УДК 550.837.6

А.К.ВОЛКОВИЦКИЙ, *ведущий инженер, akv@gtcomp.ru*
Е.В.КАРШАКОВ, *канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, karsh@gtcomp.ru*
Е.В.МОЙЛАНЕН, *старший инженер, moilanen@mail.ru*
Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Москва

A.K.VOLKOVITSKIY, *leading engineer, akv@gtcomp.ru*
E.V.KARSHAKOV, *PhD in phys. & math., senior research assistant, karsh@gtcomp.ru*
E.V.MOILANEN, *senior engineer, moilanen@mail.ru*
Institute of Control Sciences of the RAS, Moscow

ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩАЯ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА В МАСШТАБЕ 1:5000

Рассматриваются вопросы увеличения детальности аэроэлектроразведочных работ, что имеет принципиальное значение для поиска таких небольших изометричных в плане объектов, как кимберлитовые трубки. Показана теоретическая возможность съемки масштаба 1:5000. Приведены необходимые практические требования к геометрии аэроэлектроразведочных систем, определению относительного местоположения передатчик-приемник, изложены положения для установки навигационной аппаратуры. На полученных данных проанализирована перспектива детального изучения территорий, прилегающих к разрабатываемым или выработанным месторождениям.

***Ключевые слова*:** аэроэлектроразведка, метод переходных процессов, система «Экватор».

HIGH RESOLUTION HELICOPTER-BORNE ELECTROMAGNETIC SURVEYING IN 1:5000 SCALE

The resolution increasing problems are discussed for airborne electromagnetic survey. It is a key issue for searching small isometric in plan objects, like kimberlite pipes. The theoretical possibility of survey with 50 m distance between lines is shown. Necessary practical requirements are declared for such scale. They are a solution of navigational task, transmitter positioning with respect to receiver and with respect to the ground, system's geometry limitations. Future trends are analyzed on acquired data for detailed surveying on adjacent territories of exploited or duffer deposits.

***Key words*:** airborne electromagnetics, time-domain, system «Equator».

Введение. На сегодняшний момент большинство крупных месторождений полезных ископаемых уже открыты, поэтому возник вопрос о поиске более мелких объектов на уже опоискованной территории. Применение высокоточной аэроэлектроразведки для поиска мелких, изометричных в плане, объектов (диаметром менее 200 м) становится все более актуально. Например, это могут быть вкрапленные руды, кимберлиты [8]. Для поисков коренных источников алмазов в Архангельской области была проведена аэроэлектроразведочная съемка масштаба 1:5000 [1]. Развитие навигационного оборудования и высокоточная проводка летательного аппарата, создание системы с определением положения приемника относительно передатчика и относительно Земли позволили провести аэроэлектроразведку в данном масштабе.

Теоретическое обоснование масштаба съемки. Необходимо показать, что съемка масштаба 1:5000 даст существенное

увеличение полезной информации. Для этого размер зоны возбуждения на горизонтальной поверхности Земли должен быть не больше двойного межмаршрутного расстояния. Действительно, напряженность магнитного поля в полярных координатах вычисляется по формулам

$$H_n = \frac{\sin\theta M}{R^3};$$

$$H_\tau = \frac{2\cos\theta M}{R^3},$$

где H_n, H_τ – нормальная и тангенсальная составляющие напряженности вектора магнитной индукции; M – момент вертикального магнитного диполя (ВМД); R – расстояние от источника до точки наблюдения [2].

Вычислим предельный угол θ от оси ВМД, для которого вектор напряженности поля – касательная к поверхности Земли. Среднюю высоту передатчика над Землей примем равной 50 м, что соответствует высоте летательного аппарата около 100 м. Для этого возьмем арктангенс отношения тангенциальной компоненты напряженности магнитной индукции к нормальной:

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{H_\tau}{H_n} \to \mathrm{tg}\theta = \sqrt{2} \to \theta = 54^\circ;$$

$$H = \frac{M}{R^3}\cos^3\theta\sqrt{1+\cos^2\theta}.$$

Теперь мы можем рассчитать амплитуду вектора напряженности магнитного поля. На поверхности Земли амплитуда напряженности магнитного поля падает с удалением оси ВМД, как показано на рис.1. Около 80 % энергии поля сосредоточено в круге диаметром 70 м, что меньше двойного межмаршрутного расстояния для съемки масштаба 1:5000.

Таким образом, при описанных геометрических параметрах системы съемка масштаба 1:5000 возможна.

Технические характеристики «Экватора». «Экватор» — это импульсная электромагнитная система [3]. Ее передатчик – это четырехвитковая петля диаметром 7,5 м, буксируемая на трос-кабеле длиной 75 м за вертолетом. Приемник буксируется на том же кабеле в гондоле в 40 м от передатчика, и, соответственно, в 35 м от вертолета [6].

Для географической привязки в гондоле установлен GPS-приемник. При использовании дифференциального режима работы спутниковой навигации он позволяет определить координаты точки измерения точнее 1 м. Несмотря на достаточно длинный трос-кабель, навигационное программное обеспечение позволяет обеспечить проводку надлежащего качества [4, 9]. Однако колебания передатчика относительно приемника достигают нескольких метров, что для съемки данного масштаба весьма критично. Для определения взаимного расположения передатчика и приемника осуществляется измерение поля двух маломощных дополнительных диполей, сигналы которых не попадают в спектр возбуждения основного диполя. Специально разработанные алгоритмы позволяют определить расстояние с точностью до несколько сантиметров и углы взаимной ориентации с точностью порядка 1° [7, 10]. Высота контролируется радиовысотомером, установленным на платформе передатчика. Во время съемки пилот непрерывно контролирует расстояние от передатчика до земли.

Практический пример. В сентябре 2010 г. с задачей поиска кимберлитовых тел была проведена съемка масштаба 1:5000. Общая протяженность маршрутов составила 2000 км. Съемка была выполнена за одну неделю, включая монтаж-демонтаж, перелет к месту базирования на площади работ, тестовый полет. При этом средняя длина маршрута была чуть меньше 10 км. В условиях плоского рельефа удалось выдержать постоянную скорость на маршруте – 140 км/ч. Качество проводки проверялось по координатам гондолы. Максимальное боковое уклонение от программной линии пути не превысило 15 м.

По результатам съемки для сравнения были построены карты кажущихся проводимостей в масштабах 1:10000 и 1:5000 [5]. На более детальной карте удалось выделить дополнительные структуры. Выделения таких слабоконтрастных аномалий оправдывает масштаб съемки.



Общая схема геометрии вертолетной электроразведочной системы на внешней подвеске с разнесенными передатчиком и приемником (*а*) и график зависимости амплитуды сигнала возбуждения в процентах от значения на оси ВМД, пунктиром указаны расстояния от оси ВМД при значении сигнала возбуждения 50 % от значения на оси (*б*)

Выводы. Для электромагнитной системы «Экватор» при высоте полета носителя 100 м около 80 % энергии поля сосредоточено на поверхности земли в круге радиуса 70 м. Это позволяет выполнять съемку масштаба 1:5000. Важнейшим результатом данной съемки является выделение небольших по размеру слабоконтрастных аномалий. Применение такой высокоточной аэроэлектроразведки для поиска мелких, изометричных в плане объектов (вкрапленные руды, кимберлиты) особенно актуально при работах на территориях, прилегающих к уже разрабатываемым или выработанным месторождениям.

Основные характеристики аэроэлектроразведочной системы «Экватор», обеспечивающие выполнение требований съемки масштаба 1:5000, следующие:

• высокоточная проводка летательного аппарата;

• координатная привязка положения приемника с использованием дифференциально-фазового режима спутниковой навигационной системы;

• определение положения передатчика относительно приемника и относительно земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабаянц П.С.* Опыт использования современных методов аэроэлектроразведки при решении различных геологических задач / П.С.Бабаянц, А.А.Трусов // Мат. Всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли / Физ. фак. СПбГУ. 2011. Кн.2. С.228-229.

2. *Бондаренко В.М.* Общий курс разведочной геофизики / В.М.Бондаренко, Г.В.Демура, Е.И.Савенко. М.: Норма, 1998. 304 с.

3. *Волковицкий А.К.* Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для аэрометода переходных процессов / А.К.Волковицкий, Е.В.Каршаков, Е.В.Мойланен // Приборы и системы разведочной геофизики / ЕАГО. Саратов, 2010. № 8. С.23.

4. *Волковицкий А.К.* В. Управление проводкой атмосферного летательного аппарата / А.К.Волковицкий, Е.В.Каршаков, Б.В.Павлов // Перспективные системы и задачи управления: Сб. материалов Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Таганрог, 2011. С.73-77.

5. *Волковицкий А.К.* Возможности вертолетной системы Экватор, реализующей метод переходных процессов / А.К.Волковицкий, Е.В.Каршаков, Т.А.Вовенко // Мат. Всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли / Физ. фак. СПбГУ. 2011. Кн.2. С.437-440.

6. *Мойланен Е.В.* Применение аэроэлектроразведки системой Экватор в горных условиях Восточного Саяна / Е.В.Мойланен, П.В.Кирплюк, П.В.Мельников // Мат. Всероссийской школы-семинара имени М.Н.Бердичевского и Л.Л.Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли / Физ. фак. СПбГУ, 2011. Кн.2. С.282-285.

7. *Павлов Б.В.* Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации / Б.В.Павлов, А.К.Волковицкий, Е.В.Каршаков // Гироскопия и навигация. 2010. 1(68). С.3-14.

8. *Cunion E.* Comparison of ground TEM and VTEM responses over kimberlites in the Kalahari of Botswana // Exploration Geophysics. 2009. 40. 308-319.

9. *Ley-Cooper Y.* Amplitude and phase correction of helicopter EM data / Y.Ley-Cooper and J.Macnae // Geophysics. 2007. 72. N.3. P.119-126.

10. *Vrbancich J.* Limitations of two approximate methods for determining the AEM bird position in a conductive environment / J.Vrbancich and R.Smith // Exploration Geophysics. 2005. 35. P.365-373.

REFERENCES

1. *Babayanc P.S., Trusov A.A.* Experience of use airborne electromagnetic modern methods for solving different geological tasks // Materials of All Russian school semi-

nar by M.N.Berdichevsky and L.L.Vanian on electromagnetic sounding of the Earth / Dep. of physics. Saint Petersburg, 2011. Book 2. P.228-229.

2. *Bondarenko V.M.*, *Demura G.V.*, *Savenko E.I.* General Course of prospecting geophysics. Moscow: Norma, 1998. 304 p.

3. *Volkovitsky A.K.*, *Karshakov E.V.*, *Moilanen E.V.* New helicopter borne time domain electromagnetic system «Equator» // #8 Equipment and systems of prospecting geophysics / EAGO. Saratov, 2010. P.23.

4. *Volkovitsky A.K.*, *Karshakov E.V.*, *Pavlov B.V.* Aircraft piloting // Promising systems and control tasks: The Material Collection of the sixth All Russian science practical conference Taganrog, 2011. P.73-77.

5. *Volkovitsky A.K.*, *Karshakov E.V.*, *Vovenko T.A.* Capabilities of helicopter borne time domain electromagnetic system «Equator» // Materials of All Russian school seminar by M.N.Berdichevsky and L.L.Vanian on electromagnetic sounding of the Earth / Dep. of physics. Saint Petersburg, 2011. Book 2. P. 437-440.

6. *Moilanen E.V., Kirpluk P.V., Melnikov P.V.* Application of airborne electromagnetic system «Equator» in conditions of Eastern Sayan Mountains // Materials of All Russian school seminar by M.N.Berdichevsky and L.L.Vanian on electromagnetic sounding of the Earth / Dep. of physics. Saint Petersburg, 2011. Book 2. P.282-285.

7. *Pavlov B.V.*, *Volkovitsky A.K.*, *Karshakov E.V.* Low frequency electromagnetic system of relative navigation and orientation // Gyroscope and navigation. 2010. #1(68). P.3-14.

8. *Cunion E.* Comparison of ground TEM and VTEM responses over kimberlites in the Kalahari of Botswana // Exploration Geophysics. 2009. 40. 308-319.

9. *Ley-Cooper Y.*, *and J. Macnae*. Amplitude and phase correction of helicopter EM data // Geophysics. 2007. 72. N.3. P.119-126.

10. *Vrbancich J.*, *and Smith R*. Limitations of two approximate methods for determining the AEM bird position in a conductive environment // Exploration Geophysics. 2005. 35. P.365-373.