Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т.LXI, вып. 2, 1971 г.

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ДИПОЛЬНОМ ИНДУКТИВНОМ ПРОФИЛИРОВАНИИ

В. Х. Захаров

Поиск рудных тел повышенной электропроводности методом дипольного индуктивного профилирования с амплитудно-фазовыми измерениями основан на изучении изменения магнитного поля гармонического магнитного диполя в зависимости от его перемещения по профилю (относительно рудного тела).

Причины, которые могут вызвать изменения поля, целесообразно разделить на два вида: 1) связанные с реакцией рудного тела, 2) обусловленные изменениями взаимного расположения датчика-источника поля (генераторного диполя) и датчика-приемника поля (измерительного диполя), мощности источника и функциональным влиянием отдельных узлов-блоков технического средства (аппаратуры), обеспечивающего производство работ данным методом.

Изменения, связанные с причинами первого вида, несут в себе всю полезную информацию о рудном теле и являются целью изучения при съемке. Для данного метода эти изменения по-существу представляют собой характер аномальных полей над различными типами рудных тел [1]. Изменения поля по причинам второго вида, напротив, осложняют выделение полезной информации. Поэтому одной из главных задач методики производства работ является обеспечение максимально надежного и устойчивого исключения этих изменений или, в крайнем случае, их учета. При этом необходимо с высокой точностью измерять изменения поля, несущие полезную информацию.

Исходя из этих требований, в качестве оптимальной для метода дипольного индуктивного профилирования выбрана установка *ZZ*, в которой источником первичного поля служит вертикальный гармонический магнитный диполь и измеряется вертикальная составляющая магнитного поля в точке, расположенной на расстоянии R по линии профиля. Взаимное расположение генераторного и приемного диполей при профилировании не изменяется. Влияние неточностей соблюдения расстояния R, угловой разориентации диполей и разности их высот рассмотрено подробно [1].

Для такой установки в общем случае поле в точке расположения измерительного диполя может быть представлено в виде векторной суммы

$$\overline{H}_{ZS} = \overline{H}_{ZO} + \overline{H}_{Z2}, \qquad (1)$$

где $\overline{H}_{ZO}$ — вектор напряженности нормального магнитного поля (в отсутствие возмущающего объекта); $\overline{H}_{Z2}$ — вектор напряженности вторичного магнитного поля, обусловленного индуцированными в рудном теле вихревыми токами.

$\overline{H}_{ZS}$, $\overline{H}_{ZO}$ и $\overline{H}_{Z2}$ рассматриваются как векторы на фазовой плоскости (рис. 1). Так как значения H_{ZS}, H_{ZO} и H_{Z2} при прочих равных условиях прямо пропорциональны мощности источника и H_{ZO} не несет полезной информации, целесообразно выразить входящие в равенство (1) величины в относительных единицах нормального поля

$$\frac{\overline{H}_{ZS}}{H_{ZO}} = 1 - \frac{\overline{H}_{Z2}}{H_{ZO}}. \qquad (2)$$

Входящие в равенство (2) относительные величины не зависят от мощности источника. Таким образом, при соблюдении постоянства расстояния между рамками-диполями и измерении поля в относительных единицах нормального поля обеспечиваются оптимальные условия съемки, при которых исключается ряд причин изменения поля второго вида.

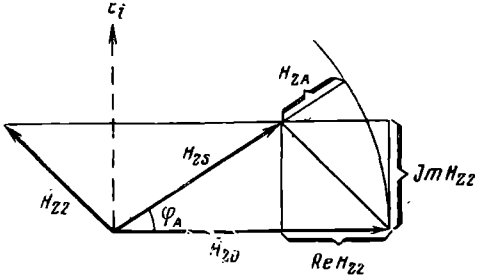


Рис. 1. Векторная схема взаимосвязи нормального H_{Z0}, вторичного H_{Z2} и суммарного H_{ZS} магнитных полей: φ_A — сдвиг фазы между векторами H_{Z0} и H_{ZS} (фазовая аномалия), H_{ZA} — амплитудная аномалия

Напряженность вторичного магнитного поля в относительных единицах нормального поля можно выразить, как [1, 2]

$$\frac{\overline{H}_{Z2}}{|H_{ZO}|} = \overline{T}(P)\,K(x,\ z,\ R), \qquad (3)$$

где $\overline{T}$ — комплексная функция параметра $P = \omega\gamma\mu\eta(l)$; ω — круговая частота используемого поля; γ и μ—соответственно, удельная электропроводность и магнитная проницаемость рудного тела; $\eta(l)$ — функция линейных размеров рудного тела и установки [1]; K — функция, определяющая зависимость поля от координат центра установки (x, z) относительно рудного тела и размера установки R.

Поскольку направление вектора $\overline{H}_{Z2}$ на фазовой плоскости полностью определяется вектор-функцией $\overline{T}$, уравнение (3) можно написать в виде

$$\mathrm{Re}\frac{\overline{H}_{Z2}}{|H_{ZO}|} + \mathrm{Im}\frac{\overline{H}_{Z2}}{|H_{ZO}|} = \mathrm{Re}\,\overline{T}(P)\,K(x,\ z,\ R) + \mathrm{Im}\,\overline{T}(P)\,K(x,\ z,\ R), \qquad (4)$$

где за действительные части Re приняты компоненты, софазные или противофазные с вектором напряженности нормального магнитного поля $\overline{H}_{ZO}$, за мнимые Im — компоненты, сдвинутые по фазе на 90° относительно H_{ZO} (рис. 1).

На основании равенства (4) можно написать, что

$$\frac{\mathrm{Im}\,\overline{H}_{Z2}}{\mathrm{Re}\,\overline{H}_{Z2}} = \frac{\mathrm{Im}\,\overline{T}(P)}{\mathrm{Re}\,\overline{T}(P)}, \qquad (5)$$

т. е. отношение $\frac{\mathrm{Im}\,\overline{H}_{Z2}}{\mathrm{Re}\,\overline{H}_{Z2}}$ является лишь функцией параметра P.

Эта функциональная зависимость исследована как теоретически так и с помощью моделирования для различных форм рудных тел и представлена в виде графика-палетки [1]. С помощью палетки, по полученному при съемке отношению $\frac{\mathrm{Im}\,\bar{H}_{Z2}}{\mathrm{Re}\,\bar{H}_{Z2}}$ определяется параметр P По ω и η (l), в конечном счете, определяются физические свойства (γ и μ) рудного тела. По геометрической функции K определяются геометрические параметры рудного тела.

Таким образом, для наиболее полного извлечения информации, которую несет в себе аномальное возмущение, наблюдаемое при дипольном индуктивном профилировании, методика производства работ и конструкция технического средства (аппаратуры), обеспечивающего проведение работ данным методом, должны быть подчинены стремлению наиболее надежно, устойчиво и просто получить значение вектора $\frac{\bar{H}_{ZS}}{|H_{ZO}|}$, изменения амплитуды

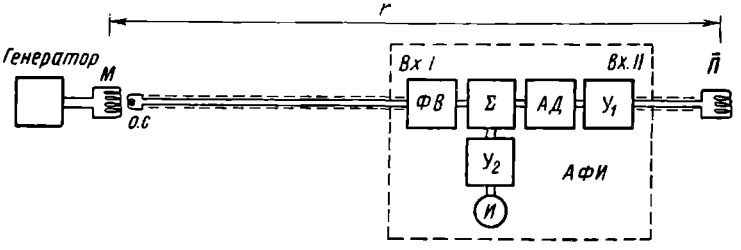


Рис. 2. Блок-схема установки для производства работ методом дипольного индуктивного профилирования с амплитудно-фазовыми измерениями

и фазы которого определяются изменением вектора $\frac{\bar{H}_{Z2}}{|H_{ZO}|}$, т. е. являются лишь следствием реакции рудного тела. Из векторной диаграммы (рис. 1) видно, что по амплитуде и фазе $\bar{H}_{ZS}$ отношение (5) можно определить аналитически, как

$$\frac{\mathrm{Im}\,\bar{H}_{Z2}}{\mathrm{Re}\,\bar{H}_{Z2}} = \frac{\left|\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}\right| \sin\varphi_A}{1 - \left|\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}\right| \cos\varphi_A} \qquad (6)$$

Наиболее надежно и просто фаза и амплитуда суммарного магнитного поля в относительных единицах нормального поля для метода ДИП могут быть измерены на специальной установке (рис. 2).

Проанализируем процесс измерений с помощью этого устройства и оценим возможные влияния основных функциональных узлов на точность определения исследуемых величин.

В устройстве осуществлен компенсационный принцип измерения, основанный на сравнении электрического сигнала, поступающего с приемной рамки $\bar{П}$, с опорным сигналом, подаваемым на вход I амплитудно-фазового измерителя *АФИ* с рамки *о. с.* Электрические сигналы в обеих рамках обусловлены э. д. с., индуцированной гармоническим магнитным полем диполя $\bar{M}$. Поэтому можно написать, что амплитуда опорного сигнала

$$E_{i\,(\text{о. с})} = LI\omega, \qquad (7)$$

где L — коэффициент взаимной индукции генераторной рамки и рамки опорного сигнала; I — сила тока в генераторной рамке.

В случае, когда вблизи установки нет электропроводных рудных тел, на приемную рамку действует нормальное магнитное поле, амплитудное значение которого равно H_{ZO}. Следовательно, амплитуда электрического сигнала, индуцированного в приемной рамке $\overline{П}$, в нормальном поле будет равна

$$E_{i\,(H_{ZO})} = S_{п} n_{п} \mu_{п} \omega H_{ZO}, \tag{8}$$

где $S_{п}$, $n_{п}\mu_{п}$ — соответственно, площадь, число витков и магнитная проницаемость сердечника приемной рамки.

В аномальном поле величина электрического сигнала, индуцированного в приемной рамке, будет, соответственно, равна

$$E_{i\,(H_{ZS})} = S_{п} n_{п} \mu_{п} \omega H_{ZO}, \tag{9}$$

Таким образом, на амплитудно-фазовый измеритель (рис. 2) поступают два вектора напряженности электрического поля в общем случае неравные по амплитуде и несовпадающие по фазе: с одной стороны (*Вх. I*) — $-E_{i\,(о.\,с)}$, с другой (*вх. II*),—$E_{i\,(H_{ZO})}$ или $E_{i\,(H_{ZS})}$ (рис. 3). Процесс измерения сводится к определению фазового сдвига φ_0 или φ_S и амплитуды электрического сигнала, поступающего с приемной рамки, в относительных единицах опорного сигнала. Измерения осуществляются компенсационным способом по нулевому показанию индикатора *И* (рис. 2). Для этого вектор $E_{(i\,о.\,с)}$ фазовращателем *ФВ* поворачивается на угол φ_0 или φ_S, а амплитуда электрического сигнала, поступающего с приемной рамки, амплитудным делителем *АД* ослабляется до значения, равного $E_{i\,(о.}$ Величина ослабления может быть определена, как

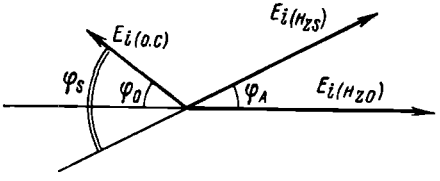


Рис. 3. Векторная схема электрических сигналов, поступающих на входы амплитудно-фазового измерителя

$$Q = a^{N} \tag{10}$$

где a — коэффициент аттенюации амплитудного делителя, N — показание аттенюатора.

Тогда на участках нормального поля величина электрического сигнала с приемной рамки определится как

$$\frac{\varkappa Ei\,(H_{ZO})}{E_{i_{(о.}} = a^{N_0}} \tag{11}$$

на участках аномального поля

$$\frac{\varkappa E_{i\,(H_{ZS})}}{E_{i\,(о.\,с)}} = a^{Ns} \tag{12}$$

где $\varkappa$ — коэффициент усиления предварительного усилителя $У_1$ N_0 и N_S — показания аттенюатора, соответственно, в нормальном и аномальном полях.

Образовав отношение (12) к (11) и учитывая равенства (8) и (9), получим

$$\frac{E_{i\,(H_{ZS})}}{E_{i\,(H_{ZO})}} = \frac{H_{ZS}}{H_{ZO}} = \frac{a^{N_S}}{a^{N_0}}. \tag{13}$$

Таким образом, отношение э. д. с., индуцированной на приемной рамке в аномальном магнитном поле, к э. д. с., индуцированной в нормальном поле, тождественно равно отношению модулей векторов напряженности суммарного и нормального магнитных полей и определяется равенством

$$\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}} = a^{N_S - N_0} \tag{14}$$

Сдвиг фазы вектора напряженности суммарного магнитного поля относительно нормального поля будет равен (рис. 3)

$$\varphi_A = \varphi_S - \varphi_0 \tag{15}$$

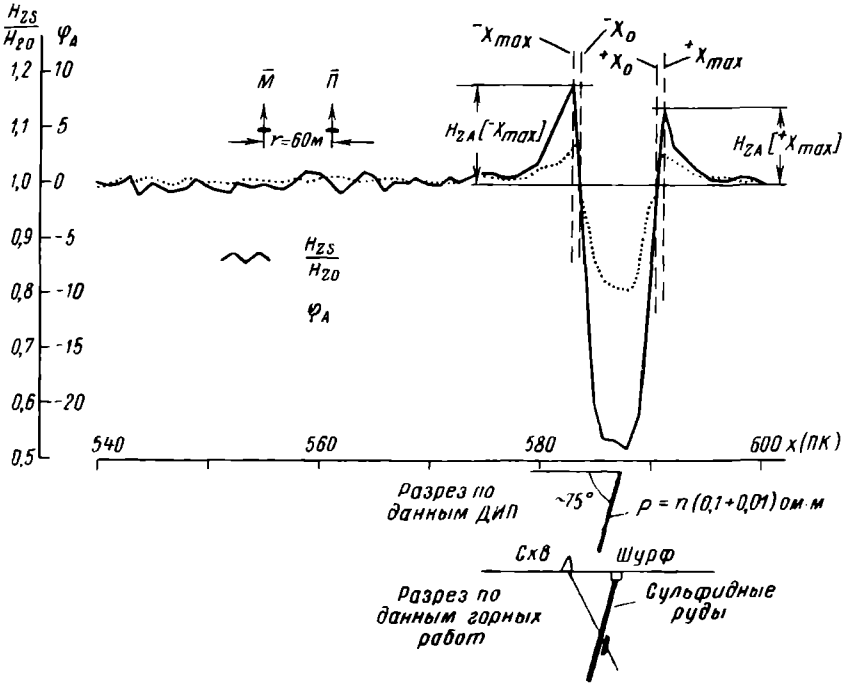


Рис. 4. Графики амплитуды и фазы дипольного индуктивного профилирования и их геологическое истолкование

Значения, определенные по формулам (14) и (15), являются конечными и представляются в виде графиков амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и фазы φ_A (рис. 4), по которым и производится интерпретация [1]. Величины N_0 и φ_0 выбираются по результатам измерений на протяженном ($\gg R$) безаномальном интервале профиля, где их значения практически не изменяются (флюктуируют в пределах точности).

Так как $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ не зависит от абсолютных значений отсчетов N_0 и N_S, а зависит только от их разности, можно заранее составить таблицу для определения $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ Такая таблица действительна для данного амплитудного делителя и не зависит ни от каких других факторов.

Для примера рассчитаем таблицу в интервале $(N_S - N_0)$, который необходим для построения графика в приводимом ниже примере обработки результатов наблюдений.

Чтобы обеспечить достаточную равномерность шкалы, аттенюатор должен состоять из дискретного (грубого) делителя амплитуды э. д. с. с постоянным коэффициентом деления от диапазона к диапазону и плавного, позволяющего непрерывно ослаблять сигнал в интервале между смежными диапазонами дискретного делителя. Для удобства расчета необходимо, чтобы интервал плавного делителя, в пределах которого осуществляется точное перекрытие двух смежных положений дискретного делителя, был разбит на сто делений. Тогда отсчет N может записываться в виде десятичной дроби, в которой показание дискретного делителя соответствует числу целых единиц, плавного — числу сотых долей. Например, в момент компенсации дискретный делитель занимает положение 7, а плавный — 52, можно записать $N = 7{,}52$.

Пусть коэффициент аттенюации $a = 1{,}5$, тогда согласно равенству (14)

$$\lg \frac{H_{ZS}}{H_{ZO}} = (N_S - N_0) \lg 1{,}5 = (N_S - N_0)\, 0{,}176. \qquad (16)$$

Задаваясь разными значениями $(N_S - N_0)$ и выполнив расчеты по формуле (16) с последующим потенцированием, получим значения $\frac{H_{ZS}}{H_{Z0}}$ в зависимости от $N_S - N_0$ (табл. 1). Пользуясь табл. 1, обработаем результаты полевых наблюдений, выполненных по профилю, пересекающему крутопадающий маломощный пласт (табл. 2). Измерения выполнены на частоте 2000 *гц* с разносом рамок $r = 60$ *м* и шагом 10 *м*. Непосредственно измеряемыми в поле величинами являются N_S и φ_S. Анализируя результаты наблюдений, замечаем, что на интервале 300 *м* (ПК 540 — ПК 578) значения N_S флюктуируют в пределах $\pm$ 0,03, φ_S — в пределах $\sim \pm$ 15 *мин*. Указанные флюктуации лежат в пределах полевой точности. Поэтому средние их значения на этом интервале могут быть приняты, соответственно за N_0 и φ_0. В данном случае $N_0 = 3{,}20$; $\varphi_0 = 67°30'$ Установленные N_0 и φ_0 записываются в журнале наблюдений в графе примечание. Затем вы-

Таблица 1

$(N_S - N_0)\,100$	$\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$		$(N_S - N_0)\,100$	$\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$		$\pm(N_S - N_0)\,100$	$\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$	
0	1,00	1,00	42	1,19	0,84	106	1,54	0,65
2	1,01	0,99	46	1,20	0,83	112	1,57	0,64
4	1,02	0,98	50	1,22	0,82	118	1,61	0,62
6	1,03	0,97	54	1,24	0,81	124	1,65	0,61
10	1,04	0,96	58	1,26	0,79	130	1,69	0,59
14	1,06	0,94	62	1,28	0,78	140	1,76	0,57
18	1,08	0,93	66	1,31	0,76	150	1,84	0,54
22	1,09	0,92	70	1,33	0,75	160	1,91	0,52
26	1,11	0,91	74	1,36	0,73	170	1,99	0,50
30	1,13	0,89	78	1,38	0,72	180	2,07	0,48
34	1,15	0,87	86	1,42	0,70	190	2,16	0,46
38	1,17	0,85	94	1,46	0,68	200	2,25	0,44

Таблица 2

№ ПК	Амплитуда			Фаза		Примечание
		$(N_S - N_0)\ 100$	$\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$	φ_S	$\varphi_A = \varphi_S - \varphi_0$	
540	3,20	0	1,00	67°24′	—6′	$\varepsilon = 0{,}1$
541	3,17	—3	0,98	67°00′	—30′	$E_{i\ (o.c)} = 500$
578	3,22	2	1,01	68°00′	—30′	N_0 3,20
580	3,29	9	1,04	68°48′	1°18′	φ_0 67°30′
582	3,50	30	1,13	69°18′	1°48′	
583	3,60	40	1,17	70°30′	3°00′	
584	2,94	—26	0,90	66°12′	—1°18′	
586	1,68	—152	0,54	58°30′	—9°00′	
588	1,61	—159	0,52	57°42′	—9°48′	
590	2,99	—21	0,92	66°00′	—1°30′	
591	3,51	+31	1,13	70°00′	+2°30′	
592	3,34	+14	1,06	69°30′	+2°00′	
594	3,24	+4	1,02	68°18′	48′	
596	3,21	1	1,003	68°00′	+30′	
598	3,22	2	1,01	68°12′	+42′	
600	3,20	0	1,00	68°00′	30′	

числяется разность $N_S - N_0$ и по табл. 1 определяются значения $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ На основании равенства (15) определяется φ_A.

По полученным значениям строятся графики амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и фазы φ_A (рис. 4), по которым и определяются данные о возмущающем объекте. При построении графиков за точку записи принимается центр установки.

После проведения линии нормального поля определяются абсциссы краевых максимумов ${}^{-}X_{max}$ и ${}^{+}X_{max}$ и точек перехода аномальных кривых через уровень нормального поля ${}^{+}X_0$ и ${}^{-}X_0$ (рис. 4). В данном случае ${}^{-}X_{max} = 583$; ${}^{-}X_0 = 583{,}7$; ${}^{+}X_0 = 590{,}4$; ${}^{+}X_{max} = 591$. Ширина аномалии, определяемая интервалом $|{}^{-}X_0 - {}^{+}X_0|$ с точностью до шага наблюдений, равна r, что характерно для аномалий, наблюдаемых над маломощными пластами (мощность меньше глубины залегания верхней кромки). Отношение $\frac{H_{ZA}({}^{-}X_{max})}{H_{ZA}({}^{+}X_{max})} \approx 1{,}3$, что соответствует углу падения $\sim 75°$ [1]. Направление падения определяется положением большего краевого максимума, т. е. в данном случае в сторону меньших пикетов. Последующие приемы интерпретации используются в соответствии с полученными выше выводами. Положение эпицентра $X_э$ крутопадающего маломощного пласта определяется, как

$$X_э = \frac{{}^{-}X_0 + {}^{+}X_0}{2} = \frac{583{,}7 + 590{,}4}{2} = 587{,}05.$$

Глубина залегания верхней кромки от уровня рамок находится из равенства

$$h = \frac{|{}^{-}X_{max} - {}^{-}X_0| + |{}^{+}X_{max} - {}^{+}X_0|}{2} = 6{,}5\ м.$$

Учитывая высоту расположения рамок ($h_0 \approx 1$ *м*), истинную глубину найдем как

$$h_{ист} = h - h_0 = 5{,}5 \text{ м}.$$

Удельная электропроводность пласта определяется на основании равенства (5). Отношение $\frac{\text{Im } H_{Z2}}{\text{Re } H_{Z2}}$ вычисляется по формуле (6), в которую для случая маломощного крутопадающего пласта подставляются значения φ_A и $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ наблюдаемые в центре (в минимуме) аномалии. В приводимом примере φ_A 9°30′ и $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}} = 0{,}54$. Следовательно, из равенства (6) получим

$$\frac{\text{Im } H_{Z2}}{\text{Re } H_{Z2}} = \frac{0{,}095}{0{,}46} \approx 0{,}2.$$

Этому отношению, согласно графику-палетке [1], соответствует значение параметра $P = 60$. Для маломощного пласта геометрическая функция η (l), входящая в выражение параметра, равна произведению мощности пласта на разнос рамок, поэтому продольную проводимость найдем, как

$$m\gamma = \frac{P}{\omega r \mu_0} = \frac{60}{2\pi 2000 \cdot 60 \cdot 4\pi 10^{-7}} = 63 \text{ сименса}.$$

Так как мощность m пласта не превышает первых единиц метров, удельное электрическое сопротивление пласта должно быть не больше десятых — сотых долей омметра. Такое низкое значение сопротивления явно указывает на рудный характер пласта.

Данные всех этих определений, цифровые и в виде разреза, передаются геологам для задания горных работ.

Очевидно, что достоверность результатов интерпретации аномалий ДИП определяется точностью измерения $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_A и надежностью связи изменения этих величин по профилю с реакцией рудного тела. Поэтому для грамотного выполнения работ совершенно необходимо знать все прочие факторы, не связанные с реакцией рудного тела, и характер их влияния на изменение $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_A с тем, чтобы свести их действие к минимуму выбором оптимальных методики и способа измерений и уверенным исключением их влияния при обработке материалов.

Как уже было сказано, оптимальной для поисков рудных тел высокой электропроводности является установка *ZZ*. Возможные «ложные» изменения амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и фазы φ_A из-за геометрической разориентации диполей в этой установке и способы их определения рассмотрены в работе [1].

Другие причины «ложных» изменений величин $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_A могут возникнуть под действием основных функциональных узлов аппаратуры. Анализ этих причин в литературе отсутствует, поэтому остановимся на них подробно. Прежде всего необходимо отметить, что при выборе принципа измерения и конструкции аппаратуры следует стремиться, чтобы таких причин было возможно меньше, и изменения значений амплитуды и фазы, вызванные ими, могли быть уверенно определены и просто исключены при

обработке. Наиболее полно этим условиям отвечает принцип, осуществленный в установке, блок-схема которой приведена на рис. 2.

Из формул (11) — (14) следует, что изменение измеренных установкой и рассчитанных по формуле (14) значений $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ вдоль профиля, является следствием реакции рудного тела в том случае, если величина опорного сигнала $E_{i\,(\text{о. с})}$ не зависит от геоэлектрических условий и исключены все другие причины его изменения, не приводящие к тождественным изменениям сигнала $E_{i\,(H_{ZS})}$. При этом характеристики функциональных узлов, связанных только с преобразованием сигнала H_{ZS} (*П*, $У_1$, *АД*), должны оставаться неизменными.

Зависимость сигнала $E_{i\,(\text{о. с})}$ от геоэлектрических условий принципиально недопустима, поэтому она должна быть исключена конструктивно. Это достигается расположением рамки опорного сигнала непосредственно на генераторной рамке так, что расстояние между ними можно считать бесконечно малым по сравнению с расстоянием до поверхности земли, а также использованием экранированного кабеля для передачи сигнала к измерителю *АФИ*. Так как опорный сигнал $E_{i\,(\text{о. с})}$ (7) и входящие в равенства (8) и (9) величины H_{ZO} и H_{ZS} прямо пропорциональны силе тока в генераторной рамке, то из равенств (11) — (13) следует, что изменение тока в генераторной рамке не влияет на относительную величину амплитуды, рассчитываемую по формуле (14). Это очень важный момент, так как сила тока наименее устойчивая величина.

Коэффициент взаимной индукции L, входящий в равенство (7), определяет лишь значение $E_{i\,(\text{о. с})}$ и не связан с величинами $E_{i\,(H_{ZO})}$ и $E_{i\,(H_{ZS})}$ равенств (8) и (9). Следовательно, вызванные им изменения опорного сигнала, согласно равенствам (11) — (13), приведут к «ложному» изменению относительной амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$. Поэтому необходимым требованием является сохранение постоянства L на интервале профиля, в пределах которого выбрано значение нормального поля (N_0 и φ_0) и находятся аномалии, рассчитываемые по этому значению нормального поля. Если по каким-либо причинам L изменится, следует повторить измерения в двух-трех точках и ввести соответствующие поправки, или же, когда это возможно, выбрать новые значения N_0 и φ_0, соответствующие измененному L, а следовательно и $E_{i\,(\text{о. с})}$. Так как при данной генераторной рамке L зависит лишь от относительного расположения рамки опорного сигнала и числа витков в ней, сохранение постоянного L не вызывает трудностей. Обычно рамка опорного сигнала жестко крепится к ободу генераторной рамки или помещается в корпус генератора. Поэтому L может измениться лишь после ремонта: изменения положения рамки о. с, числа витков в ней, установка новой рамки. Сведения о подобных заменах следует заносить в журнал, чтобы ясна была причина изменения отсчетов N_0 и φ_0. Очевидно, что все сказанное относится и к кабелю, по которому передается опорный сигнал. При смене концов подключения отсчет φ_0 изменится на 180°

Рассмотренные причины приводят к скачкообразному изменению опорного сигнала, вызывая соответствующие изменения отсчетов N_0 и φ_0. Эти изменения легко распознаются и учитываются. Достаточно лишь взять новые значения N_0 и φ_0.

Более неприятно влияние фазовращателя на амплитуду опорного сигнала. В процессе измерений положение фазовращателя изменяется в соответствии с изменением фазы φ_S при перемещении установки по профилю.

Поэтому, если амплитуда опорного сигнала, поступающего на сумматор $\sum$ (рис. 2), будет зависеть от положения фазовращателя, то сигналы, индуцированные в приемной рамке в нормальном и аномальном полях, будут нормироваться разными величинами $E_{i\,(\text{о. с})}$, и равенство (13) не будет справедливо. В этом случае для правильного определения значений $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$, рассчитываемых по формуле (14), необходимо отсчеты N_0 и N_S привести, согласно равенствам (11) и (12), к одному значению $E_{i\,(\text{о. с})}$. Закономерность изменения амплитуды опорного сигнала в зависимости от положения фазовращателя устанавливается по показанию индикатора. Для этого на вход I подается постоянный сигнал и при отключенном входе II наблюдаются показания индикатора при разных положениях фазовращателя (от 0° до 360°). Очевидно, что показания индикатора будут изменяться в соответствии с изменениями опорного сигнала, поступающего на сумматор. Из равенств (11) — (14) видно, что величина относительной амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ будет во столько раз занижена или завышена, во сколько раз опорный сигнал увеличится или уменьшится при изменении положения фазовращателя от φ_0 до φ_S.

Влияние фазовращателя требует дополнительных, хотя и несложных, вычислительных операций при обработке материалов. Это следует иметь в виду и стремиться устранить влияние фазовращателя конструктивным путем. Сумматор $\sum$, общий усилитель $У_2$ и индикатор $И$ не влияют на определяемые конечные величины $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_0, так как они общие для обоих сигналов (опорного и с приемной рамки).

Напряженность магнитного поля H_{ZS} в точке приемной рамки претерпевает преобразования в трех отдельных узлах. Поэтому, если их действие на обрабатываемый сигнал будет различным в нормальном и аномальном полях, то конечные результаты $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_A могут быть определены неверно, как и в случае нестабильности опорного сигнала. В приемной рамке магнитное поле преобразуется в электрический сигнал и, как видно из равенств (8) и (9), нужное отношение $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ будет тождественно равно отношению соответствующих электрических сигналов, если параметры приемной рамки не изменяются в нормальном и аномальном полях. Очевидно, что параметры приемной рамки изменяются в основном скачкообразно (например, уменьшение числа витков вследствие межвиткового замыкания и др.) и соответственно вызывают скачкообразное изменение отсчета. Эти «ложные» (не связанные с реакцией рудного тела) изменения учитываются и исключаются так же, как и в случае скачкообразного изменения опорного сигнала, т. е. перекрытием измерений в двух-трех точках и введением соответствующей поправки, или же выбором новых значений N_0 и φ_0, которые соответствуют показаниям в нормальном поле для рамки с новыми параметрами.

Предварительный усилитель $У_1$, как это видно из блок-схемы (рис. 2), не является принципиально необходимым узлом для обеспечения измерений данным способом и служит лишь для усиления сигнала $E_{i\,(H_{ZS})}$ с тем, чтобы довести его значение на сумматоре $\sum$ до необходимого уровня сигнала $E_{i\,(\text{о. с})}$. Это можно было бы сделать, увеличив мощность диполя. Однако в техническом отношении, если естественные помехи малы, удобнее приме-

нять усиление, поэтому обычно узел $У_1$ в аппаратуре имеется. В отличие от других, этот узел является активным (содержит в себе дополнительные источники э. д. с.), а поэтому его воздействие на обрабатываемый сигнал наименее устойчиво. Из уравнений (11) и (12) видно, что для удовлетворения равенства (13) необходимо, чтобы коэффициент усиления $\varkappa$ усилителя $У_1$ был постоянным в нормальном и аномальном полях. Обычно $\varkappa$ плавно уменьшается вследствие расхода питания. Это приводит к постепенному плавному уменьшению амплитуды $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и не отражается на фазе (рис. 5). Для приведения к первоначально выбранному постоянному значению нормального поля (пикеты 320—340) наблюдаемая невязка ΔA пропорционально разбрасывается по пикетам, в интервале которых отмечается снижение поля пикеты (340 — 390). Снижение поля указанного характера служит сигналом для восстановления (замены) питания усилителя $У_1$. Время смены питания отмечается в журнале наблюдений.

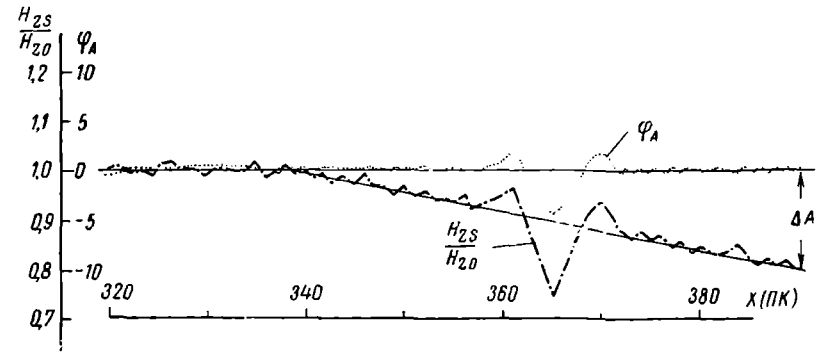


Рис. 5. Пример «ложного» изменения поля $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ из-за постепенного уменьшения коэффициента усиления предварительного усилителя $У_1$

Для уверенного установления причин скачкообразного изменения нормального поля следует периодически контролировать по индикатору и отмечать в журнале величину опорного сигнала.

Амплитудный делитель, выполняя функцию деления амплитуды сигнала $E_{i\,(H_{ZS})}$, не должен изменять его фазу. В противном случае так же, как и в случае влияния фазовращателя на амплитуду опорного сигнала, необходимо при обработке материала вводить соответствующие поправки. Закономерность влияния амплитудного делителя на фазу можно определить на модельной установке [1], размещая рамки в воздухе вдали от проводящих предметов. В этом случае можно считать, что рамки находятся в бесконечном однородном непроводящем пространстве, и изменением расстояния между ними можно добиться изменения амплитуды $E_{i\,(H_{ZS})}$ в широком пределе, без изменения фазы [3]. Тогда для обеспечения компенсации $E_{i\,(H_{ZS})}$ выбранным постоянным опорным сигналом необходимо устанавливать разные положения N амплитудного делителя. Влияние его на фазу, если оно имеется, оценивается по показаниям фазовращателя. То же самое можно проделать и с нормальными полевыми рамками на участках распространения высокоомных пород, если их влиянием можно пренебречь.

Для оценки возможности выделения аномалий над различными рудными телами необходимо знать точность измерения величин $\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}$ и φ_A, обеспечи-

ваемую данной установкой. Если все вышеуказанные причины «ложных» изменений поля устранены, точность измерения амплитуды и фазы определяется соотношением величины измеряемого сигнала и уровнем сигнала-помехи естественных электромагнитных полей или собственного шума аппаратуры. С учетом этого выбирается величина опорного сигнала. При величине сигнала-помехи ε точность измерения по амплитуде будет

$$\Delta\left(\frac{H_{ZS}}{H_{ZO}}\right) = \frac{\varepsilon}{E_{i\,(\text{о. с})}}, \tag{17}$$

по фазе

$$\Delta\varphi = 2\arcsin\frac{\varepsilon}{2E_{i\,(\text{о. с})}} \tag{18}$$

Величина ε определяется непосредственно на участке работ и соответствует показанию индикатора при включенной приемной рамке и выключенном генераторе. Значение ε фиксируется в журнале наблюдений. Из формул (17) и (18) следует, что, увеличивая мощность генератора при прочих равных условиях, можно добиться сколь угодно малого отношения сигнала-помехи к амплитуде измеряемого сигнала, а, следовательно, и сколь угодно высокой точности. Целесообразность повышения точности таким путем ограничивается возможностью практической ее реализации с учетом влияния других факторов. Главными из них являются флюктуации, отражающие неоднородности участка по электрическим свойствам, т. е. изменения поля, лежащие в физической основе метода, но отображающие не интересующие нас физико-геологические неоднородности строения участка земной коры, от которых принципиально избавиться нельзя. Наиболее помехоустойчивой является фаза, поэтому при задании точности, которую должна обеспечить аппаратура, нужно ориентироваться на измерение фазы. Из теоретических положений и опыта полевых работ в разных районах следует, что при проведении поисковых работ методом ДИП на основной частоте 2000 *гц* и $r = 100$ *м* практически может быть реализована точность измерения фазы 0,1° Для обеспечения такой точности отношение $\frac{\varepsilon}{E_{i\,(\text{о. с})}}$ должно быть равно, согласно равенству (18), 0,002. Эти данные должны быть заложены в основу при конструировании аппаратуры.

При реализации указанной точности, полагая, что поглощением вмещающих пород можно пренебречь и уверенно выделить аномалию, в пять раз превышающую точность измерения, получим следующую глубинность исследования [1]: при поисках крутопадающих (до 30°) маломощных пластов (параметр P оптимальный) — до 100 *м*; при поисках пологопадающих ($\leqslant 15°$), горизонтальных и мощных вертикальных пластов — до 150 — 200 *м*.

Рассмотренные вопросы являются основными, определяющими требования к аппаратуре и методику измерений и обработки результатов наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Якубовский Ю. В. Индуктивный метод электроразведки. Госгеолтехиздат, 1963.

3. Заборовский А. И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. Изд. МГУ, 1960.