УДК 550.837.6

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ АЭРО- И НАЗЕМНЫХ Электроразведочных систем, используемых при поисках кимберлитов в республике ангола

Ж. Т. Феликс, Е. В. Каршаков, П. В. Мельников, В. А. Ванчугов

Аннотация. В статье приводятся результаты сопоставления данных трех различных электроразведочных систем, используемых при поиске коренных месторождений алмазов на территориях горнорудного общества «Катока» в Республике Ангола. Одна из систем – вертолетная аэроэлектроразведка, две другие – системы наземного базирования, реализующие методы переходных процессов и дипольного индуктивного профилирования. Сопоставляются первичные данные, полученные как в частотной, так и во временной области. Проиллюстрирована сопоставимая с наземными методами информативность и разрешающая способность аэроэлектроразведки в случае измерения откликов от малоразмерных приповерхностных объектов.

Ключевые слова. Электроразведка, метод переходных процессов, дипольное индуктивное профилирование, «Экватор», «Цикл-5», «ЕМ34-3XL».

Abstract. The article presents the results of data comparison for three different electromagnetic systems used for exploration of primary diamond deposits in the territories of mining company "Catoca" in the Republic of Angola. One of these systems is helicopter-borne, the two others are ground based: one transient and one dipole electromagnetic profiling. Data obtained in both time-domain and frequency-domain are compared. It is shown that airborne electromagnetic system is equally informative and has as good resolution as ground methods while measuring responses from small subsurface objects.

Key words. Electromagnetics, transient electromagnetics, dipole electromagnetic profiling, «Equator», «Tsikl-5», «EM34-3XL».

ВВЕДЕНИЕ. В 2013 году Горнорудное общество «Катока» провело серию работ с применением различных электроразведочных систем, как наземного, так и авиационного базирования. В частности, в период с июня по сентябрь Всероссийский научноисследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского и компания ЗАО «Геотехнологии» совместно выполнили аэросъемочные работы масштаба 1:10000 на участках ГРО «Катока» общей площадью 2360 кв. км с применением комплекса «Экватор», разработанного ЗАО «Геотехнологии», г. Москва, Россия [1]. Данный комплекс включает электроразведку методом переходных процессов (МПП) и высокоточную магнитометрию.

Целью работы были подготовка геофизической основы для поисков коренных месторождений алмазов, уточнение геологического строения площади работ, оценка перспектив выделенных объектов.

В рамках данной работы были предусмотрены аэрогеофизические исследования на эталонных участках, в пределах которых находятся известные кимберлитовые трубки различных размеров. На некоторых из них в марте 2013 года фирмой «Геосондаш», Ангола, были проведены работы с двумя наземными электроразведочными системами. Первая – «Цикл-5», система наземного МПП производства ООО «Эльта-ГЕО», г. Новосибирск, Россия [4]. Вторая – «ЕМЗ4-ЗХL» производства «Джеоникс Лимитед», г. Миссиссага, Канада, реализующая метод дипольного индуктивного профилирования (ДИП) [8].

Благодаря тому, что интерпретация данных электроразведочной системы «Экватор» может выполняться как во временной, так и в частотной области [10], стало возможным сопоставление результатов с данными двух перечисленных наземных систем, реализующих различные по принципу измерений методы электроразведки. По каждому участку сопоставлялись:

 – кривые кажущихся удельных электропроводностей для близких частотных каналов систем «EM34-3XL» и «Экватор»;

 – кривые откликов и кажущихся удельных электропроводностей для систем «Цикл-5» и «Экватор» в одних и тех же временных каналах.

В статье приведено краткое описание аппаратуры, а также даны наиболее интересные результаты сопоставления данных.

Аппаратура «Экватор»

Аэроэлектроразведочная система, входящая в состав комплекса «Экватор», является одним из представителей класса буксируемых вертолетных индуктивных электромагнитных систем, реализующих метод переходных процессов [1]. Передатчик системы «Экватор» выполнен в виде четырехвит-ковой петли диаметром 7,5 м. Сигнал возбуждения представляет собой повторяющиеся разнополярные импульсы длительностью 1,9 мс в форме полусинуса. Базовая частота 77 Гц. Амплитуда момента – 100000 А·м². Передатчик буксируется вертолетом на тросе длиной 75 м (рис. 1).

Трехкомпонентный приемник располагается в специальной гондоле, прикрепленной к буксировочному тросу примерно в 40 метрах от передатчика. В системе «Экватор» реализованы алгоритмы отно-



Рис. 1. Комплекс «Экватор», буксируемый вертолетом «Eurocopter AS350 B3»

сительного позиционирования передатчика и приемника [7], позволяющие определить геометрию установки с точностью не хуже 10 см. Привязка полученных данных в географической системе координат осуществлялась при помощи спутниковой навигационной системы, работающей в дифференциальном режиме. Высота полета над поверхностью Земли контролировалась установленным на платформе передатчика радиовысотомером.

Выходными данными системы являются измерения амплитуды поля отклика (B) и скорости спада (dB/dt) на 14-ти временных интервалах, отсчитанных от момента выключения тока (Табл. 1). Поскольку в системе «Экватор» выполняется преобразование измерений в частотную область, то выходными параметрами дополнительно являются измерения синфазных и квадратурных компонент поля на 14ти частотах, отвечающих наиболее значимым гармоникам в спектре сигнала возбуждения (Табл. 2). Частота выдачи данных – 6,61 Гц. Средняя скорость полета вертолета при выполнении работ составила

Таблица 1.

Измерительные каналы системы «Экватор» во временной области

№ канала	Время измерений, мкс
1	2,5
2	7,5
3	15
4	27,5
5	45
6	70
7	122,5
8	197,5
9	322,5
10	525
11	852,5
12	1397,5
13	2265
14	3662,5

155 км/ч, поэтому измерения вдоль съемочного профиля выполнялись со средним интервалом 6,5 м.

Традиционно при работе с данными электроразведки для всех каналов измерения как в частотной, так и во временной области вычисляются значения кажущихся удельных сопротивлений ρ_a , или кажущихся удельных электропроводностей $\sigma_a = 1/\rho_a$ [3]. $\sigma_a -$ это удельная электропроводность эквивалентного однородного полупространства, т. е. такого полупространства, в присутствии которого рассчитанное вторичное поле при заданных характеристиках передатчика и приемника совпадает с измеренным.

Известно, что существуют различные способы вычисления этого параметра при работе с данными в частотной области [6]. В работе использованы два из них. Первый - подбор параметров однородного полупространства, обеспечивающих совпадение и синфазных, и квадратурных компонент. Этот метод традиционно используется для работы с данными системы «Экватор» в частотной области. Во втором требуется совпадение только квадратурных компонент. При этом, в отличие от первого варианта, высота передатчика над поверхностью считается известной - используются показания радиовысотомера. Учитывая неоднозначность зависимости квадратурной компоненты отклика от удельной электропроводности, в области с пониженными сопротивлениями результаты вычислений с использованием второго варианта перестают отражать реальное изменение параметров среды. Этот метод использован для сопоставления данных систем «Экватор» и «ЕМ34-3XL».

Аппаратура «Цикл-5»

Аппаратура предназначена для проведения электроразведочных работ МПП в широком временном диапазоне. Аппаратура выполнена в виде двух раздельных блоков – измерителя (приемника) и коммутатора (передатчика). Управление процессом измерения осуществляется через компьютер, который подключен к измерителю. При работе передатчика в генераторной петле коммутируются разнополярные импульсы с паузами между ними. Паузы соответствуют длительности задаваемого оператором

Таблица 2.

Измерительные каналы системы «Экватор» в частотной области

№ канала	Частота, Гц
15	77
16	231
17	385
18	540
19	694
20	848
21	1003
22	1157
23	1466
24	1620
25	1774
26	3163
27	6250
28	11959

диапазона. Максимальное коммутируемое напряжение – 50 В, максимальный коммутируемый ток – 20 А. Шкала времен измерения сигнала построена как равномерная в логарифмическом масштабе.

При выполнении работ на рассматриваемых участках измеритель регистрировал переходный процесс в 62 временных интервалах в диапазоне времен от 12,5 мкс до 7,7 мс. Форма возбуждающей петли – квадрат 50х50 метров. Форма импульса тока – прямоугольная. Приемная рамка располагалась в центре возбуждающей петли. Расстояние между точками измерений вдоль профиля – 50 метров. На каждом пикете профиля выполнялось несколько измерений. В качестве результата использовалось среднее значение по всем сделанным на текущем пикете измерениям.

При сопоставлении данных системы «Экватор» с данными «Цикл-5» были использованы одни и те же временные интервалы, которые приведены в Та-блице 1.

При расчете кажущихся удельных электропроводностей применялась традиционная для подобных систем формула [5]:

$$\sigma_a = \frac{\pi t_i}{\mu_0} \left(\frac{20\varepsilon_i t_i}{\mu_0 M_r M_r} \right)^{2/3}.$$
 (1)

Здесь $\sigma_a - \kappa$ ажущаяся удельная электропроводность, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, M_t – момент генераторного контура, M_r – момент измерительного контура, $\varepsilon_i - \Im$ ДС переходных процессов в приемном контуре в момент времени t_i .

Аппаратура «EM34-3XL»

Аппаратура предназначена для проведения работ методом ДИП на трех рабочих частотах: 400, 1600 и 6400 Гц при расстоянии передатчик-приемник 40, 20 и 10 метров соответственно. Расстояние между точками измерений вдоль профиля – 20 метров.

Измеряемой величиной является кажущаяся удельная электропроводность, определяемая из соотношения первичного и вторичного поля в точке приема в рамках линейной аппроксимации [8]:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right). \tag{2}$$

Здесь о – кажущаяся удельная электропроводность, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, ω – частота, *s* – расстояние передатчик-приемник, Н и Н – соответственно, амплитуды вторичного и первичного поля в точке расположения приемника. При таком подходе к обработке измерений в зонах с высокой удельной электропроводностью показания системы перестают отражать реальные изменения свойств, что связано с выходом из зоны линейной зависимости отклика от удельной электропроводности [9]. На высокой частоте выход из линейной зоны происходит при меньших значениях удельных электропроводностей. Как следствие, измерения «ЕМ34-3XL» на частоте 6400 Гц в данных работах не использовались. Кроме того, указанный фактор обусловил возможность лишь качественного сопоставления данных аэро- и наземной модификации, полученных в частотной области.

При сопоставлении данных «EM34-3XL» и системы «Экватор» в спектре сигнала последней (табл. 2) были выбраны частоты, близкие к рабочим частотам системы «EM34-3XL», а именно 385 и 1620 Гц.

Сопоставление результатов измерений

На рис. 2 показано плановое положение профилей съемки для всех трех систем на одном из участков. Они проходят над одной из известных кимберлитовых трубок [2]. Профили не совпадают, расхождение составляет до 30 метров между профилем съемки аппаратурой «Цикл-5» и «Экватор» и до 60 метров между профилем «ЕМ34-3XL» и «Экватор».

Сопоставление данных в частотной области. На рис. 3 показаны результаты сопоставления данных в частотной области для систем «EM34-3XL» и «Экватор». Видно, что, согласно данным







для систем «Экватор» и «EM34-3XL». IQ – значение, полученное для системы «Экватор» с использованием синфазной и квадратурной компонент отклика, Q – с использованием только квадратурной компоненты. системы «Экватор», кажущаяся удельная электропроводность при измерениях над трубкой составляет 100–150 мСм/м для частоты 385 Гц и 150–250 мСм/м для частоты 1620 Гц. Как было сказано выше, аппаратура «ЕМ34-3XL» корректно регистрирует кажущиеся сопротивления только в зоне линейной зависимости отклика от удельной электропроводности, а данные значения лежат уже за ее пределами. Тем не менее, полученные измерения обеих систем обусловлены вторичным полем. Поэтому кривые «ЕМ34-3XL» близки к кривым «Экватор Q», вычисленным с использованием лишь квадратурных компонент сигналов на соответствующих частотах.

Сопоставление данных во временной области. Сопоставление во временной области показаний систем «Цикл-5» и «Экватор» на том же участке (рис. 2) позволяет, с одной стороны, говорить о том, что обе системы надежно обнаруживают объект, а с другой стороны, выявляет отличия двух систем (рис. 4).

Во-первых, есть несогласованность в амплитудах отклика при движении вдоль профиля. Видно, что локальный максимум в левой части профиля для любого отдельно взятого канала в данных «Цикл-5» больше локального максимума в том же канале в правой части. В данных же «Экватора» наблюдается обратная картина. Это объясняется изменением высоты полета над сложным рельефом, которая на рассматриваемом участке меняется от 50 метров в левой части профиля до 30 метров в правой (рис. 4). Очевидно, большей высоте соответствует меньшая амплитуда отклика.

Во-вторых, можно заметить, что в целом кривые схожи и по форме, и по соотношению между амплитудами отклика на соседних интервалах измерений. Однако, в наземных данных МПП наблюдается существенно большая скорость спада на ранних временах, что, вероятно, связано с разной высотой передатчика, и различной формой возбуждающего импульса. В системе «Цикл-5» используются им-



Рельеф и траектория полета передатчика «Экватор» (вверху), сопоставление вертикальной составляющей dB/dt во временных каналах систем «Экватор» (в центре) и «Цикл-5» (внизу)

пульсы почти прямоугольной формы (очень быстрый спад тока в петле передатчика), а в системе «Экватор» – в форме полусинуса. На поздних временах разница нивелируется вследствие уменьшения влияния геометрии установки и формы возбуждающего импульса.

В-третьих, в показаниях обеих систем наблюдаются локальные максимумы отклика на границах области с повышенной электропроводностью. Максимумы на поздних каналах смещены ближе к центру аномалии. При этом для системы «Экватор» такое смещение больше, чем для соответствующих каналов «Цикл-5». Причиной этого является разница в геометрических параметрах установки, а именно разное расстояние от источника поля до границы проводящего объекта.

Так, согласно имеющимся данным, породы повышенной удельной электропроводности (~100 мСм/м) в этом месте перекрыты изолирующим слоем (~1 мСм/м) мощностью около 10 метров, т. е. расстояние до проводящего тела меньше, чем размер петли передатчика «Цикл-5» (50 м). В то же время высота полета передатчика системы «Экватор» в среднем составила 40 метров, т. е. расстояние от передатчика до поверхности проводника значительно больше размера петли – 7,5 метров. В этом случае можно рассматривать поле передатчика как поле точечного диполя. Анализируя поле диполя в частотной области можно показать, что при приближении к вертикальной границе проводника зона возбуждения низкими частотами достигает ее раньше, чем зона возбуждения высокими частотами. В частности, на рис. 3 можно увидеть смещение максимумов на частоте 385 Гц по отношению к максимумам на частоте 1620 Гц. Поскольку значения в поздних временных каналах по большей части определены низкочастотной составляющей спектра отклика, влияние отклика от вертикальной границы в этих каналах также проявляется на большем расстоянии от нее по сравнению с ранними каналами. В случае же с передатчиком, расположенным в непосредственной близости от проводника зона возбуждения определяется в значительной степени формой петли. Более детальное исследование этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

Несмотря на сказанное выше, поскольку все современные алгоритмы вычисления параметров среды позволяют учесть геометрические харктеристики установки, указанные различия не оказывают влияния на результат обработки данных в том случае, когда обеспечена достаточная чувствительность аппаратуры. Так, на рис. 5 представлены кривые кажущихся удельных электропроводностей для сигналов отклика, показанных на рис. 4. Здесь уже расхождение данных «Цикл-5» и системы «Экватор» минимально. Оно наибольшее в левой (южной) части профиля, где имеется пространственное расхождение самих профилей (рис. 2).

На рис. 5 видно, что при переходе к параметрам кажущейся удельной электропроводности в данных системы «Экватор» удается полностью исключить влияние высоты полета – нет рассогласования по амплитуде значений вдоль профиля, а также влия-



и «Цикл-5» (внизу)

ние формы сигнала – соотношение амплитуд значений для различных временных каналов двух систем стало близким. Разное поведение кривых на краю аномалии объясняется тем, что кажущаяся удельная электропроводность рассчитывается, как соответствующий параметр эквивалентного полупространства. При наличии же неоднородностей, каковыми являются границы кимберлитовой трубки с вмещающими породами, по разному сказываются различные геометрические параметры электроразведочных систем и их положение относительно объекта.

Влияние высоты полета. На одном из участков (рис. 6) системой «Экватор» были снят дополнительно профиль при высоте буксировки передатчика 20 метров. На рис. 7 представлены кривые сигналов для систем «Цикл-5» и «Экватор». Видно, что в данных системы «Цикл-5» отклики в правой (северной) части профиля имеют два рядом лежащих локальных максимума.

В данных системы «Экватор», полученных при высоте передатчика 50 метров, помимо обусловленного геометрией смещения максимумов отклика на разных временных каналах, которое обсуждалось выше, наблюдается сглаживание сигнала, также связанное с высотой передатчика. Это приводит к тому, что вместо двух локальных максимумов наблюдается только один. В данных же, которые получены при высоте передатчика 20 метров, можно увидеть оба максимума.

Таким образом, выполнение наземных работ позволяет получить более детальную картину при исследовании локальных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. По результатам сопоставления данных наземных электроразведочных систем и аэрокомплекса «Экватор» можно сделать следующие выводы:

 – система «Экватор» обеспечивает эффективные измерения как во временной, так и в частотной области;

 чувствительность и разрешающая способность системы «Экватор» практически не уступает данным наземной съемки при заметно больших производительности и плотности наблюдений (частота измерений 6,61 Гц, скорость на маршруте 155 км/час);



Съемочные профили: 1 — «Цикл-5», 2 — «Экватор» 20 м, 3 — «Экватор» 50 м. Цветовая подложка — амплитуда отклика (поле В) в канале 122,5 мкс системы «Экватор»



гис. 7. Сопоставление вертикальной составляющей dB/dt во временных каналах системы «Экватор» при полёте на высоте 50 м (вверху),

на высоте 20 м (в центре), и в каналах системы «Цикл-5» (внизу)

 возможность использования различных алгоритмов вычисления параметров среды как во временной, так и в частотной области позволяет более адекватно оценивать их в зонах с повышенной электропроводностью.

При этом использование в качестве носителя летательного аппарата, помимо высокой производительности работ, обеспечивает возможность выполнения комплексной съемки без существенного увеличения затрат, за счет добавления магнитного, спектрометрического и других каналов.

Благодарность

Авторы выражают глубочайшую признательность коллективам компаний «Геосондаш», ЗАО «Геотехнологии» и Норильского филиала ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинсокго, выполнявшим геофизические работы в Республике Ангола, данные которых приведены в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В., 2010, Новая вертолетная аэроэлектроразведочная система «Экватор» для метода АМПП: Приборы и системы разведочной геофизики, **2**(32), 9-11.

2. Вунда Т.М., 2010, Геолого-вещественные особенности формирования кимберлитов трубки Лорелей (Ангола): Науковий вісник НГУ, 3, 56-58.

3. Жданов М.С., 1986, Электроразведка: Учебник для вузов: М. Недра, 316 с.

4. Захаркин А.К., Логинов В.В. Результаты опытных работ по оценке технических возможностей аппаратуры Цикл-5: http://www.eltageo.ru/tc5/reportn.htm

приятиями алмазодобывающей промышленности.

5. Стогний В.В., Коротков Ю.В., 2010, Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов: Новосибирск изд-во «Малотиражная типография 2D», 121 с.

6. Fraser D.C., 1978, Resistivity Mapping with an Airborne Multicoil Electromagnetic System: Geophysics, 43 no. 1, 144-172.

7. Karshakov E., Volkovitsky A., Tkhorenko M., 2013, Receiver Positioning by Means of EM Field Measurements: Papers of the 13th SAGA Biennial & 6th International AEM Conference. Mpumalanga, South Africa, 4 p.

8. McNeill J.D., 1980, Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers. Technical note TN-6: Geonics Limited, 1745 Meyerside Drive, Unit 8, Mississauga, Ontario, Canada, 15 p.

9. McNeill J.D., 1983, EM34-3 Survey Interpretation Techniques. Technical note TN-8: Geonics Limited, 1745 Meyerside Drive, Unit 8, Mississauga, Ontario, Canada, 17 p.

10. Volkovitsky A., Karshakov E., 2013, Airborne EM Systems Variety: What Is the Difference: Papers of the 13th SAGA Biennial & 6th International AEM Conference. Mpumalanga, South Africa, 4 p.

РЕЦЕНЗЕНТ – П.С. Бабаянц.



ОБ АВТОРАХ

Каршаков Евгений Владимирович

Старший научный сотрудник Института проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, кандидат физико-математических наук. В 1998 году окончил Московский государственный университет. Специалист в обла-

сти аэрогеофизических технологий. Автор более 50 научных работ.



Мельников Петр Валерьевич

Феликс

Жоао Тунга

Начальник департамента гео-

логии ГРО «Катока», кандидат экономических наук. Окончил

Санкт-Петербургский Горный

Институт. Специалист в области геологии, экономики, ор-

ганизации и управления пред-

Геофизик Норильского филиала ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского. В 2001 году окончил Томский политехнический университет. Специалист в области геофизических методов поисков и разведки полезных ископаемых.

Автор 11 научных работ.

Автор более 50 научных работ.



Ванчугов Виталий Александрович

Инженер-геофизик фирмы «Геосондаш». Специалист в области электромагнитных исследований. Автор 10 научных работ.