Записки Санкт-Петербургского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т.130. СПб, 1992

УДК 550.837

В.Х.ЗАХАРОВ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ ИНДУКТИВНОМ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ

Верхняя часть земной коры в подавляющем большинстве случаев служит в той или иной степени своего рода «вторым проводом» для всего многообразия электроэнергетических схем, используемых в жизнедеятельности человека. В ней развиваются токи, вызываемые и естественными электромагнитными полями Земли. Все эти поля для традиционных методов электроразведки, основанных на исследовании полей, создаваемых специальными источниками, являются помехами и довольно часто не позволяют использовать для электроразведки традиционные методы. Вместе с тем очевидно, что сами поля-помехи также несут в себе информацию о геологической среде. Эффективное использование их для решения геологических и инженерных задач открывает путь для создания новой технологии электроразведки повышенной геолого-экономической эффективности, не нуждающейся в специальных источниках. Основной трудностью использования полей-помех для электроразведки является случайный, связанный с их многообразием характер пространственно-временных изменений их интенсивности. Эта трудность достаточно надежно преодолевается путем относительных (градиентных) амплитудно-фазовых измерений на компенсационной основе, в результате чего информация о геологической среде, отражающаяся в полях-помехах, получается практически в совершенно чистом виде [I].

Аномальное проявление геологической среды в электромагнитном поле связано с тремя видами токов:

I) с вихревыми Фуко, индуцированными в телах высокой электропроводности;

2) с индуцированным намагничиванием магнитных тел;

3) с концентрационными, распределяющимися в среде в соответствии с законами Ома и Кирхгофа.

Теоретические основы и методика использования для электроразведки первых двух видов токов рассмотрены в работе [I]. Здесь рассмотрен только третий.

В случае квазистационарного электрического поля блуждающие электрические токи в сложной геоэлектрической среде, включая антропогенные коммуникации, распределятся соответственно дифференциации различных объектов по удельной электропроводности и граничным условиям. Так, учитывая, что тангенциальная составляющая напряженности электрического поля E_t при переходе через границу раздела пород не изменяется [2], согласно закону Ома

в дифференциальной форме $j = \gamma E$, тангенциальные же составляющие плотности тока j_t, напротив, изменяются скачком в соответствии с различием контактирующих сред по удельной электропроводности γ:

$$j_{t_1}/j_{t_2} = \gamma_1/\gamma_2.$$

Это и определяет структуру распределения плотности тока проводимости в сложной геоэлектрической среде, а следовательно, и структуру напряженности магнитного поля H в соответствии с уравнением Максвелла

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{j}. \qquad (I)$$

В случае однородного поля E в однородном проводящем полупространстве (в однородных породах Земли) будет создано однородное поле плотности тока, а на поверхности Земли (в воздухе) в соответствии с уравнением (I) в плоскости, перпендикулярной плотности тока, будет наблюдаться магнитное поле напряженностью H, ориентированной параллельно поверхности Земли, и интенсивностью, пропорциональной j (рис.I,а).

В случае контакта различных по удельной электропроводности (γ_1 и γ_2) пород в них соответственно будут развиваться и различные по плотности токи (j_1 и j_2) поля.

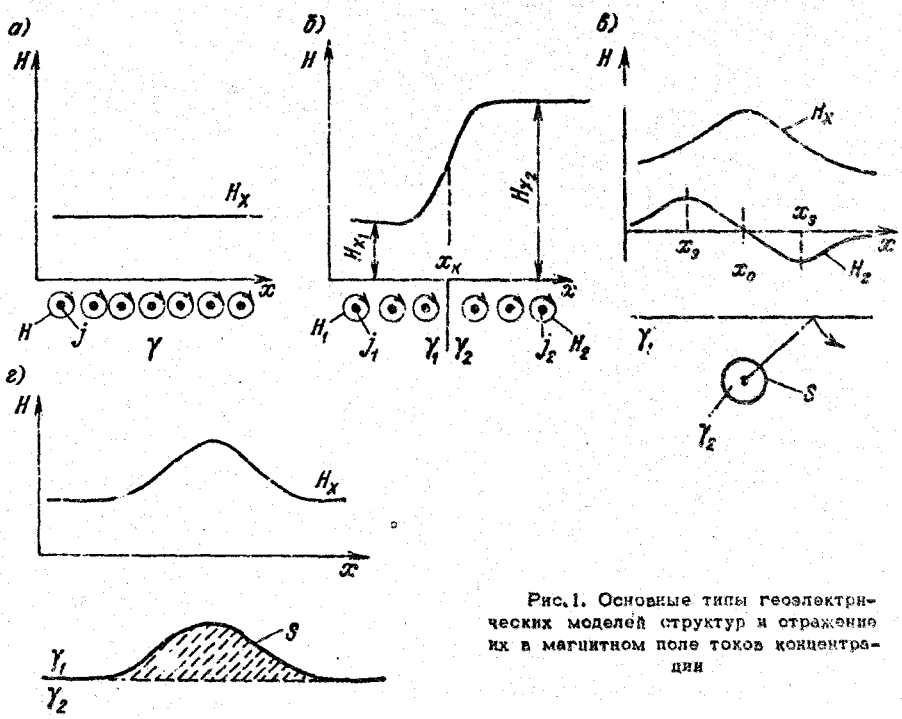


Рис.I. Основные типы геоэлектрических моделей структур и отражение их в магнитном поле токов концентрации

На поверхности Земли, по профилю вкрест простирания контакта, будет наблюдаться горизонтальная составляющая магнитного поля, характер изменения которой приведен на рис.I,б. Вдали от контакта в породах с электропроводностью γ_1 магнитное поле стремится к асимптотическому значению H_1, в породах с γ_2 – к значению H_2. Очевидно, что

$$H_2/H_1 \quad \gamma_2/\gamma_1 .$$

В прилегающем к контакту интервале поле постепенно изменяется от значения H_1 до значения H_2. Крутизна изменения связана с расстоянием от поверхности измерения поля (глубины залегания), а местоположение контакта определяется абсциссой $x_к$ (рис.I,б), в которой поле имеет напряженность $H(x_к)=(H_2+H_1)/2$.

В случае размещения в однородных породах с удельной электропроводностью γ_1 локального «рудного тела» или какой-либо коммуникации (например, трубопровода в форме горизонтального цилиндра с удельной электропроводностью γ_2), в нем по сравнению с вмещающими породами возникнет избыточная плотность тока $j_{изб} = j_2 - j_1$, которая и является причиной аномального возмущения магнитного поля данным локальным телом (рис.I,в). Значение аномального магнитного поля во внешних по отношению к цилиндру точках эквивалентно магнитному полю линейного тока, текущего по оси цилиндра, $I = j_{изб} S$, где S – площадь кругового сечения в случае сплошного цилиндра или площадь сечения соответствующего кольца трубы [2].

Вторичное (аномальное) магнитное поле тока с концентрацией J в цилиндре, очевидно, будет иметь и горизонтальную (H_{2x}) и вертикальную (H_{2z}) составляющие, определяемые соответственно равенствами

$$H_{2x} = \frac{J}{2\pi} \frac{h}{(x-x_0)^2+h^2}; \quad H_{2z} = \frac{J}{2\pi} \frac{(x\ x_0)}{(x-x_0)^2+h^2}, \qquad (2$$

где x_0 – абсцисса (положение в плане) оси цилиндра; x – текущая координат точки определения поля; h – глубина залегания оси цилиндра.

Кривые, характеризующие распределение поля по профилю x, проходящем вкрест простирания цилиндра, приведены на рис.I,в.

Анализ кривых H_{2x} и H_{2z} позволяет определить координаты h и x_0. Так, плановое положение оси цилиндра фиксируется максимумом кривой H_{2x} и точкой перехода кривой H_{2z} через нулевое значение, а глубина залегани

$$h = \pm \left| x_э - x_0 \right|, \qquad (3$$

где $x_э$ – абсциссы экстремумов кривой H_{2z}.

Очевидно, что для локальных тел или структур любой формы сечения (рис.I,г) и бесконечных по простиранию, что соответствует двухмерной зад че, аномальное магнитное поле, обусловленное сконцентрированным в них и быточным током, на профиле вкрест их простирания определится следующим образом:

$$H_{2x} = (\gamma_2 - \gamma_1) E_t \int_S \frac{(z - z_0)\, dx_0\, dz_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2};$$

$$H_{2z} = (\gamma_2 - \gamma_1) E_t \int_S \frac{(x - x_0)\, dx_0\, dz_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}, \qquad (4)$$

где x и z – координаты точек измерения поля; x_0 и z_0 – координаты элементов сечения $dS = dx_0 dz_0$.

Формулы (2) и (4) подобны формулам гравиразведки для расчета напряженности поля притяжения Δg. В них лишь надо заменить избыточную плотность на избыточную электропроводность и взаимно поменять компоненты.

Очень важно отметить, что магнитные поля, связанные с токами концентрации, могут проявиться и в наблюдениях магниторазведки. Это постоянные или очень медленно изменяющиеся во времени поля. Возможность такого проявления следует учитывать, чтобы избежать ошибочных выводов. Вместе с тем комплексное использование данных гравиразведки, электроразведки (блуждающих токов) и магниторазведки может существенно повысить надежность геологических заключений.

При выполнении относительных (дифференциальных) амплитудно-фазовых измерений на компенсационной основе [1, 3] в точках x и $x + \Delta x$ отношение амплитуд

$$\frac{H_{2x}(x + \Delta x)}{H_{2x}(x)} = \frac{\int_S \frac{(z - z_0)\, dx_0\, dz_0}{[(x + \Delta x) - x_0]^2 + (z - z_0)^2}}{\int_S \frac{(z - z_0)\, dx_0\, dz_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}}.$$

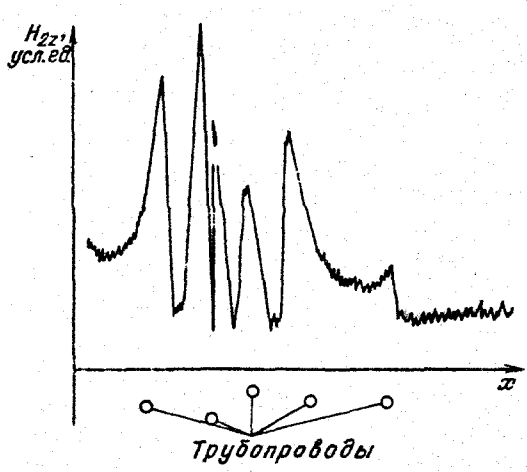


Рис.2. Магнитное поле блуждающих токов концентрации в трубопроводах

Аналогичное отношение можно составить и для вертикальной компоненты. В рассмотренных случаях горизонтальная компонента не измеряется по фазе, тогда как для вертикальной компоненты H_{2z} на интервале $x_0 \pm \Delta x$, например для цилиндра (рис.1,в), будет отмечена П-образная аномалия по фазе, равной 180°. Следует особо отметить высокую чувствительность фазы по индикации локальных тел [1, 2].

Результаты абсолютных измерений эффективных значений H_z (рис.2), выполненных по нашей рекомендации А.И.Свечниковым на акватории Днепра с целью локали-

зации проложенных по дну трубопроводов, показывают, что трубы фиксируются очень четкими аномалиями, интенсивность которых в десятки раз превышает временные флюктуации поля. При этом над многими трубами разнофазовые экстремумы кривой H_{2z}, абсциссы которых определяются равенством (3), слились в один общий максимум. Это связано с относительной малой глубиной залегания труб и большой инерционностью регистрации поля. При реализации относительных амплитудно-фазовых измерений эта неоднозначность исключается [1, 3].

Итак, электроразведка на основе изучения магнитного поля блуждающих токов обладает большими потенциальными возможностями при изучении геологической среды и может быть эффективно использована как для геологического картирования в широком диапазоне сопротивлений пород, так и для выявления и характеристики локальных рудных тел и инженерных коммуникаций. Особенно следует отметить большие ее возможности при изучении структуры блуждающих токов, являющихся одним из основных факторов коррозии коммуникаций и последующих аварий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаров В.Х. Теория и практика амплитудно-фазовых измерений гармонических магнитных полей-помех с целью электроразведки // Зап. ЛГИ. 1982. Т. 92. С. 89-98.

2. Захаров В.Х. Электроразведка методом дипольного индуктивного профилирования. Л.: Недра, 1975. 224 с.

3. Захаров В.Х., Парфенов А.З., Тимохин И.Б. Амплитудно-фазовые измерения магнитного поля промышленных токов с целью геологических исследований // Геофизические методы поисков и разведки рудных и нерудных месторождений: Межвуз. сборник / Уральский политехнический ин-т. Свердловск. С.56-59.