Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCII, 1982 г.

УДК 550.837

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ-ПОМЕХ С ЦЕЛЬЮ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В.Х.ЗАХАРОВ

Большинство методов и модификаций электроразведки основано на изучении полей, создаваемых специальными (собственными) источниками. При этом поля посторонних источников являются своего рода помехами, ограничивающими в той или иной мере эффективность методов электроразведки. С непрерывно возрастающей электрической энерговооруженностью жизнедеятельности человека таких посторонних источников становится все больше и больше, растет, соответственно, и интенсивность обуславливаемых ими помех. Уровень помех, особенно на площадях действующих рудников, геологоразведочных партий, населенных пунктов и вблизи них, становится настолько велик, что делает практически невозможной надежную электроразведку традиционными методами. Вместе с тем, очевидно, что сами поля-помехи содержат в себе и геоэлектрическую информацию. Использование их для целей электроразведки открывает новые возможности для повышения эффективности поисково-разведочных работ на различных этапах.

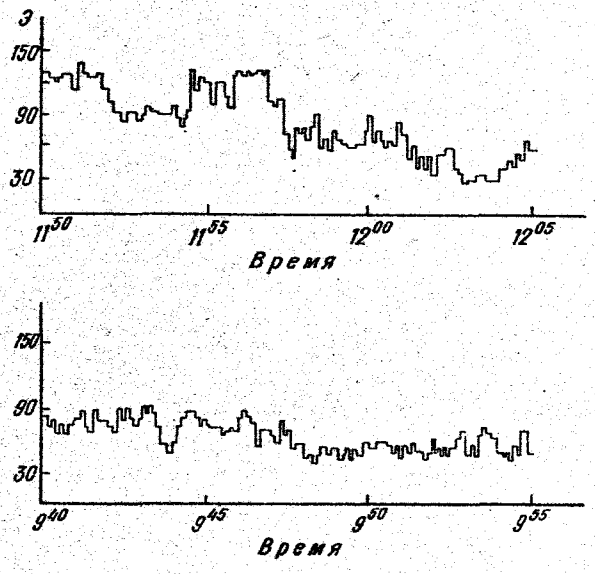


Рис.1. Временные флуктуации интенсивности магнитного поля-помехи f = 50 Гц
$Э$ – электродвижущая сила в условных единицах

Основной особенностью характеристики полей-помех с позиции электроразведки является случайное изменение их во времени, их неуправляемость. Генераторами этих полей могут быть отдельные единичные источники и их группы, причем источники эти могут располагаться на различных расстояниях друг от друга и от площади исследований. Частотный спектр этих полей может быть очень широк, но в силу тех или иных обстоятельств на определенных территориях по интенсивности могут существенно превалировать поля какой-либо одной частоты. Так, на площадях размещения промышленно-энергетических пунктов и вблизи них обычно наблюдаются интенсивные поля промышленной частоты 50 Гц, в удаленных от населенных пунктов районах могут преобладать поля ближайшей, наиболее мощной радиостанции.

Направления векторов напряженностей магнитного и электрического первичных полей и их плоскостей поляризации относительно возмущающих объектов или границ раздела сред могут быть любыми и изменяться со временем.

Все это необходимо учитывать как при разработке методики и техники измерения полей-помех с целью электроразведки, так и при интерпретации полученных результатов. В первую очередь, конечно, следует иметь в виду случайное изменение во времени интенсивности этих полей (рис.I). При таком характере изменения поля вряд ли можно рассчитывать на получение хорошего эффекта по выявлению возмущающих объектов, ориентируясь на измерения средних значений поля [I, 2, 5].

Учитывая это, в лаборатории Ленинградского горного института нами была разработана методика, основанная на измерении приращения комплекса напряженности магнитного поля на базе $r = |x_1 - x_2|$ в виде отношения однородных компонент модулей комплексов и разности фаз между ними. Покажем, что при такой методике измерений аномальное возмущение поля, связанное со строением среды, будет фиксироваться в чистом виде с автоматическим исключением флуктуаций, связанных с нестабильностью источников первичного поля. Действительно, значение комплекса напряженности магнитного поля в одной точке базы r

$$\overset{\vee}{H}^{(1)} = H_0(t)\left[1 + F(x)\,\mathrm{Re}\,\overset{\vee}{D}(p) + iF(x)\,\mathrm{Im}\,\overset{\vee}{D}(p)\right], \qquad (I)$$

а в другой

$$\overset{\vee}{H}^{(2)} = H_0(t)\left[1 + F(x \pm r)\,\mathrm{Re}\,\overset{\vee}{D}(p) + iF(x \pm r)\,\mathrm{Im}\,\overset{\vee}{D}(p)\right], \qquad (2)$$

где $H_0(t)$ - интенсивность первичного магнитного поля в точке измерения (нормальное поле) как функция временных флуктуаций; $\overset{\vee}{D}(p)$ - комплексная функция параметра $p = \sqrt{i\omega\mu\gamma\eta(l)}$; γ и μ - соответственно удельная электропроводность и магнитная проницаемость возмущающего объекта; ω - круговая частота; $\eta(l)$ - функция геометрических размеров; $F(x)$ - функция, определяющая зависимость вторичного магнитного поля, связанного с индуцированными токами в возмущающем объекте, от координаты точки наблюдения [3, 6].

Значения модулей комплексов определяются равенствами

$$\left|\overset{\vee}{H}^{(1)}\right| = H_0(t)\sqrt{\left[1 + F(x)\,\mathrm{Re}\,\overset{\vee}{D}(p)\right]^2 + \left[F(x)\,\mathrm{Im}\,\overset{\vee}{D}(p)\right]^2}; \qquad (3)$$

$$\left|\overset{\vee}{H}^{(2)}\right| = H_0(t)\sqrt{\left[1 + F(x \pm r)\,\mathrm{Re}\,\overset{\vee}{D}(p)\right]^2 + \left[F(x \pm r)\,\mathrm{Im}\,\overset{\vee}{D}(p)\right]^2},$$

а отношение

$$\frac{\left|\check{H}^{(1)}\right|}{\left|\check{H}^{(2)}\right|}=\sqrt{\frac{\left[1+F(x)\mathrm{Re}\check{D}(p)\right]^2+\left[F(x)\mathrm{Im}\check{D}(p)\right]^2}{\left[1+F(x\pm r)\mathrm{Re}\check{D}(p)\right]^2+\left[F(x\pm r)\mathrm{Im}\check{D}(p)\right]^2}}, \qquad (4)$$

Фазы их, соответственно,

$$\varphi^{(1)}=\mathrm{arctg}\left[F(x)\mathrm{Im}\,D(p)/\,1+F(x)\mathrm{Re}\check{D}(p)\right];$$
$$\varphi^{(2)}=\mathrm{arctg}\left[F(x\pm r)\,\mathrm{Im}\check{D}(p)/\,1+F(x\pm r)\,\mathrm{Re}\check{D}(p)\right]. \qquad (5)$$

Таким образом, приращение комплекса напряженности магнитного поля, определяемое равенствами (4)-(5), отражает лишь аномальное возмущение, обусловленное геологическим объектом. Однако выражения (4)-(5) составлены для однородного первичного магнитного поля. В противном случае на результатах измерения отразится также и градиент нормального поля.

Аномальное возмущение магнитного поля вертикального маломощного пласта будет вызываться в том случае, если горизонтальная составляющая первичного магнитного поля H_1, нормальная к плоскости пласта, отлична от нуля. При этом возможны два варианта направления первичного магнитного поля относительно плоскости пласта: сверху-направо или сверху-налево, определяющих два типа аномалий при профилировании установкой ZZ (рис.2). Векторные схемы для пяти основных положений установок относительно пласта и аномальные кривые рассчитаны при некотором фиксированном параметре p по формулам (4)-(5), в которых $F(x)$ определяет зависимость H_{2z}, создаваемого линейным током, протекающим в верхней кромке пласта [3].

Из приведенных схем легко увидеть, что в каждом варианте интенсивность и форма амплитудной $H_{cz}^{(1)}/H_{cz}^{(2)}$ и фазовой $\Delta\varphi$ аномалий могут изменяться в зависимости от соотношения модулей H_{1z} и H_{2z} и их фаз. Максимальный аномальный эффект будет наблюдаться, если первичное поле перпендикулярно плоскости пласта. В этом случае $H_{1z}=0$ и на установку ZZ будет действовать только вторичное поле. Тогда, очевидно, что при перемещении установки по профилю по обе стороны от пласта $\Delta\varphi=0^0$, а на центральном интервале профиля $x=\pm r/2$, когда пласт находится между рамками I и 2, $\Delta\varphi=180^0$. Отношение модулей напряженности магнитного поля

$$\frac{H_z^{(1)}}{H_z^{(2)}}=\frac{F\left(x+\frac{r}{2}\right)}{F\left(x-\frac{r}{2}\right)}=\frac{\left(x-\frac{r}{2}\right)^2+h^2}{\left(x+\frac{r}{2}\right)^2+h^2}\,\frac{x+\frac{r}{2}}{x-\frac{r}{2}}. \qquad (6)$$

Абсциссы $x=\pm r/2$ (переход каждой из рамок через пласт) определяют точки разрыва.

Важным для практики является другой предельный случай, когда $H_{2z}\ll H_{1z}$. При размещении установки (обеих рамок) с одной стороны от пласта отношение модулей

$$\frac{H_z^{(1)}}{H_z^{(2)}}=\frac{H_z(x)+\frac{\partial H_z}{\partial x}r}{H_z(x)},$$

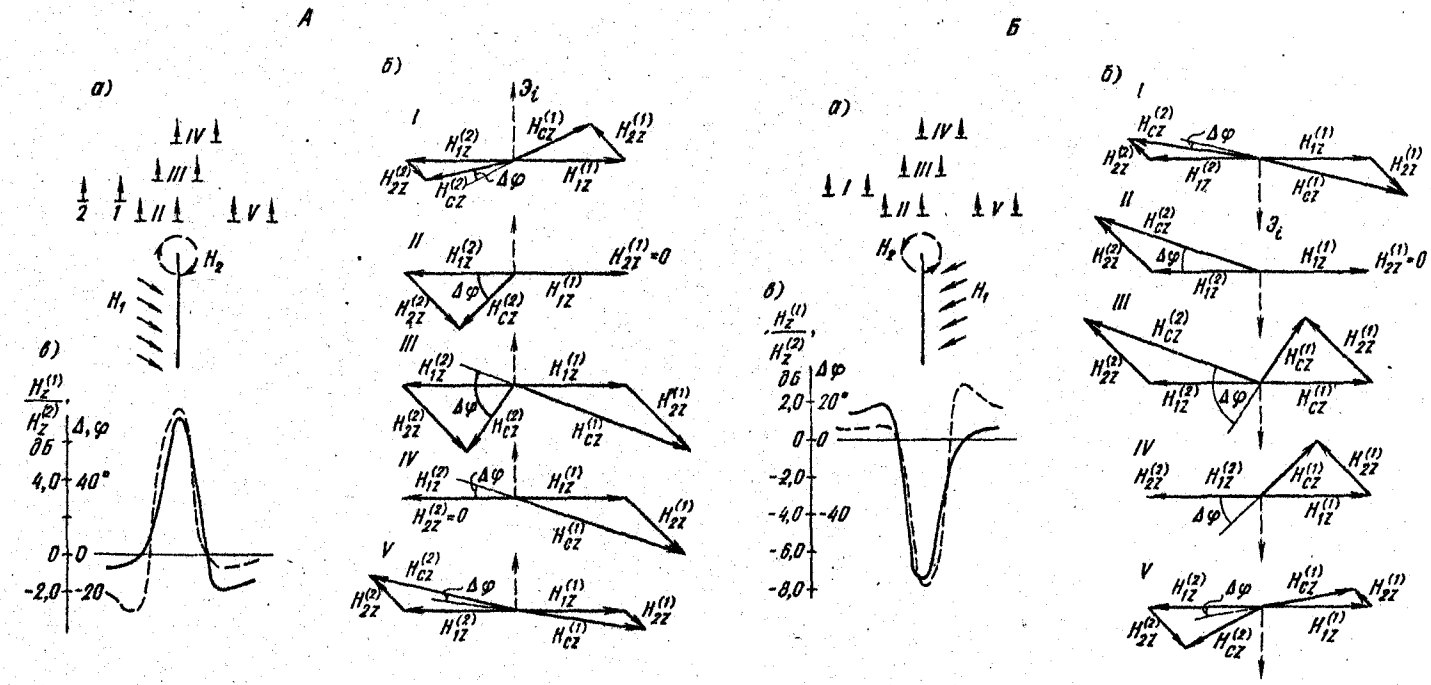


Рис.2. Схемы образования амплитудной $H_z^{(1)}/H_z^{(2)}$ (сплошная линия) и фазовой $\Delta\varphi$ (пунктирная линия) аномалий над проводящим вертикальным маломощным пластом при направлении первичного магнитного поля сверху направо (А) и сверху налево (Б): а – основные положения (I–V) установки относительно пласта; б – векторные схемы взаимосвязи первичного H_{1z}, вторичного H_{2z} и суммарного H_{cz} магнитных полей для основных положений установки; в – рассчитанные аномальные кривые

при размещении ее с другой стороны пласта

$$\frac{H_z^{(1)}}{H_z^{(2)}} = \frac{H_z(x)}{H_z(x) - \frac{\partial H_z}{\partial x} r}.$$

Для рассматриваемого случая $\frac{\partial H_z}{\partial x}\frac{r}{H_z(x)} = \delta \ll 1$. Тогда $(1+\delta)/1 = (1-\delta^2)/(1-\delta) = 1/(1-\delta)$, т.е. аномальные кривые будут в этом случае симметричны относительно положения пласта.

Аномалии, наблюдаемые над моделью вертикального маломощного пласта в поле-помехе частотой 50 Гц, действительно имеют чистый вид, несмотря на хаотическое изменение первичного поля-помех (рис.3). Форма аномальных кривых и изменение их в зависимости от базы измерения r и глубины залегания пласта h хорошо соответствуют теоретическим данным для условия $H_{2z} \ll H_{1z}$, которому и отвечают результаты практических наблюдений: интенсивность аномалий не превышает I дБ. Во всех случаях ветви амплитудной аномальной кривой в точках $|x_0| > r/2$ проходят через нуль, следовательно, точки $|x_0|$ являются корнями равенства

$$\frac{x_0 - \frac{r}{2}}{\left(x_0 - \frac{r}{2}\right)^2 + h^2} = \frac{x_0 + \frac{r}{2}}{\left(x_0 + \frac{r}{2}\right)^2 + h^2},$$

откуда

$$h = \pm\sqrt{x_0^2 - \left(\frac{r}{2}\right)^2}.$$

Для секущей установки XX характер аномалии определится равенством

$$\frac{H_x^{(1)}}{H_x^{(2)}} = \frac{\left(x + \frac{r}{2}\right)^2 + h^2}{\left(x - \frac{r}{2}\right)^2 + h^2}.$$

Абсциссы экстремумов связаны равенством $|x_э| = \pm\sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2 + h^2}$.

Форма и интенсивность аномалий для установки XX не зависит от направления возбуждающего поля относительно плоскости пласта, поскольку в этом

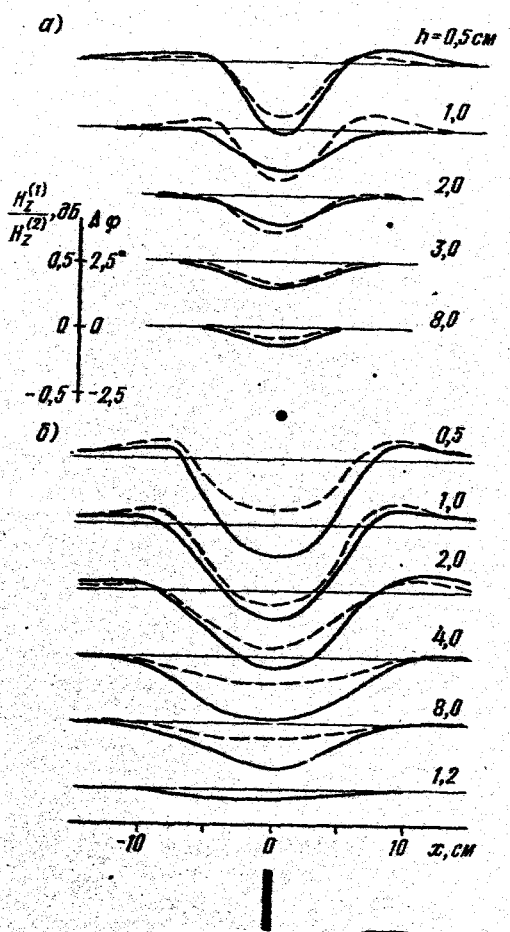


Рис.3. Аномалии амплитуды $H_z^{(1)}/H_z^{(2)}$ (сплошная линия) и фазы $\Delta\varphi$ (пунктирная линия) над проводящим вертикальным маломощным пластом, находящимся в магнитном поле-помехе, при r = 6 см(а) и r = 10 см (б)

случае возбуждающее и нормальное поля совпадают. Для заданной базы измерения интенсивность аномалии зависит от h и D. Отношение фазовой аномалии к амплитудной однозначно определяется функцией $\dot{D}(D)$.

При профилировании секущей установкой YY и любыми параллельными установками над вертикальным маломощным пластом аномалии наблюдаться не будет.

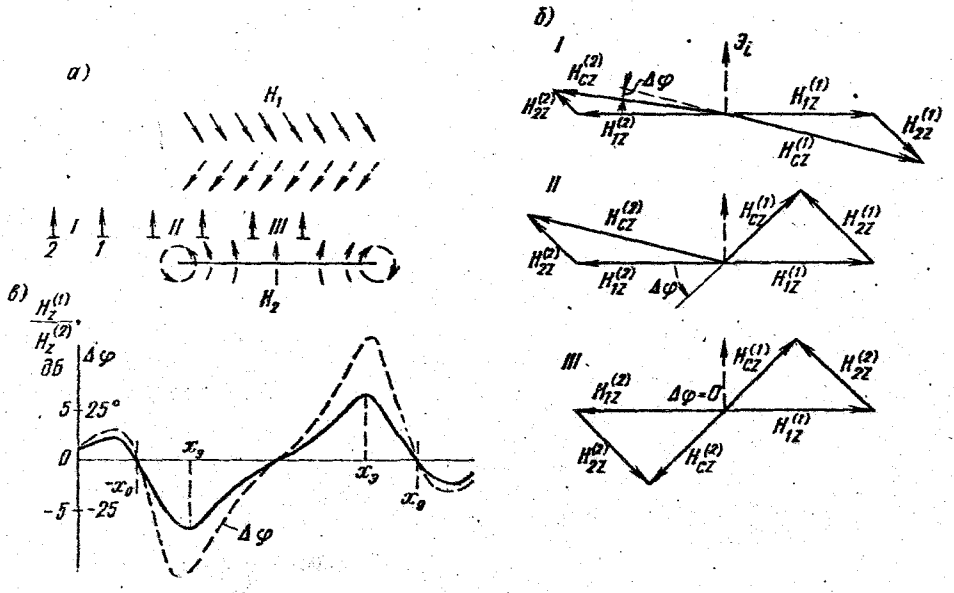


Рис.4. Схема образования амплитудной $H_z^{(1)}/H_z^{(2)}$ (сплошная линия) и фазовой $\Delta\varphi$ (пунктирная линия) аномалий над проводящим горизонтальным пластом, находящимся в переменном магнитном поле: а – основные положения установки относительно пласта; б – векторные схемы взаимосвязи H_{1z}, H_{2z} и H_{cz} для основных положений установки; в – рассчитанные аномальные кривые

Очевидно, что аномальное возмущение горизонтальным маломощным пластом будет вызываться, если вертикальная компонента первичного поля отлична от нуля (рис.4). Поэтому при профилировании установкой $Z\,Z$ интенсивность и форма аномалий не будут зависеть от направления первичного поля, а отношение фазовой аномалии к амплитудной для данной базы будет определяться значением параметра D. Результирующие вихревые токи, являющиеся источником вторичного магнитного поля, можно приближенно считать линейными токами, текущими в кромках пласта [3]. Тогда функция $F(x)$ в формулах (4)-(5) может быть представлена в виде

$$F(x) = \frac{x + d/2}{(x + d/2)^2 + h^2} + \frac{x - d/2}{(x - d/2)^2 + h^2},$$

где d – ширина пласта.

Абсциссы $|x_э|$ и $|x_0|$

$$x_э = \pm\, d/2\,; \quad X_0 = \pm\sqrt{h^2 + \left(\frac{r}{2}\right)^2} + d/2.$$

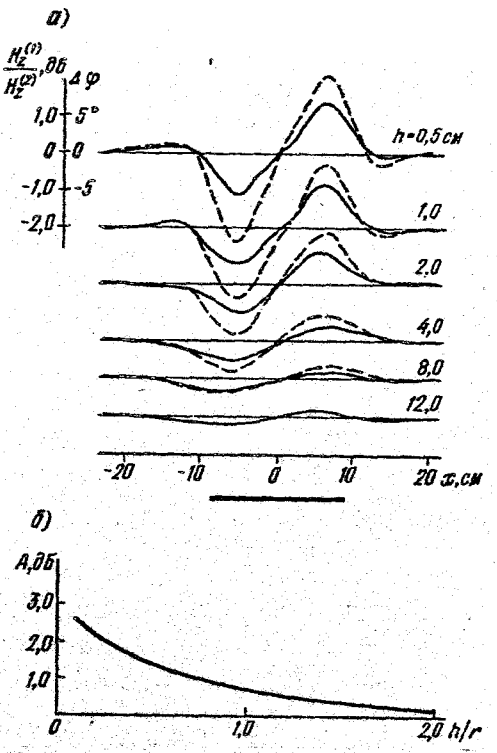


Рис.5. Аномалии амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктирная линия) над проводящим горизонтальным пластом, находящимся в магнитном поле-помехе при r = 6 см (а) и зависимость аномалий от глубины (б)

Аномальные кривые, наблюдаемые над моделью горизонтального пласта в поле-помехе f = 50 Гц (рис.5) практически не отличаются от теоретических, рассчитываемых по формулам (4)-(5).

При профилировании установкой XX характер аномалий будет зависеть от направления возбуждающего поля относительно плоскости пласта подобно тому, как для установки ZZ при профилировании над вертикальным пластом.

Для секущей установки YY и всех параллельных установок над горизонтальным пластом при профилировании вкрест простирания аномалий наблюдаться не будет.

В шаре (изометрическом рудном теле) вихревые токи будут индуктироваться при любом направлении возбуждающего поля. Вторичное магнитное поле, обуславливаемое шаром, эквивалентно полю диполя с моментом $\bar{P}_м = \bar{H}_1 \check{D}(p) a^3$ (здесь a - радиус шара) [6]. Аномальные кривые, наблюдаемые установкой ZZ над проводящим шаром в поле-помехе частотой 50 Гц соответствуют полю магнитного диполя с моментом, близким к вертикальному (рис.6).

Очевидно, что и над горизонтальным круговым цилиндром по профилям, ориентированным вкрест простирания, аномалии практически будут иметь тот же характер, что и аномалии над шаром по центральному профилю. Они могут быть рассчитаны на основе известного решения для цилиндра, находящегося в гармоническом магнитном поле [6].

В пласте конечной мощности вихревые токи могут развиваться и в вертикальных и в горизонтальных плоскостях. Поэтому аномалия над таким пластом определится суперпозицией аномалий от соответствующих горизонтальных и вертикальных маломощных пластов [3].

Аномальные возмущения магнитного поля магнитными телами являются следствием индуцированного намагничивания тел. При этом вторичное магнитное поле также создается токами, текущими в перпендикулярных к направлению

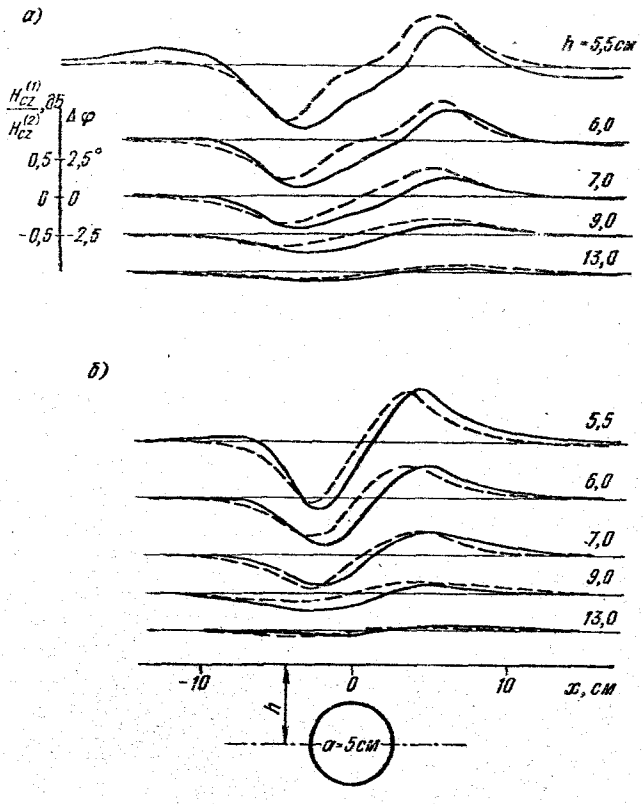


Рис.6. Аномалии амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктирная линия) над проводящим шаром, находящимся в магнитном поле-помехе, при r = 10 см (а) и r = 6 см (б)

возбуждающего поля плоскостях, но противоположного направления [3]. Поэтому при прочих равных условиях аномалии над магнитными телами, связанные с индуцированными токами намагничивания (за счет магнитной проницаемости μ), будут практически такими же по форме, что и аномалии над проводящими телами, связанные с токами Фуко (за счет удельной электропроводности γ), но противоположны по знаку. Над магнитными телами за счет μ будет наблюдаться лишь аномалия по амплитуде, поскольку возбуждающее поле и ток намагничивания совпадают по фазе. Кроме того, толщина настила токов Фуко определяется глубиной проникновения (скин-эффектом), толщина настила токов намагничивания – электронным слоем. Поэтому наиболее благоприятным для возбуждения токов намагничивания в маломощных пластах является первичное поле, направленное по плоскости пласта, а для возбуждения токов Фуко – перпендикулярно его плоскости.

В эксперименте магнитный пласт был представлен тонкополосчатым магнетитовым кварцитом. Мощность прослойков магнетита, ориентированных в вертикальных плоскостях, не превышала десятых долей миллиметра. Относительная магнитная проницаемость по напластованию $\mu_t \approx 4,5$; нормально напластованию $\mu_n \approx 1$. Магнетитовые пропластки являются и хорошими проводниками тока. В таком пласте намагничивание будет происходить практически лишь по слоистости, а в магнетитовых прослойках могут наводиться и токи Фуко. Но, поскольку проводящие магнетитовые прослойки разделены диэлектриком (кварцем), токи Фуко могут развиваться только в вертикальных плоскостях. Полученные аномалии полностью соответствуют описанным условиям эксперимента (рис.7).

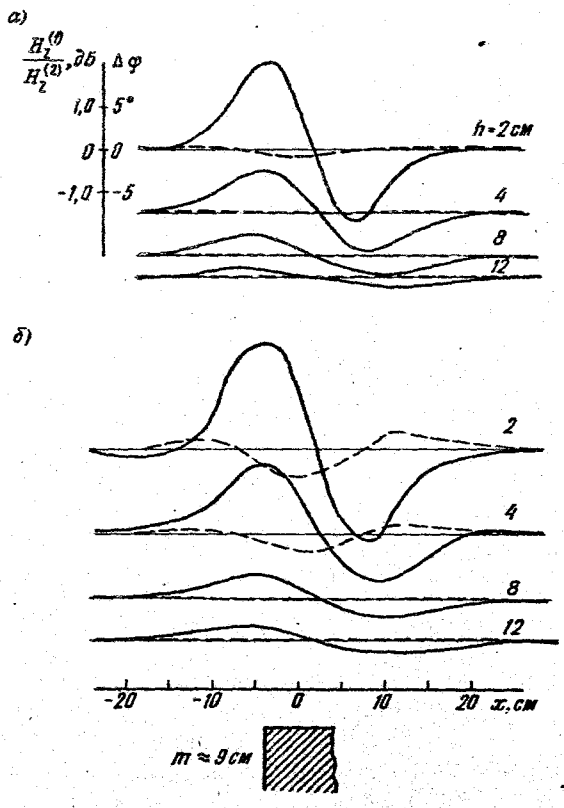


Рис.7. Аномалии амплитуды (сплошная линия) и фазы (пунктирная линия) над магнитным (магнетитовый кварцит) пластом, находящимся в магнитном поле-помехе, при r = 6 см (а) и r = 10 см (б)

Аномальное возмущение поля обусловлено главным образом магнитной проницаемостью пласта и лишь незначительно токами Фуко. Так, амплитудные аномальные кривые $H_z^{(1)}/H_z^{(2)}$ по своей форме соответствуют пласту с вертикальным намагничиванием и на них практически не отразилось влияние вторичного магнитного поля токов Фуко. Фазовые аномалии, являющиеся следствием влияния проводимости (токов Фуко), наблюдаются лишь при малых глубинах и преимущественно с большей базой наблюдения. При этом форма фазовых аномалий соответствует токам, развивающимся лишь в вертикальных плоскостях пласта.

Глубинность выявления такого пласта при чувствительности измерений 0,1 дБ достигает двойного значения базы измерения.

Если размеры локальных электропроводных тел по сечению значительно меньше длины волны электромагнитного поля, обуславливаемое ими аномальное возмущение магнитного поля будет связано с токами концентрации. Расчет таких аномалий может быть выполнен путем интегрирования вторичного магнитного поля от избыточной плотности тока по сечению проводника [3]. Аналогичным образом определятся и аномалии над структурами.

Таким образом, измерения приращения однородной компоненты комплекса напряженности гармонических магнитных полей-помех могут быть эффективно использованы при решении широкого круга задач - поисков и изучения рудных тел повышенной электропроводности и магнитной проницаемости, картирования горных пород и структур. При этом аномалии, обуславливаемые геологическими объектами, выявляются в чистом виде [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Вепслер В.И. К основам методики электроразведки естественным переменным электромагнитным полем. – Тр. ЦНИГРИ, 1972, вып. 104.

2. Вешев А.В., Яковлев А.В. Использование электромагнитных полей частотой 50 Гц для электроразведки. – В кн.: Геофизические методы поисков и разведки. Межвуз. сборник, вып. 1. Свердловск, изд. УПИ, 1975.

3. Захаров В.Х. Электроразведка методом дипольного индуктивного профилирования. Л., Недра, 1975.

4. 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. Свердловск, изд. УПИ, 1980.

5. Музылев В.С. О возможности использования промышленных токов при геологическом картировании и поисках рудных месторождений. – Зап. ЛГИ, 1974, т. 66, вып. 2.

6. Якубовский Ю.В. Индуктивный метод электроразведки. М., Госгеолтехиздат, 1963.