

Секция №2, стендовый

УДК

APPLICATION OF THE FREQUENCY DOMAIN ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS METHOD (FDEMS) FOR GEOLOGICAL MAPPING AND MINING EXPLORATION

Ingerov I.¹, Rudak T.¹, Ermolin E.²

¹ – Advanced Geophysical Operations and Services Inc. (AGCOS), Toronto, Canada,

² – National Mineral Resource University (NMRU), Saint-Petersburg, Russia.

The electromagnetic (EM) methods in the frequency domain (FDEM) have become increasingly popular in the past decade due to their high resolution and sensitivity, as well as high immunity to EM noise. They could be separated in two groups:

- Shallow FDEM profiling techniques which use high frequency bands and mainly utilize only the magnetic components of the EM field (Geonics, Nimrat, Novosibirsk);
- Electromagnetic soundings in wide depths intervals, consisting of two sub methods: the impedance soundings (CSAMT); and the individual components EM soundings (FDEMS). The last sub method combines geometric and induction soundings techniques.

Both electromagnetic soundings sub methods actively use magnetic and electrical EM field components and, whereas in the CSAMT only the far zone of the control source is being used, the FDEMS engages all three control source zones: nearest, middle and far. Such feature provides a number of significant advantages during field data interpretation. At the present time, hardware capabilities of recently developed wideband (50 000 - 0.0001 Hz) multifunction EM data acquisition systems allow to take full advantage from the application of the high resolution FDEMS method for solving a variety geological engineering and groundwater exploration tasks.

Key words: frequency domain electromagnetic soundings with control source, electroprospecting, apparent resistivity

О СВОЕВРЕМЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ В ПРАКТИКУ КАРТИРОВОЧНЫХ И ПОИСКОВЫХ РАБОТ МЕТОДА ЧЭЗ

Ингеров И.А.¹, Рудак Т.В.¹, Ермолин Е.Ю.²

¹ – Advanced Geophysical Operations and Services Inc., Торонто, Канада,

² – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург.

Электромагнитные (ЕМ) зондирования в частотной области в последнее десятилетие приобретает все большую популярность. Это связано с высокой чувствительностью и разрешающей способностью метода, а также с его высокой помехозащищённостью. ЕМ методы, использующие частотную область, можно четко разделить на две группы:

- малоглубинные методы электропрофилирования, применяющие высокие частоты ЕМ поля. В этих методах преимущественно используются магнитные компоненты ЕМ поля (Геоникс, Нимрат, Новосибирск);
- электромагнитные зондирования в широком диапазоне глубин, включающие в себя две группы методов: импедансные зондирования (CSAMT) и компонентные зондирования (ЧЭЗ), объединяющие в себе геометрический и индукционный способы зондирований.

Обе группы методов активно используют как магнитные, так и электрические компоненты ЕМ поля, при этом CSAMT использует только дальнюю зону контролируемого источника, а ЧЭЗ – дальнюю, среднюю и ближнюю зоны этого источника, что дает ряд существенных преимуществ при интерпретации полевых данных. Высокая разрешающая способность может быть в полной мере реализована в настоящее время при инженерных изысканиях и поисках подземных вод с появлением на рынке широкодиапазонного (50 000 - 0.01 Гц) многофункционального аппаратурно-программного комплекса.

Ключевые слова: Частотные электромагнитные зондирования с контролируемым источником, электроразведка, удельное электрическое сопротивление

Методы исследований на переменном токе можно четко подразделить на две группы:

- малоглубинные методы электропрофилирования, применяющие высокие частоты ЕМ поля. В этих методах преимущественно используются магнитные компоненты ЕМ поля (Геоникс, Немфис, Новосибирск). В основном эти методы включают мало глубинные исследования с использованием преимущественно магнитных компонент поля в диапазоне 100 000 – 1000 Гц. [3];
- электромагнитные зондирования в широком диапазоне глубин, включающие в себя две группы методов: импедансные зондирования (CSAMT) и компонентные зондирования (ЧЭЗ), объединяющие в себе геометрический и индукционные способы зондирований.

CSAMT, известен с 80-х годов прошлого столетия [7], как метод позволяющий продолжить магнитотеллурические зондирования в область высоких частот. Преимущественно метод подразумевает использование электрического питающего диполя (АВ) и измерения в экваториальной области дальней зоны параллельной электрическому диполю электрической компоненты E_{xy} и ортогональной этому диполю магнитной горизонтальной компоненты H_{yy} . Кажущееся сопротивление ($\rho_{\text{оxу}}$) в этом случае рассчитывается как в методе МТЗ путем нормирования электрического поля на ортогональное ему магнитное.

Метод частотных зондирований (ЧЭЗ-FDEMS) с контролируемым источником, основанный на раздельном использовании 1-5-ти компонент ЕМ поля [6], был разработан 50-годы прошлого столетия и активно применялся в бывшем СССР в 50х-90х того столетия. Тогда были созданы низкочастотный (100 - 0.01 Гц), среднечастотный (2000 - 1 Гц) и высокочастотный (10 000 – 70 Гц) комплекты аппаратуры, а также были разработаны методы интерпретации полевых данных [4]. Параллельно, был создан сверх частотный (1 500 000 – 1000 Гц) комплекс для инженерных изысканий в строительстве. Незрелость компьютерной базы стимулировала в это время развитие методов интерпретации способом характерных точек. Наличие на кривых ЧЭЗ элементов, тесно связанных с соотношением разности зондирования к глубине залегания высокоомной опорной

границы обеспечило методу высокую точность картирования границ высокоомных опорных горизонтов. Это свойство метода в гораздо большей степени может быть реализовано в настоящее время на базе современной высокоточной многофункциональной широкодиапазонной аппаратуры.

Методика полевых работ в методе ЧЭЗ

Как правило, при полевых работах используется заземленный питающий электрический диполь, а в экваториальной области на разносах в 2-10 раз превышающих глубину исследований измеряются параллельная диполю горизонтальная электрическая компонента (E_{xy}), также производная по частоте вертикальной магнитной компоненты ($\partial B_{zy}/\partial \omega$). Эти две компоненты EM поля являются наиболее чувствительными к изменениям параметров геoeлектрического разреза. С точки зрения производительности нередко производятся измерения только осевой горизонтальной электрической компоненты (E_{xx}). В любом случае в пунктах измерений производится регистрация амплитуды сигнала и дифференциального фазового параметра, представляющего собой нормированный на частоту сдвиг фаз между 1-й и 3-й гармониками сигнала ($\Delta\phi_{\omega}$). Физический смысл этого параметра описывается (1) и представляет собой сумму фазы сигнала минус нормированная на частоту его производная по частоте (5):

$$(\Delta\phi_{\omega}) = \phi_{\omega} - \omega \times \partial\phi_{\omega}/\partial\omega \quad (1);$$

$$P = k \times \Delta U / I \quad (2)$$

Использование дифференциального фазового параметра позволяет не только получить более разрешенные (дифференцированные) по частоте фазовые кривые, свободные от статистического эффекта. Кажущееся сопротивление (P) в методе ЧЭЗ вычисляется путём деления нормированного на геометрический коэффициент (k) сигнала в точке наблюдений (ΔU) на ток в контролируемом источнике (I) по формуле (2). Построенные на билогарифмическом бланке кривые кажущегося сопротивления и изображенные на полулогарифмических бланках кривые дифференциального фазового параметра являются объектом интерпретации.

Особенности кривых ЧЭЗ над высокоомным опорным горизонтом

На Рис. 1 изображены двухслойные амплитудные (ρ) и фазовые ($\Delta\phi$) кривые для электрической и магнитной компонент EM поля экваториальной установки. Соотношение разноса зондирования к глубине залегания опорного горизонта равно 4. Для разреза с высокоомным основанием на амплитудных кривых наблюдаются горизонтальная асимптота, соответствующая сопротивлению первого слоя, за которой следует пологий максимум, ниспадающая ветвь, четкий минимум, крутая восходящая ветвь и максимум. При этом для магнитной компоненты максимум очень четкий, за которым следует ниспадающая ветвь с выходом на асимптоту ближней зоны, падающей под углом 45° .

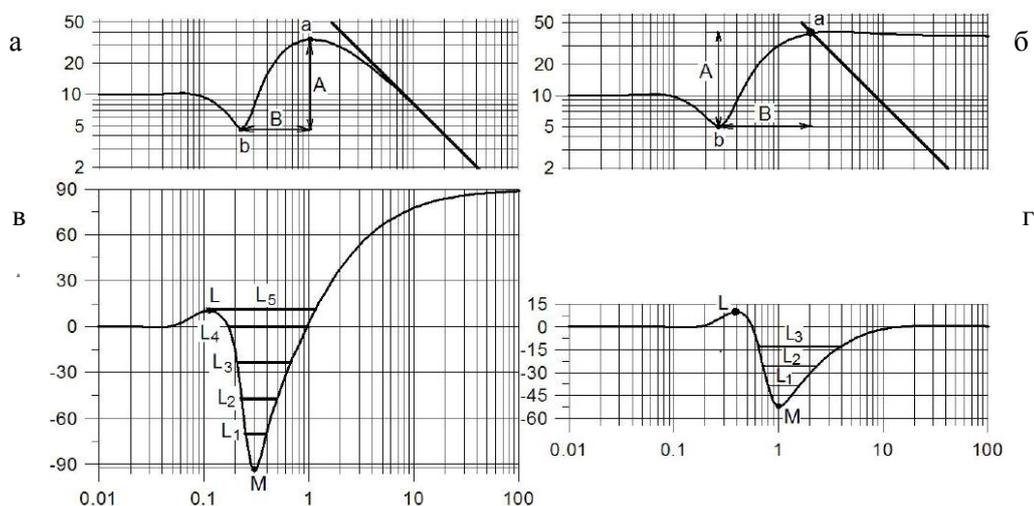


Рис. 1. Амплитудные и фазовые кривые ЧЭЗ вертикальной магнитной компоненты ($\partial B/\partial\omega$) (а, в) и горизонтальной электрической компоненты (E_x) (б, г) над двухслойным разрезом с высокоомным вторичным горизонтом

Положение асимптоты ближней зоны описывается уравнением (3). Ее положение определяется только разносом зондирования (R) и не зависит от характера геоэлектрического разреза.

$$P_{\omega} = 1.3 \times R \times f \quad (3);$$

$$S = R/\rho_{as} \quad (4);$$

$$C = \rho_{min}/R2 \times f_{min} \quad (5)$$

В отличие от магнитной компоненты на электрической компоненте наблюдается очень пологий максимум и далее очень медленный выход на горизонтальную асимптоту. Ордината этой правой асимптоты однозначно определяет суммарную продольную проводимость (S) низкоомных пород, залегающих над высокоомным опорным горизонтом (4).

На практике удобнее использовать вместо ρ_{as} , ординату точки пересечения амплитудной кривой для электрической компоненты с асимптотой ближней зоны ρ_a (Рис. 1). Информация о величине H выражена в соотношении разноса зондирования (R) к глубине залегания опорного горизонта (H). С последним параметром тесно связаны параметры A , B , C на амплитудных кривых. Параметры A и B показаны на Рис. 1, а параметр C определяется по формуле (5). Для фазовых кривых с отмеченным параметром тесно связаны ордината минимума $\Delta\phi_{min}$, а также ширина минимума на некоторых расстояниях от его экстремальной точки Рис. 1.

Практические примеры применения - Томаковская площадь Украинского щита

Полевые работы выполнены в 1978-1979 годах [1]. Применялась аппаратура НЧЭЗ-73, частотный диапазон 10 000-70Гц. Применялись разносы зондирования 100 и 200м. Средняя точность определения ρ_{ω} составила 4.7%. Задачей зондирования было картирование поверхности неразрушенного кристаллического фундамента, покрытого мощной каолиновой корой выветривания и четвертичными осадочными породами. Суммарная мощность низкоомных отложений колебалась от 10 до 100м. Тип разреза низкоомных отложений существенно изменялся по площади от двух слойного до четырех слойного КНА. Типичные амплитудные кривые ЧЭЗ для разносов 100 и 200 м приведены на Рис. 2. Применение методов экспресс интерпретации с использованием двухслойных зависимостей для параметров A , B , C составило порядка 10%. Использование статистического способа интерпретации с выборкой по 43 скважинам позволило снизить среднюю погрешность определения глубины залегания кристаллических пород до 8%. Разделение обучающей выборки на три класса: двухслойные, трехслойные типа H , четырехслойные типа H_d позволило снизить среднюю ошибку до 6%. Было установлено, что снижению средней ошибки определения H способствует применение двухразносных зондирований, а также измерение двух компонент электромагнитного поля (горизонтальной электрической и вертикальной магнитной).

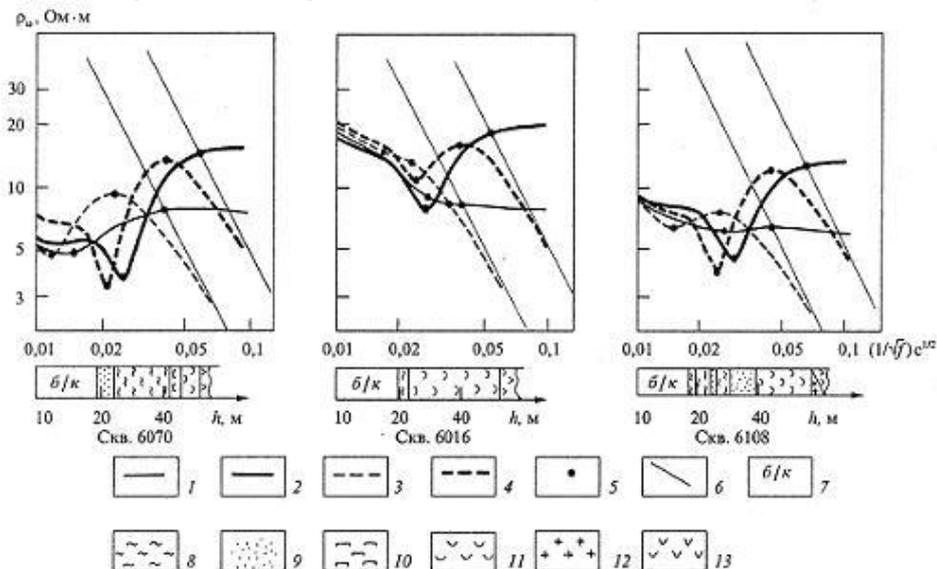


Рис. 2. Типичные кривые ЧЭЗ на Томаковской площади. Слева направо: А-скважина #6170, тип А; В-скважина #6016, тип Н, С-скважина #6108, тип НА; 1. E_x , $R=100$ м; 2. E_x , $R=200$ м, 3. $\partial Bz/\partial\omega$, $R=100$ м, 4. $\partial Bz/\partial\omega$, $R=200$ м; своеобразные точки на кривых удельного сопротивления; асимптота ближней зоны; 7- интервал бурения без керна; 8- сланец, 9- песок; 10- каолин; 11- кора выветривания (в основном каолин); 12- граниты; 13 – амфиболиты

Практические примеры применения - Днепровская площадь Украинского щита

На Днепровском участке работы методом ЧЭЗ были выполнены аппаратурой ЭВА-203 и НЧЭЗ-73 [2]. Разносы зондирований составляли 200, 300, 400 метров. Глубина залегания кристаллического фундамента колебалась в пределах 60-300м. Аппаратура ЭВА наряду с амплитудными измерениями позволяла осуществлять дифференциальные фазовые измерения. Примеры амплитудных и фазовых кривых для 3-х разносов (300-400-600м) приведены на Рис. 3.

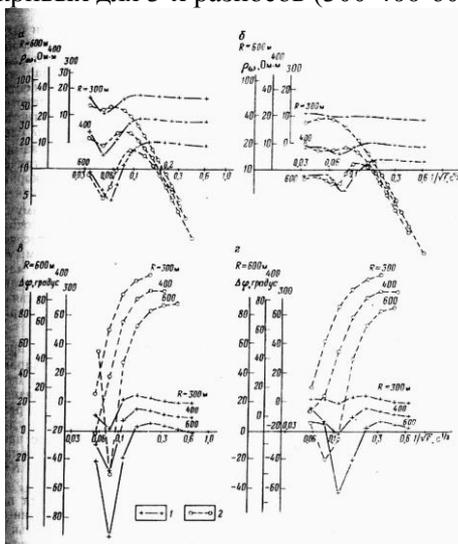


Рис. 3. ЧЭЗ кривые ρ_{ω} и $\Delta\varphi_{\omega}$ полученные по результатам измерений электрического (1) и магнитного (2) полей с аппаратурой ЭВА-203 при разных глубинах залегания кристаллического фундамента (а, в – 130 м; б, г – 219 м)

Дифференциальные фазовые кривые оказались очень благоприятным объектом для интерпретации материалов ЧЭЗ. Сочетание амплитудных и фазовых кривых для двух компонент поля по трем разносам позволило достичь точности картирования поверхности фундамента в 2%.

Выводы

Метод ЧЭЗ обладает повышенной точностью картирования высокоомных границ. Повышению точности картирования границ способствует:

- выполнение амплитудных и фазовых измерений;
- измерение двух компонент электромагнитного поля;
- применения нескольких разносов зондирования.

Очевидно, что при применении современной высокоточной многофункциональной аппаратуры точность картирования границ может быть значительно улучшена.

1. Ingerov A.I., Soldatenko, V.P. About accuracy of the depth of high resistive reference horizon estimation by methods of frequency electromagnetic sounding // The reports of National Academy of Science of Ukraine, 1998, 12, 123-128
2. Gorunov A.S., Ingerov A.I., Kulikov A.V. Equipment EVA-203 application for Frequency Electromagnetic sounding // Application Geophysics, 1987, 117, 62-69
3. Manstein, A.K., Panin, G.L., Tikunov, Yu, S. A device for shallow frequency-domain electromagnetic induction sounding // Russian Geology and Geophysics, 2008, 49: 430-436
4. Ivanov, A.P. Frequency Electromagnetic Sounding // Academy of Science of USSR, Institute Physics of the Earth, 1983, 227 pgs
5. Kulikov A.V., Shemyakin E.A. Electroprospecting by Phase Method of Induced Polarization // Moscow, "Nedra", 1978, 248 pgs
6. Vanyan L.L., The bases of electromagnetic soundings // Moscow, "Nedra", 1965, 105 pgs
7. Zonge, K.L., Hughes, L.J. Controlled source audiofrequency Magnetotellurics. In Nabighian, M.N. (Ed.) // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Volume 2, Applications: Parts A and Part B, Society of Exploration Geophysicists Investigations in Geophysics 3, 1991, 713-809, Doi: 10.1190/1.9781560802686.ch9