

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРИОЛЬХОНЬЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ И ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ЭМЗВП)

Давыденко Ю.А.^{1,2}, Снопков С.В.³, Костюченко А.А.¹, Прудникова И.С.¹

¹ - Иркутский государственный технический университет, Иркутск,

² - Институт земной коры СО РАН, Иркутск,

³ - Центр развития дополнительного образования детей Иркутской области, Иркутск.

В рамках разработки аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» в Приольхоне были проведены площадные электроразведочные работы по технологии электромагнитных зондирований и вызванной поляризации (ЭМЗВП). Помимо чисто технических задач, возникающих при пуско-наладочных работах, оценивалась минимальная глубина исследований и разрешающая способность технологии ЭМЗВП. В качестве эталонного объекта был выбран археологический памятник «Курминское озеро-2», выделенный по данным детальной магнитной съемки. На данном участке площадью 10x10 м., на глубине до двух метров расположены ямные сыродутные железовосстановительные горны. В результате была выполнена площадная съемка в объеме около 450 точек зондирования: установкой срединного градиента регистрировались переходные процессы до 125 мс. Инверсия данных ЭМЗВП в рамках параллельнослоистой поляризующейся модели показала чувствительность к изменению геоэлектрических параметров в пределах первых 2-х метров, а на глубине около 20 м уверенно выделяется графитизированный проводящий слой.

Ключевые слова: электромагнитные зондирования вызванная поляризация, срединный градиент, переходные процессы, сыродутные железо-восстановительные горны.

1-2 июня 2013 г. проведены опытно-методические работы по технологии ЭМЗВП, главной целью которых являлось тестирование возможности использования аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» для решения задач инженерной геофизики и выполнения археологических исследований.

В ходе проведения опытных работ решались следующие задачи:

- Проверка стабильности работы измерительной системы на самой высокой частоте дискретизации в 100 кГц
- Тестирование измерительной системы в комплектации с генератором с токовой стабилизацией
- Испытание опытного образца приемной косы
- Оценка чувствительности и разрешающей способности технологии ЭМЗВП в области малоглубинных исследований.

Опытные работы проводились в малонаселенном районе, в 280 км от г. Иркутска на берегу озера Байкал (район Малого Моря, залив Курма). Исследовался археологический памятник «Курминское озеро - 2», который находится в 1,8 км к северу от д. Курма, вблизи дороги «Курма - Зама». В центре участка находится ряд слабовыраженных изометричных и вытянутых вдоль склона углублений (рис. 1б). По всей территории участка (более 1500 м²) обнаруживаются кусочки шлаков. Результаты, полученные при проведении магнитометрических съемок в течение предыдущих лет, свидетельствуют о сложной структуре магнитного поля участка (рис. 1а). В рамках аномальной зоны выделяется 9 локальных аномалий (с интенсивностью более 200 нТл), интерпретируемые как металлургические горны.

Результаты проведенных ранее археологических раскопок и магниторазведочных исследований показали, что в Приольхонье на рубеже эр использовались ямные сыродутные железовосстановительные горны [2]. Радиоуглеродное датирование показало, что деятельность этих металлургических центров относится к концу I тыс. до н. э. - началу I тыс. н. э. Рабочая камера таких горнов сооружалась в плотном суглинке, на краю ямы либо канавы, глубина которых достигала 1,5 метров. Рабочая камера имела воронкообразную форму (похожую на перевернутую наклонную треугольную пирамиду, с закругленными ребрами). Верхнее отверстие рабочей камеры горна выходило на дневную поверхность, а нижнее - в пригорную яму, на глубине 1,0 - 1,4 м. Нижнее отверстие горна закрывалось куполообразным, каменно-кирпичным сооружением. Фрагменты такого сооружения были обнаружены во время раскопок у нижнего отверстия рабочей камеры одного из горнов металлургического центра Курминское озеро - 1. Фрагменты глиняной обмазки с отверстиями для сопел

(диаметр 3-4 см) свидетельствуют о том, что использовался не только естественный, но и принудительный поддув воздуха.

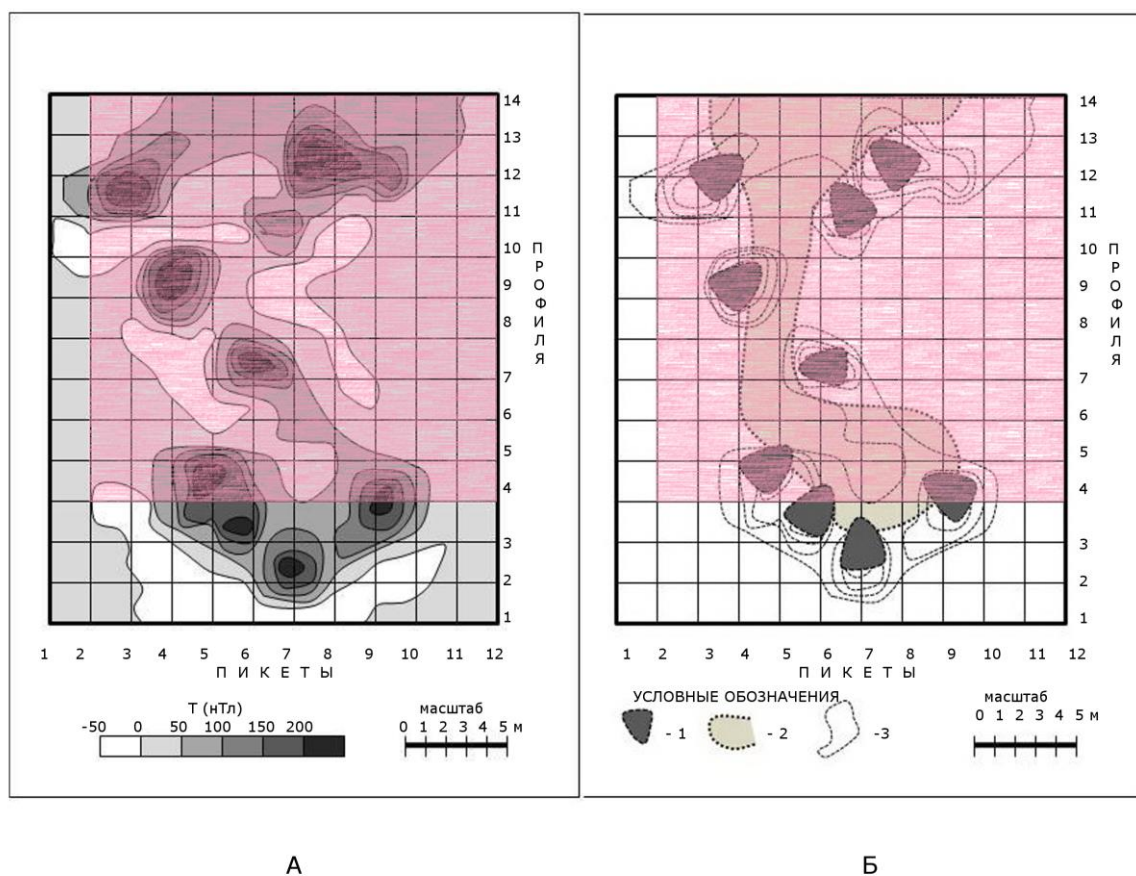


Рис. 1. Результаты магнитометрических съемок (а) и схема предполагаемого строения металлургического центра (б) на участке Курминское озеро - 2. Розовым цветом отобран участок, о котором были выполнены детальные электроразведочные работы по технологии ЭМЗВП .

Технология ЭМЗВП предполагает регистрацию полной формы переходного процесса от горизонтального электрического диполя с помощью заземленной линии [1]. Измерения проводились установкой срединного градиента с юго-западной стороны от силовой линии АВ на расстоянии около 100 метров. Генераторный диполь АВ из геофизического провода ГПМП длиной 200м был протянут поперек проселочной дороги с юга-востока на северо-запад. Восточной заземление В из 4-х железных электродов было расположено в болотистой местности, а западное заземление А из 6-ти электродов на сухом участке, на склоне холма. В итоге сопротивлении заземления линии АВ составило 200 Ом. Силовая установка, которая состояла из бензинового агрегата мощностью 2 кВт и коммутатора ВП-1000, генерировала последовательность разнополярных, стабилизированных по току, импульсов величиной в 2 А в режиме импульс (+) – пауза- импульс(-) - пауза. Длительность токового импульса равна длительности токовой паузы и составила 125 мс.

Поверхность участка съемки имеет незначительный западный уклон, который не оказывает заметного влияния на результаты зондирований. Заземление приемных электродов производилось в первые 10-20 см грунта. Грунт на площади различный, со значительной примесью кусков шлаков и горных пород, обожженных суглинков, с высоким удельным электрическим сопротивлением (УЭС) - около 30 кОм. Используемая приемная аппаратура состоит из 4-х канального измерительного модуля с 18-ти разрядным АЦП последовательного приближения с частотой дискретизации 100 кГц. Проводилась непрерывная запись серии разнополярных импульсов длительностью около двух минут, за это время регистрировалось более 200 переходных процессов в токовой паузе. Четырьмя измерительными каналами одновременно регистрировался сигнал, поступающий через приемную косу от четырех разносов M_1N_1 , M_2N_2 , M_3N_3 и M_4N_4 , с расстоянием в 0,5 м между электродами.

Приемными линиями, параллельными силовой линии АВ, были отработаны профили с 14 по 4, кроме того, с целью уменьшения влияния на процесс становления электромагнитной индукции 4-ый профиль был отработан ортогональной установкой, когда приемные электроды располагались

перпендикулярно линии АВ. Для данных, записанных ортогональной установкой, уже в процессе регистрации стало очевидным влияние на амплитуду поля в момент пропускания тока близповерхностных неоднородностей (горнов) (рис. 2), в то время, как переходные процессы, записанные на том же участке при параллельном расположении приемных линий, отличаются относительной стабильностью.

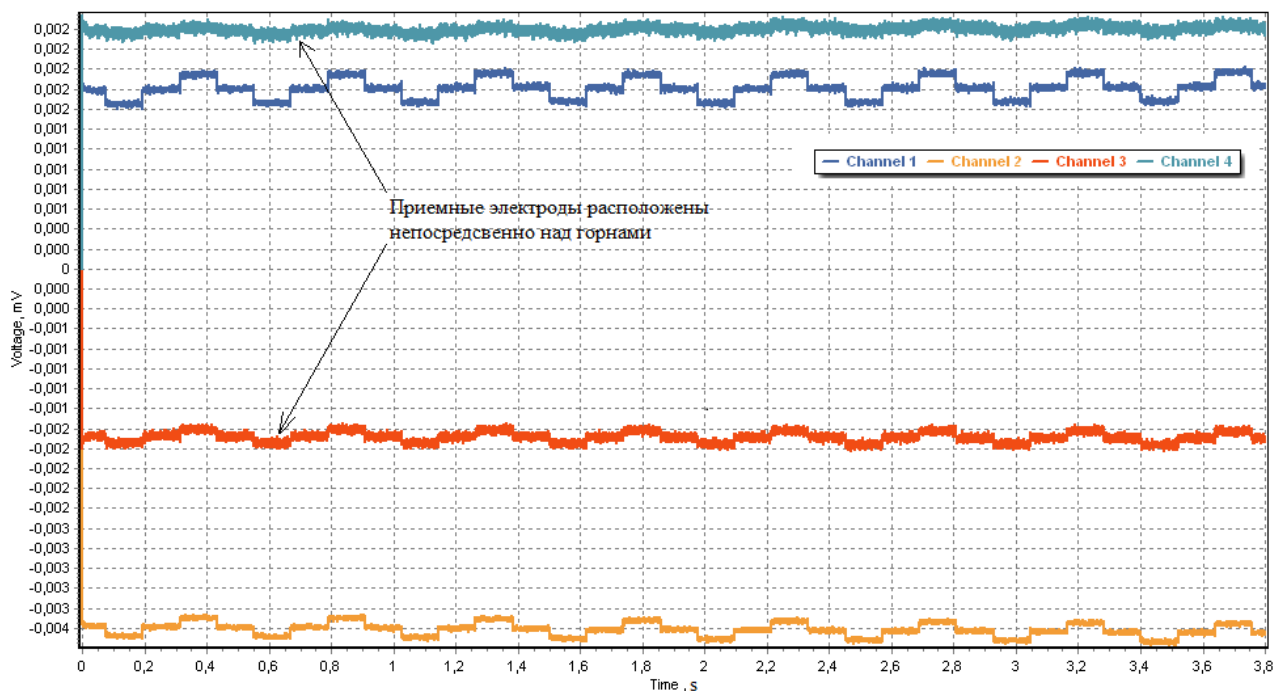


Рис. 2 Пример регистрации полной формы переходных процессов для ортогонального расположения приемных линий M_1N_1 - M_4N_4 (Channe 1 - Channe 4) относительно генераторной линии АВ.

В ходе тестовых измерений было записано 448 физ. наблюдений, из которых:

- 420 физических наблюдения записаны параллельно питающей линии и 8 контрольных наблюдений;
- 20 физических наблюдения записаны перпендикулярно питающей линии.

Таблица 1. Геоэлектрическая модель, полученная в результате подбора с учетом частотной дисперсии электропроводности.

N, номер слоя	ρ_0 , Ом*м	η , %	τ , с	c	Мощность слоя h, м	Глубина подошвы z, м
1	168.3	45	5	0.4	1	1
2	421	47.5	10	0.6	0.4	1.4
3	319	0.03	0.1	0.6	17.2	18.6
4	1.1	47.7	10	0.6	1.8	20.4
5	1038.7	2.39	10	0.6	9.7	30.1
6	10000	0	0.01	0.6		

Среднеквадратическое отклонение между полевой и модельной кривыми: 9.7%

Во время выполнения опытных работ часть полевого материала была обработана, и в программе Mars 1D сделана выборочная инверсия кривых ЭМЗВП в рамках одномерной поляризующейся модели с использованием частотной зависимости удельного электрического сопротивления. Расчеты осуществляются путём использования комплексных, зависящих от частоты удельных электрического сопротивления и электропроводности. Наиболее известным и часто применяемым представлением частотной характеристики вызванной поляризации вещества, удовлетворяющей большинству

экспериментальных дисперсионных зависимостей, является формула Коул-Коул [3]. Для комплексного удельного сопротивления [5] и удельной электропроводности [4] она имеет вид:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\},$$

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{1 + (i\omega\tau)^c}{1 + (1 - \eta)(i\omega\tau)^c},$$

где, $-j = \sqrt{-1}$, ρ_0 удельное электрическое сопротивление и электропроводность на постоянном токе, (См/м); η - поляризуемость $0 \leq \eta \leq 1$, τ - время релаксации (с); c - показатель степени $0 < c \leq 1$. Таким образом, количество определяемых в результате инверсии параметров для каждого слоя возрастает в 2.5 раза: к удельным сопротивлениям и мощностям пластов добавляются еще три поляризационных параметра.

В результате подбора подтвердилась высокая чувствительность кривой зондирования к геоэлектрическим параметрам верхней части разреза, где с помощью автоматической инверсии выделяются слои мощностью около метра. Для того, чтобы выделить горны, в модели используется два верхних слоя толщиной до 2 м. Мощность проводящего, вероятно графитизированного слоя, ограничена двумя метрами на глубине около 20 м (Таблица 1). Массовый полуавтоматический подбор показал устойчивость данной модели, среднеквадратическая невязка, как правило, не превышала 10%. Столь высокое значение невязки обусловлено переходом кривой ЭДС через ноль и не говорит о низком качестве подбора.

Полученные результаты дают основание считать, что материалы могут быть использованы для дальнейшей количественной интерпретации в рамках как одномерных, так и трехмерных моделей с учетом частотной дисперсии электропроводности. Зарегистрированные массовые данные свидетельствуют о высокой разрешающей способности аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс», пригодного для решения задач рудной и инженерной геофизики, выполнения археологических исследований и поисков рассыпных полезных ископаемых и высокой производительности технологии ЭМЗВП.

Литература

1. Давыденко Ю.А., Давыденко А.Ю., Куприянов И.С., Пестерев И.Ю., Попков П.А., Слепцов С.В., Яковлев С.В. Эффект интеграции робастного регрессионного анализа с инверсией для переходных процессов в методе срединного градиента при изучении трубок взрыва на Анабарском щите // Записки горного института, Санкт-Петербург, 2013. Т. 200. С. 28-33..
2. Харинский А.В., Снопков С.В. Производство железа населением Приольхонья в елгинское время // Известия Лаборатории древних технологий.- Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2004. Вып. 2. - С. 167-187.
3. Cole K.S., Cole R.H. Dispersion and absorption in dielectrics // J. Chem. Phys. – 1941. –v.6. – P. 341-353.
4. Lee T. Transient response of a polarizable ground // Geophysics. – 1981. – Vol. 46. - N 7. – p. 1037-1041
5. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. – Vol. 43. – NO 3. – 1978. – P. 588-609