Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т./XIX, вып. 2, 1976 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ДИПОЛЬНЫМИ ИНДУКЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ

В.Х.ЗАХАРОВ, А.В.КОЛЕСНИК

Дипольное индуктивное профилирование с амплитудно-фазовыми измерениями (ДИП) успешно применяют при поисках объектов высокой электропроводности [2]. Однако, как это следует из законов электромагнитного поля и результатов, полученных при полевых исследованиях [2], методом ДИП могут быть также выделены и изучены объекты, отличающиеся по магнитной проницаемости. Особый интерес при этом представляют задачи, решить которые посредством метода ДИП можно более эффективно, чем известными и хорошо разработанными магнитометрическими способами, основанными на изучении естественного магнитного поля Земли или изучении образцов в однородном искусственном магнитном поле [4]. К таковым, в частности, могут быть отнесены задачи определения магнитной проницаемости геологических объектов и их структурно-текстурных особенностей, проявляющихся в анизотропии магнитной восприимчивости.

В методе ДИП измеряют амплитуду суммарного магнитного поля в относительных единицах нормального поля диполя $\frac{H_c}{H_0}$ и фазу φ° вектора H_c относительно вектора H_0 [3]. Амплитуда суммарного магнитного поля H_c представляет собой векторную сумму нормального (первичного) магнитного поля диполя H_0 и вторичного магнитного поля H_2, являющегося следствием реакции среды. При этом H_2 обусловлено магнитной проницаемостью μ и удельной электропроводностью γ среды. Фазовый же сдвиг φ° является лишь следствием γ. С уменьшением частоты влияние γ на возмущение поля снижается, влияние μ не изменяется. При достаточно низких частотах влияние γ практически исчезает, что отчетливо определяется по отсутствию фазового сдвига и неизменности амплитудной аномалии при дальнейшем уменьшении частоты. При этих частотах решение задачи для поля

гармонического магнитного диполя, находящегося над магнитной средой, сводится к решению аналогичной задачи для стационарного магнитного диполя. Эту задачу можно решить методом зеркального отражения, используя выражения для поля стационарного магнитного диполя в воздухе, учитывая условие непрерывности на границе раздела тангенциальной составляющей вектора напряженности магнитного поля и нормальной составляющей вектора магнитной индукции [2].

В случае вертикального магнитного диполя поле симметрично относительно оси диполя и может быть полностью охарактеризовано его вертикальной и горизонтальной составляющими. Совместив ось OZ цилиндрической системы координат с направлением момента диполя, расположенного в начале координат и на высоте h над границей раздела, найдем

$$H_{cz}^{(z)} = M\left[\frac{2Z^2 - r^2}{\sqrt{r^2 + Z^2}^5} + \frac{\mu - 1}{\mu + 1}\,\frac{2(Z+2h)^2 - r^2}{\sqrt{r^2 + (Z+2h)^2}^5}\right]; \qquad (1)$$

$$H_{cr}^{(z)} = M\left[\frac{r'Z}{\sqrt{r^2 + Z^2}^5} + \frac{\mu - 1}{\mu + 1}\,\frac{r(Z+2h)}{\sqrt{r^2 + (Z+2h)^2}^5}\right], \qquad (2)$$

где M – момент диполя; μ – относительная магнитная проницаемость нижнего магнитного полупространства (для воздуха $\mu = 1$); r – расстояние от оси диполя до точки определения поля. Верхние индексы определяют направление момента диполя, нижние – составляющие поля.

При $Z = 0$ H_{cz} в относительных единицах нормального поля $H_{oz} = -\frac{M}{r^3}$, равно

$$\frac{H_{cz}^{(z)}}{H_{oz}^{(z)}} = 1 - \frac{\mu - 1}{\mu + 1}\, r^3\, \frac{8h^2 - r^2}{\sqrt{r^2 + 4h^2}^5}\,. \qquad (3)$$

При $h = 0$ и $Z = 0$, т.е. в случае расположения установки (генераторного и приемного диполей) на поверхности магнитного полупространства

$$\frac{H_{cz}^{(z)}}{H_{oz}^{z}} = \frac{2\mu}{\mu + 1} \qquad \text{и} \qquad \mu = \frac{H_{cz}}{H_{oz}}\Big/\left(2 - \frac{H_{cz}}{H_{oz}}\right). \qquad (4)$$

Из равенств (1) и (2), в которых вторые слагаемые определяют аномальные значения поля соответственно H_{Az} и H_{Ar}, для $Z = 0$ получим

$$\frac{H_{Az}}{H_{Ar}} = \frac{8h^2 - r^2}{2rh}\,. \qquad (5)$$

Из равенства (3) следует, что $\frac{H_{cz}}{H_{oz}} = 1$ при

$$r = 2h\sqrt{2} . \qquad (6)$$

На основании равенств (5) или (6) определяем h, а из формул (1)–(3) при $Z = 0$ находим μ.

На оси Z

$$\frac{H_{cz}^{(z)}}{H_{oz}^{(z)}} = 1 + \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{Z^3}{(Z + 2h)^3} . \qquad (7)$$

и μ при $h = 0$ также выражается формулой (4).

В случае горизонтального диполя, расположенного в начале декартовой системы координат с моментом, направленным по оси OX (ось OZ вертикальна), составляющие суммарного поля определяются выражениями:

$$H_{cx}^{(x)} = M\left[\frac{2X^2 - Z^2 - Y^2}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}^5} - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{[2X^2 - (Z+2h)^2 - Y^2]}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z + 2h)^2}^5}\right] ; \qquad (8)$$

$$H_{cy}^{(x)} = M\left[\frac{YX}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}^5} - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{YX}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z+2h)^2}^5}\right] ; \qquad (9)$$

$$H_{cz}^{(x)} = M\left[\frac{ZX}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}^5} - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{X(Z + 2h)}{\sqrt{X^2 + Y^2 + (Z+2h)^2}^5}\right] . \qquad (10)$$

При измерении на оси Y нормальное поле имеет только X-составляющую, $H_{ox}^{(x)} = -\frac{M}{Y^3}$, соответственно

$$\frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{ox}^{(x)}} = 1 - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{Y^3}{\sqrt{Y^2 + 4h^2}^5} . \qquad (11)$$

На поверхности магнитного полупространства ($h = 0$)

$$\frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{ox}^{(x)}} = \frac{2}{\mu + 1} \quad \text{и} \quad \mu = \left(2 - \frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{ox}^{(x)}}\right) \Big/ \frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{ox}^{(x)}} . \qquad (12)$$

При измерениях на оси X нормальное поле $H_{0x}^{(x)} = \frac{2M}{X^3}$, тогда

$$\frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{0x}^{(x)}} = 1 + \frac{\mu - 1}{\mu + 1} X^3 \frac{2h^2 - X^2}{\sqrt{X^2 + 4h^2}^5} \qquad (13)$$

и μ для $h = 0$ определяется формулой (12).

Согласно равенствам (8) и (10) на оси диполя

$$\frac{H_{Ax}^{(x)}}{H_{Az}^{(x)}} = \frac{2h^2 - X^2}{hX} . \qquad (14)$$

Из равенства (13) следует, что $\frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{0x}^{(x)}} = 1$ при

$$h = \frac{X}{\sqrt{2}} . \qquad (15)$$

На основании равенств (14) или (15) можно определить h, а из формул (8)–(10) или (11), (13) при $Z = 0$ найти μ.

При измерениях на оси Z $H_{0x}^{(x)} = -\frac{M}{Z^3}$, и из равенства (8) находим

$$\frac{H_{cx}^{(x)}}{H_{0x}^{(x)}} = 1 - \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \frac{Z^3}{(Z + 2h)^3} . \qquad (16)$$

Отсюда следует, что μ для $h = 0$ также определяется по формуле (12).

Систему, содержащую источник поля – генераторную рамку и измерительную рамку, обычно называют установкой. Установки будем называть горизонтальными, если рамки разнесены в горизонтальной плоскости, и вертикальными, если они разнесены по вертикальной оси, и обозначать их соответственно индексами г и в. Согласно проведенному выше анализу, возможны пять основных типов установок для измерения μ: $ZZ_г$, $ZZ_в$, $XX_г$, $YY_г$, $YY_в$. Значения поля для них определяются соответственно по равенствам: (3), (7), (13), (11), (16). Чисто аномальные установки обладают более низкой точностью измерения поля [2] и далее не рассматриваются.

Из соответствующих равенств видно, что при измерениях всеми этими установками на поверхности магнитной среды относительный аномальный эффект одинаков и поэтому μ может определяться ими принципиально с одинаковой точностью. При измерениях на конечных h наибольший аномальный эффект имеет установка $ZZ_г$ (в пределе он в 4 раза превышает эффект установки $XX_г$). Поэтому μ и h более точно определяются установкой $ZZ_г$. Вследствие горизонтального расположения рамок эта установка более удобна и для измерений на поверхности среды – реализация условия $h = 0$ в ней более надежна.

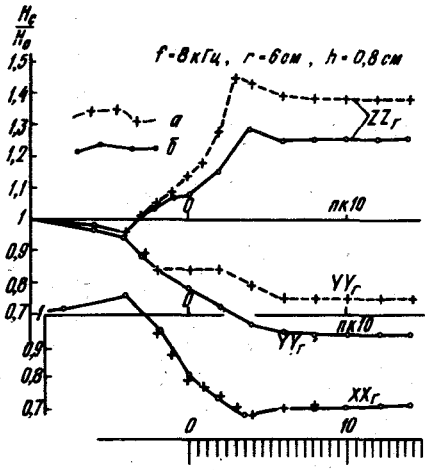


Рис.1. Профилирование над искусственной анизотропной магнитной моделью дипольными установками: а – по направлению слоистости; б – вкрест слоистости

Аномальные кривые, полученные при профилировании различными типами установок над пластом с соотношением $\frac{m}{r} = 3,3$, где m – горизонтальная мощность пласта (рис.1), показали, что для всех установок в интервале средней трети m наблюдается устойчивое „плато" (неизменное значение поля), т.е. практически при m в 2–3 раза больше r возмущающее действие образца для установки, расположенной на его поверхности и равноудаленной от краев, уже эквивалентно действию полупространства.

Влияние вертикальной мощности образца a исследовано посредством измерения поля над центром его при заведомо больших горизонтальных размерах образца. Как видно из рис.2, при $a \geq \frac{r}{2}$ реакция образца с точностью до единиц процентов эквивалента полупространству. Таким образом, чтобы конечные по размерам геологические объекты (или образцы) можно было считать эквивалентными по своей реакции полупространству, измерения следует проводить с разносом рамок r, удовлетворяющим условию $0,5\,a \geq r \leq (2 \div 3)\,m$.

Отношение значения поля, измеренного на конечной высоте, к его значению при $h = 0$ определяется соответствующими геометрическими коэффициентами из равенств (3), (7), (11), (13), (16). Характер изменения геометрических коэффициентов K как функций $\frac{r}{h}$ для различных установок определяется кривыми, приведенными на рис.3. Для определения μ по результатам измерений на поверхности образца предпочтительнее горизонтальные установки – для них при меньших r надежнее реализуется предельное условие $h = 0$ или $\frac{r}{h} \to \infty$. Очевидно, что магнитная проницаемость может быть определена и по измерениям $\frac{H_c}{H_0}$ при конечных $\frac{r}{h}$. В этом случае μ рассчитывается с учетом соответствующих заданному $\frac{r}{h}$ геометрических коэффициентов (рис.3) по формулам (3), (11), (13), (16). Измерения при конечном $\frac{r}{h}$ способствуют уменьшению влияния микронеоднородностей магнитной среды и неровностей ее поверхности и позволяют получить усредненное эффективное значение μ. Однако при конечных $\frac{r}{h}$ имеют место большие градиенты геометри-

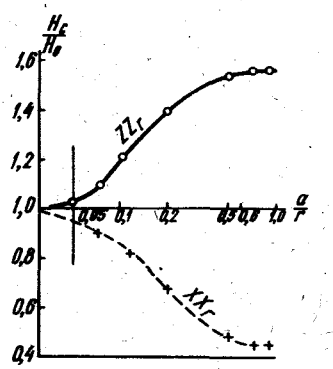


Рис.2. Зависимость величины суммарного магнитного поля диполя от вертикальной мощности магнитной среды

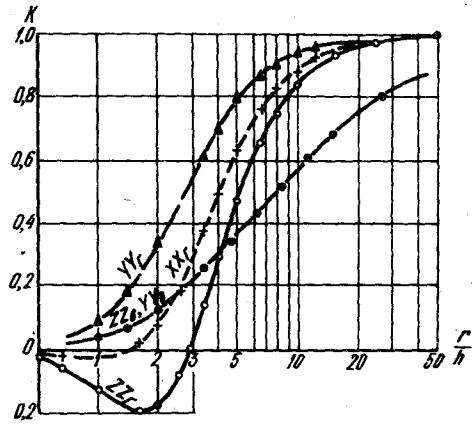


Рис.3. Изменение геометрических коэффициентов дипольных установок в зависимости от $\frac{r}{h}$

ческого коэффициента (рис.3), что может привести к существенным ошибкам в определении μ. Для повышения точности без снижения производительности наблюдений измерения следует проводить с жестким фиксатором h.

Точность определения μ по данным измерений дипольными установками и на астатическом магнитометре, как видно из таблицы, практически одинакова. Дипольной индукционной установкой μ измеряют за секунды.

Магнитное поле магнитного диполя над анизотропной магнитной средой исследовано с помощью моделирования. Модели среды изготавливали из натуральных анизотропных пород – магнетитовых кварцитов, а также создавали искусственно. Из блоков горных пород алмазной пилой выпиливали параллелепипеды необходимых размеров. Искусственную анизотропную модель собирали из чередующихся магнитных и немагнитных прослоев толщиной 2 мм. Материалом магнитных прослоев служил концентрат (порошок) магнетитовых руд (μ = 3,4), немагнитных – гетинакс. Магнитная проницаемость такой модели по слоистости μ_t и перпендикулярно слоистости μ_n определяется равенствами $\mu_t = q + (1-q)\frac{\mu_2}{\mu_1}$, $\mu_n = 1/(q + \frac{1-q}{\mu_2/\mu_1})$ (где q – доля вещества с магнитной проницаемостью μ_1 в объеме модели [1]).

Размеры моделей были достаточно большими, так что при положении установки в среднем интервале вблизи поверхности моделей их реакция практически равноценна полупространству. В этом интервале и проведены круговые исследования всеми установками.

Приведенные на рис.1 аномальные кривые получены при профилировании над анизотропной моделью установками $ZZ_г$, $XX_г$, $YY_г$ по слоистости и вкрест. Как видно, аномальные эффекты для установок $ZZ_г$ и $YY_г$ существенно отличаются при профилировании по слоистости и вкрест, для установки же $XX_г$ по обоим направлениям аномальный эффект одинаков. Больший аномальный эффект для установки $ZZ_г$ наблюдается при расположении установки по слоистости, для $YY_г$ – вкрест слоистости (нормали к рамкам по слоистости).

Результаты определения μ

Образец	Значения μ по данным измерений		
	дипольными установками		на астатическом магнитометре
	$XX_г$	$ZZ_г$	
Анизотропные модели			
12(1) – магнетитовый джеспилит	5,05	–	4,90
13(2) – магнетитовый роговик	3,55	–	3,30
14(3) – то же	3,45	–	3,50
15(4) – " "	4,10	–	3,80
24 – " "	4,40	–	4,30
Б-6 – " "	3,35	–	3,00
35 – " "	3,40	–	3,35
29 – амфибол-магнетитовый сланец	2,30	–	2,35
Изотропные модели			
Концентрат ДнепроГОКа	3,35	3,35	3,40
Концентрат ИнГОКа	3,55	3,60	3,54
Проба 88614 – дробленый магнетитовый роговик	1,80	1,90	2,00
Магнетит	12,00	12,50	12,50
36 – окисленный магнетитовый роговик	–	1,015	1,01

Круговые диаграммы суммарного (рис.4, а) и вторичного (рис.4, б) магнитного поля, полученные установками $ZZ_г, YY_г, YY_в, XX_г$ при различных $\frac{r}{h}$ над вертикально слоистой моделью из магнетитового кварцита, имеющего, по данным измерений на астатическом магнитометре, $\mu_t = 4,1$, $\mu_n = 1,5$, показали, что для установки $XX_г$ не наблюдается зависимости поля от ее положения относительно направления слоистости. Для всех других установок эта зависимость более или менее отчетливо проявляется. Наиболее резкая зависимость наблюдается для установки $ZZ_г$. При уменьшении $\frac{r}{h}$ значения суммарного магнитного поля при круговых измерениях для всех установок стремятся к окружности – нормальному полю H_0 в соответствии с уменьшением вклада вторичного магнитного поля. Вторичное же поле при разных $\frac{r}{h}$ для всех установок, кроме $XX_г$, устойчиво и четко отражает анизотропию магнитной среды. Значение поля, измеренное установкой $XX_г$ над анизотропной средой, при расчете μ по формуле (12), справедливой для изотропной среды, соответствует среднеарифметической величине μ, определенной на астатическом магнитометре как $\mu = \frac{2\mu_t + \mu_n}{3}$

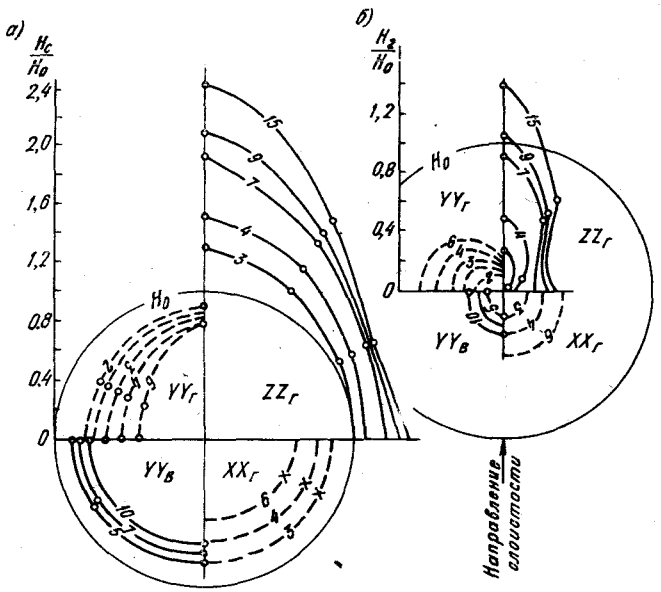


Рис.4. Диаграммы круговых изменений магнитных полей над анизотропной магнитной средой: а – суммарного; б – вторичного. Цифры на кривых соответствуют отношению $\frac{r}{h}$

(см.таблицу). При расположении установки $ZZ_г$ по напластованию значение вторичного магнитного поля может превышать первичное (нормальное поле диполя, что для изотропной среды теоретически невозможно, поэтому измеренное таким образом поле нельзя использовать для определения μ по формуле (4). В случае же расположения установки $ZZ_г$ вкрест напластования значение измеренного поля при использовании формулы (4) соответствует μ_n . Для установки $YY_г$ при расположении ее вкрест напластования значение поля соответствует μ_t , при расположении по напластованию – μ_n . Однако в последнем случае при измерениях на поверхности среды или очень малых h (меньших расстояния между магнитными пропластками) среда будет вести себя как неоднородная и μ определить нельзя.

Метод ДИП может быть эффективно использован для изучения магнитных сред как изотропных, так и анизотропных.

Литература

1. Вешев А.В. Зависимость магнитной восприимчивости горных пород и руд от содержания ферромагнитных компонентов. Тр.ВИРГ, вып. 2, 1950.

2. Захаров В.Х. Дипольное индуктивное профилирование с амплитудно-фазовыми измерениями при поисках и разведке сульфидных руд. Л., „Недра", 1967.

3. Захаров В.Х. Теория и практика амплитудно-фазовых измерений и обработка результатов при дипольном индуктивном профилировании. Зап.ЛГИ, т.LXI, вып. 2, 1971.

4. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка, Л., „Недра", 1973.