

# НИЗКОЧАСТОТНАЯ ИНДУКТИВНАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ СИСТЕМА ЕМ-4Н

Волковицкий А.К.<sup>1</sup>, Каршаков Е.В.<sup>2</sup>, Попович В.В.<sup>3</sup>

1,2 – Институт проблем управления РАН, Москва

3 – ЗАО «Геотехнологии», Москва

karsh@gtcomp.ru

## Введение

В ряду аэрогеофизических методов, активно применяемых на практике, очень важное место занимает электроразведка в различных ее модификациях. История развития аэроэлектроразведочных систем насчитывает уже более полувека [1]. Не смотря на столь солидный возраст, эта отрасль практической геофизики продолжает бурно развиваться. Более того, в последние годы во всем мире аэроэлектроразведка переживает подъем, вполне сравнимый с динамикой развития сравнительно молодой аэрограмметрии. Чуть ли не каждый год появляются новые системы, или предлагаются новые модификации уже хорошо зарекомендовавших себя комплексов [2].

Практически все существующие варианты электроразведочной аэро съемки так или иначе были опробованы на территории Российской Федерации. На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что в нашей стране наиболее широко используется электроразведочная система, реализующая метод низкочастотного дипольного индуктивного профилирования (ДИП-А). Аппаратура, разработанная для этого метода, позволяет производить съемку и получать карты эффективных проводимостей масштаба 1:25000 [3]. При этом средняя производительная скорость съемки составляет около 100 км/час. Речь идет о системе ЕМ-4Н, разработанной компанией ЗАО «Геотехнологии».

## Техническое описание ЕМ-4Н

Аппаратура ЕМ-4Н производит 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). В реализованных системах носителями были 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<sup>2</sup>. 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<sup>2</sup>. Форма тока представляет собой сумму гармонических токов соответствующих частот. Дипольные моменты отличаются для разных типов носителей, их ориентировочные величины для четырех частот в порядке возрастания такие: 20000, 10000, 6000, 3000 А·м<sup>2</sup>.



*Рис. 1. Система EM-4N на борту вертолета Ми-8*

Измерение параметров переменного магнитного поля осуществляется приемными рамками, расположенными в гондole, буксируемой на тросе длиной 70 метров. Приемник имеет каналы измерений по трем ортогональным осям. Его чувствительность на рабочих частотах составляет десятые, и даже сотые доли мкА/м.

При таких геометрических параметрах системы существует известная проблема – компенсация влияния наведенных на борту летательного аппарата токов. Для её решения в системе EM-4N устанавливаются две компенсирующие петли. В каждую петлю компенсатора закачивается ток своей частоты, отличной от рабочих. Сигнал на этих частотах измеряется приемником наравне с остальными. Закон распространения магнитного поля одинаков для всех частот. Поэтому на высотах более 500 метров, 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 производится 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. Так как коэффициенты подбираются автоматически бортовым компьютером, на эти процедуры уходит совсем немного времени: 2-3 минуты. На рис. 2 показаны результаты компенсации. Среднее значение отношения полуосей в зонах компенсации при выполнении носителем различных эволюций составляет около  $3 \cdot 10^{-5}$  -  $5 \cdot 10^{-5}$ , среднеквадратичное отклонение –  $2 \cdot 10^{-4}$  -  $5 \cdot 10^{-4}$ .

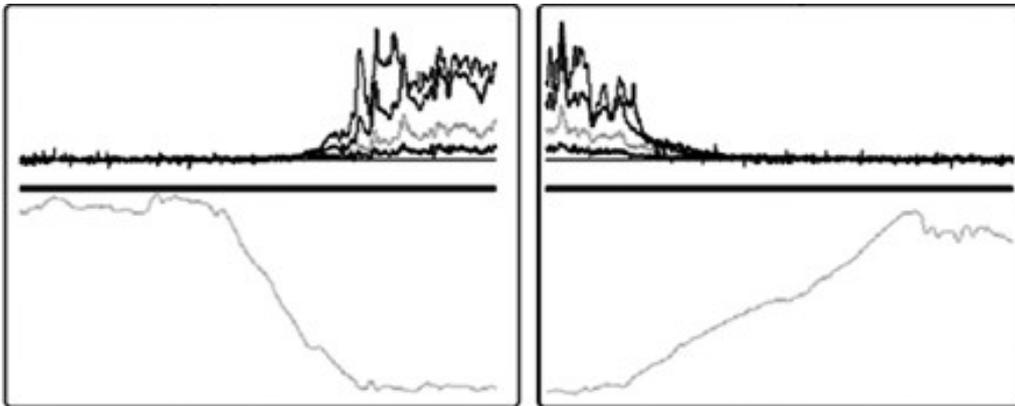


Рис. 2. Зоны компенсации. Отношения полуосей эллипсов поляризации на рабочих частотах (вверху) и высота над рельефом (внизу)

### Измеряемые параметры

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.

После установки оборудования на борту летательного аппарата известна геометрия расположения возбуждающих диполей рабочих и компенсирующих частот, а также длина выпуска гондолы. Наличие этой информации позволяет по взаимной ориентации векторов больших полуосей в точке приема определить расположение гондолы 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. Как известно, двумерные спектры потенциалов поля возбуждения и поля отклика в горизонтальной плоскости ( $x, y$ ) на границе земля-воздух ( $z = 0$ ) связаны следующим соотношением [4]:

$$u_0^i = u_0^e \frac{n - n_0 R^*}{n + n_0 R^*}.$$

Здесь  $u_0^i$  – спектр внутренней компоненты поля, поля отклика при  $z = 0$ ;  $u_0^e$  – спектр внешней компоненты поля, поля возбуждения при  $z = 0$ ;  $R^*$  – приведенный спектральный импеданс, для однородного полупространства  $R^* = 1$ ;  $n_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ,  $k_x, k_y$  – пространственные частоты;  $n = \sqrt{n_0^2 - i\omega \mu_0 \sigma}$ ,  $i$  – мнимая единица,  $\omega$  – частота поля возбуждения,  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\sigma$  – проводимость. Учитывая, что и внешняя, и внутренняя компонента спектра удовлетворяет уравнению Гельмгольца, задав гранич-

ные условия можно получить выражения для спектра отклика над поверхностью земли, при  $z < 0$ :

$$u^i(n_0, z) = \frac{Me^{n_0(z-h_1)}}{2} \frac{n - n_0}{n + n_0}.$$

Здесь  $h_1$  – высота возбуждающего диполя над поверхностью земли,  $M$  – момент возбуждающего диполя. Обратное преобразование Фурье дает потенциал поля отклика. Взяв соответствующие частные производные можно получить выражение для радиальной  $H_r^i$  и вертикальной  $H_z^i$  компонент поля отклика:

$$H_r^i(l, -h_2) = \frac{M}{4\pi} \int_0^\infty e^{-n_0(h_1+h_2)} \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} J_1(n_0 l) n_0^2 dn_0,$$
$$H_z^i(l, -h_2) = -\frac{M}{4\pi} \int_0^\infty e^{-n_0(h_1+h_2)} \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} J_0(n_0 l) n_0^2 dn_0,$$

где  $l$  – расстояние от гондолы до линии направления возбуждающего диполя,  $h_2$  – высота гондолы над землей,  $J_0(x)$ ,  $J_1(x)$  – функции Бесселя 0 и 1-го порядков соответственно. 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.

### Заключение

Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-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 EM-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.

ЗАО «Геотехнологии» осуществляет полномасштабную поддержку EM-4Н, а также продолжает поиск и внедрение новых технических решений в аэроэлектроразведке и в других областях съемочной геофизики.

### Список литературы

1. Fountain D. Airborne electromagnetic systems – 50 years of development // Exploration Geophysics. – 1998. – № 29. – P. 1-11.
2. Exploration Trends & Developments. Ed. Werniuk G. – 2007.
3. Петров С.И., Новак В.Д., Тихомиров О.А. Аэроэлектроразведка методом ДИП-А // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 5. – С. 38-42.
4. Жданов М.С. Электроразведка: Учебник для вузов. – М.: Недра. – 1986. – 316 с.