по отношению к летательному аппарату. Это дает возможность учесть смещение гондолы не только при расчете эффективных проводимостей, но и при привязке измерений магнитного поля, поскольку датчик магнитометра также устанавливается в гондолу.

Вычисление эффективных проводимостей производится как решение обратной задачи для проводящего однородного полупространства на каждой частоте. За основу берутся палетки, рассчитанные как решение прямой задачи для вертикального диполя над горизонтально слоистой средой*:

$$H_r^i(l-h_2)=\frac{M}{4\pi}\int_0^\infty e^{-n_0(h_1+h_2)}\times$$

$$\times\frac{n-n_0}{n+n_0}J_1(n_0l)n_0^2dn_0;$$

* *Петров С.И.* Аэроэлектроразведка методом ДИП-А / С.И.Петров, В.Д.Новак, О.А.Тихомиров // Разведка и охрана недр. 2006. № 5. С.38-42.

Petrov S.I. Airborne electromagnetics using DIP-A method / S.I.Petrov, V.D.Novak, O.A.Tihomirov // Razvedka i ohrana nedr. 2006. No 5, pp. 38-42.

$$H_z^i(l-h_2) = -\frac{M}{4\pi}\int_0^\infty e^{-n_0(h_1+h_2)} \times$$

$$\times \frac{n-n_0}{n+n_0} J_0(n_0 l) n_0^2 dn_0,$$

где l – расстояние от гондолы до линии направления возбуждающего диполя; h_1, h_2 – высота передатчика и приемника над землей; M – момент возбуждающего диполя; $n = \sqrt{n_0^2 - i\omega\mu_0\sigma}$; $J_0(x)$, $J_1(x)$ – функции Бесселя нулевого и 1-го порядков соответственно; i – мнимая единица; ω – частота поля возбуждения; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; σ – проводимость. Пользуясь приведенными соотношениями, насчитываются палетки параметров для каждой частоты или их соотношений для пары частот. Параметрами могут быть мнимые части вертикальной компоненты отклика, отношение полуосей эллипса поляризации и т.п.

Таким образом, низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система ЕМ-4Н является удобным, эффективным средством исследования свойства проводимости пород. Из года в год объемы съемки с ее применением растут. Каждый сезон две-три системы запускает ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика». Комплексы ЕМ-4Н приобрели Норильский филиал ВСЕГЕИ, Амакинская ГРЭ АК «Алроса», АС «Амур». Аппаратура хорошо проявила себя в работах на Урале, в Норильском регионе, на Таймыре, в Якутии, на Кольском п-ве, под Архангельском, в центральных районах России, в Забайкалье, Казахстане и др.