

4. Уайт Дж.Е. Возбуждение и распространение сейсмических волн. М.: Недра, 1986 г.
5. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low frequency range. J. Acoust. Soc. Amer. 1956. V.28. №1. P. 168-178.
6. Liu H and Johnson D.L.. Effects of an elastic membrane on tube waves in permeable formations. J. Acoust. Soc. Amer. 1997, v.101. №С p.3322-3329.

**ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА В АРХЕОЛОГИИ: МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ
СЛАБЫХ АНОМАЛИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ИНВАРИАНТОВ ТЕНЗОРА СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ
ОБЪЕКТА БОРОДИНО**

Павлова Александра Михайловна

Геологический ф-т МГУ, Москва, wild-bat@yandex.ru

Геофизика широко используется в археологических изысканиях уже более 60-ти лет, в основном, при поиске археологических памятников, поскольку геофизические методы позволяют исследовать большие площади без ведения археологических раскопок, которые очень трудоемки и требуют больших финансовых затрат. Огромная роль геофизики основывается на высокой чувствительности геофизических методов к различиям в свойствах археологических объектов и покрывающих их толщ. Одним из методов поиска археологических объектов является электроразведка (часто в комплексе с магниторазведкой).

В МГУ кафедра геофизики занимается археологическими исследованиями с 71-ого года на таких объектах, как, например, Царицыно, Коломенское, Гнездово. Работы на объекте Бородино ведутся уже в течение 5 лет. Летом и осенью 2008 года электроразведочные работы продолжались, и за это время было сделано несколько площадных съемок методом ЭП-СГ (участок «Горки», участок «Семеновское 1» и участок «Семеновское 2»), несколько профилей электротомографии (один на участке «Семеновское 1», два на участке «Семеновское 2» и длинный профиль «Овраг»), как по результатам площадных съемок, так и независимо).

При проведении работ методом ЭП-СГ на каждой площади использовалось два перпендикулярно расположенных друг к другу направления питающей линии. Поскольку известно, что высокоомное линейно вытянутое тело наиболее чувствительно к перпендикулярному распространению тока, то любая такая аномалия на карте будет зависеть от направления питающей линии

АВ. Чтобы избавиться от этой зависимости можно использовать несколько так называемых пространственных инвариантов тензора сопротивлений [2].

Так как электрическое поле и плотность тока являются векторами, то в общем случае из дифференциальной формы закона Ома сопротивление является тензором. Закон Ома и тензор сопротивлений:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j}, \quad \rho = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{bmatrix}$$

Самыми распространенными пространственными геоэлектрическими инвариантами этого тензора являются детерминант \det , сумма квадратов элементов тензора ssq и след $trace$, в простейшем случае практически без потери качества соответствующие им сопротивления ρ_{det} , ρ_{ssq} и ρ_{trace} можно выразить, используя только главные компоненты:

$$\rho_{det} = \sqrt{\rho_{xx}\rho_{yy}}, \quad \rho_{ssq} = \sqrt{1/2\rho_{xx}^2 + 1/2\rho_{yy}^2}, \quad \rho_{trace} = 1/2(\rho_{xx} + \rho_{yy})$$

Таким образом, для получения этих инвариантов, на каждой площади съемка была проведена дважды с разными направлениями питающей линии, перпендикулярными друг другу. Затем все участки были обработаны на основе этой теории и получены карты инвариантов, которые дали возможность выделить и усилить слабо проявившиеся аномальные объекты и уточнить их геометрию. При обработке данных, полученных в Бородино, было проверено, что карты всех трех инвариантов мало отличаются друг от друга, поэтому в дальнейшем при оценке аномальных зон использовался только один из них - \det . Это сократило время, затрачиваемое на обработку и отрисовку результатов в виде карт.

Прежде чем вычислять инвариант, необходимо было избавиться от методических помех, вызванных использованием нескольких измерительных приборов при съемке для увеличения производительности, так как каждый прибор имел свои характеристики. Для этого подсчитывалось среднее значение кажущегося сопротивления по профилю – его вес, а затем в данные каждого профиля вводилась поправка за отклонение этого веса от среднего уровня по всему участку, тем самым учитывалось не только различие в показаниях разных приборов, но и возможное сползание характеристик приборов во времени. Эта процедура выполнялась для каждого участка дважды для каждого положения питающей линии. После строились графики зависимости среднего сопротивления на каждом профиле, и рассчитывался инвариант \det . Нужно отметить, что на участке «Семеновское 1» помимо этой обработки перед осреднением была отброшена часть данных с 0 по 30 по оси Y, так как региональная аномалия на исходной карте мешала выделению слабых аномалий (рис.1).

После обработки выделилось несколько линейных зон (отмечены пунктиром на рис.1.Б.), тогда как раньше наблюдалось только две из них в

нижней части карты (рис.1.А.). Эти зоны могут быть связаны с возможными археологическими объектами (например, боевыми укреплениями), но для дальнейшей интерпретации требуются дополнительные исследования. Резкое изменение сопротивлений в районе ПК 45 по Y после обработки усиливается, частично это обусловлено остаточным влиянием на процесс осреднения части крупной аномалии высокого сопротивления в нижнем правом углу, хотя само изменение, скорее всего, связано с региональными причинами, однако, без дополнительной информации о строении участка что-либо утверждать сложно.

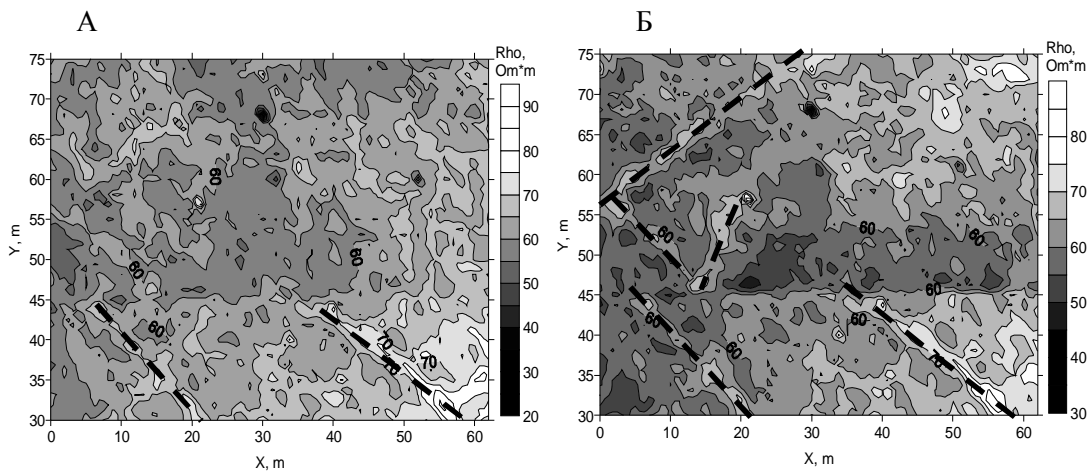


Рис.1. Карта сопротивлений ρ_{det} по участку «Семеновское 1» (сеть 1м x 1м):
 А. До осреднения;
 Б. После осреднения.

Также для проверки правильности обработки и интерпретации в этой работе была поставлена задача выяснить, как зависят получаемые аномалии от азимута питающей линии, и проверить, отличаются ли друг от друга аномалии от одного и того же объекта на карте инварианта, если меняется азимут двух перпендикулярных питающих линий, используемых для подсчета, то есть, не зависит ли распределение ρ_{det} от выбора системы координат.

При помощи моделирования в программе IE3R1 [1] путем решения прямой задачи от простого квадратного объекта (4 стены, модель «Квадрат») была графически найдена зависимость распределения сопротивлений ρ_{ii} от угла питающей линии (i – указывает на изменение азимута питающей и приемной линий, $\rho_{ii}=\rho_{xx}$ при $\alpha=0^\circ$, $\rho_{ii}=\rho_{yy}$ при $\alpha=90^\circ$)(рис.2.). Данные о модели: размеры 4м x 4м, толщина и высота стен 0.5м, глубина залегания 0.5м, сопротивление объекта 1000 Ом*м, сопротивление вмещающих пород 15 Ом*м, площадь наблюдений 8м x 8м по сети 1м x 1м, MN=1м, AB=60м.

По этим результатам видно, что при разных направлениях питающей линии одно и то же тело создает совершенно разные аномалии. Именно по этой причине целесообразно использовать пространственные инварианты, чтобы аномалия отображала настоящую геометрию тела. Ниже приведены результаты расчета инварианта det для 3-х пар перпендикулярных питающих линий с

разными азимутами (рис.3.). Из этого рисунка видно, что для любого азимута полученная аномалия достаточно точно и полно отображает геометрию объекта и с изменением азимута меняется очень незначительно, в пределах погрешности. Остальные варианты азимутов дают точно такие же картины в силу симметрии объекта. Таким образом, можно сделать вывод, что при площадных съемках, включающих методику двух перпендикулярных питающих линий, основанную на базе обработки с помощью пространственных инвариантов, выбор направлений профилей не зависит от возможных особенностей предполагаемых объектов и обработка не вносит искажения в данные.

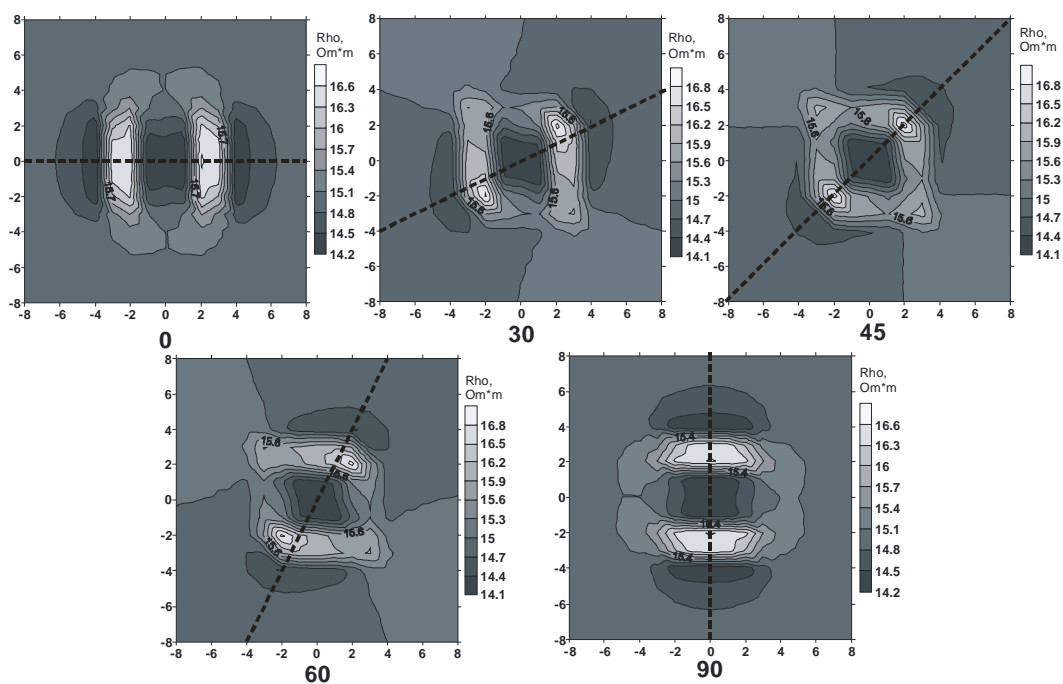


Рис.2. Карты аномалии, отражающие графическую зависимость от азимута питающей линии (азимуты 0°, 30°, 45°, 60° и 90° от горизонтальной линии, линия АВ показана пунктиром).

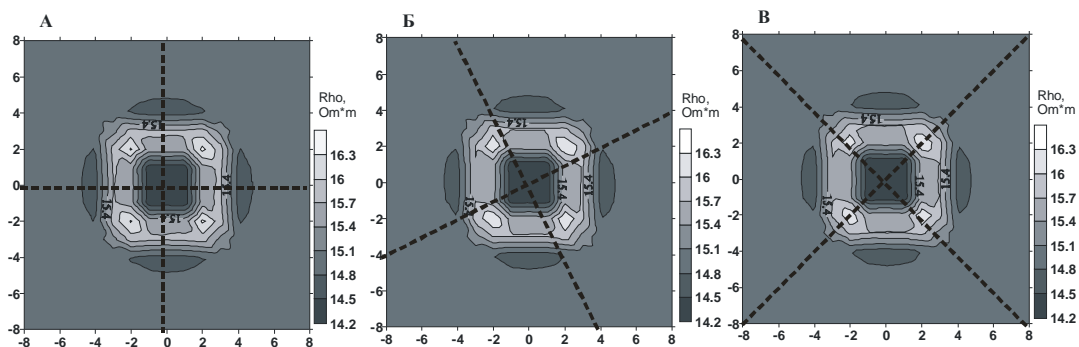


Рис.3. Карты аномалии ρ_{det} при разных азимутах питающих линий для модели «Квадрат» (питающие линии АВ показаны пунктиром):

- А. Карта сопротивлений ρ_{det} , рассчитанных при азимутах АВ 0° и 90°.
- Б. Карта сопротивлений ρ_{det} , рассчитанных при азимутах АВ 30° и 120°.
- В. Карта сопротивлений ρ_{det} , рассчитанных при азимутах АВ 45° и 135°.

Литература:

1. Электрическое зондирование геологической среды. М. МГУ, 1992, с.85-88.
2. Mihály Varga, Attila Novák and László Szarka. Application of tensorial electrical resistivity mapping to archaeological prospection // Near Surface Geophysics, 2008, 39-47.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Пятилова Анна Михайловна,

Геологический факультет МГУ, Москва anna.piatilova@mail.ru

Введение

Одной из важных задач, решаемой с помощью метода георадиолокации, является обнаружение и картирование линейно вытянутых объектов - трубопроводов различного назначения, электрических кабелей, арматуры в строительных конструкциях и т.д. Как правило, требуется определить глубины их залегания и положения в плане. В некоторых случаях требуется определить и материал, из которого эти объекты сделаны, например, выделить пластиковые и металлические трубы.

Однако в существующей практике георадиолокации используются лишь годографы дифрагированных волн, имеющих, как правило, гиперболическую форму. Анализ такого годографа проводится компарационным способом – путем сравнения с теоретическим годографом, при совпадении с которым определяется средняя эффективная скорость распространения электромагнитной волны от поверхности до верхней кромки объекта. Эти две величины вместе с положением проекции минимума гиперболы на профиль составляют весь объем информации, извлекаемой из георадиолокационной записи при возникновении дифракции. Очевидно, что далеко за рамками таких исследований остаются все вопросы, кроме позиционирования. Однако, даже при таком подходе из рассмотрения, как правило (судя по публикациям), выпадает весьма важный, хотя и простой на первый взгляд, вопрос об угле в плане между направлением профиля и простираем линейно-вытянутого объекта. Тем более что для определения направления простираемого объекта, как правило, делается несколько параллельных профилей.

Дело в том, что в наиболее распространенных программных пакетах обработки георадиолокационных данных, расчет теоретической гиперболы, которая путем подбора ее параметров совмещается с осью синфазности дифрагированной волны на временном разрезе, рассчитывается исходя из строгой перпендикулярности профиля объекту. Такой подход делает этот прием