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

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ДИПОЛЬНОГО ИНДУКТИВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

В. Х. Захаров

Под дипольным индуктивным профилированием (ДИП) понимается последовательное исследование амплитуды и фазы магнитного поля гармонического магнитного диполя, выполняемое при одновременном перемещении диполя-генератора и диполя-измерителя (точка измерения) вдоль определенного направления (профиля) на поверхности земли (рис. 1). Взаимное пространственное положение диполей (генераторной и приемной рамок) при профилировании сохраняется неизменным, поэтому относительные изменения поля в точках измерений являются лишь функцией геоэлектрических разрезов участков, пересекаемых установкой. Будем определять положение рамок в пространстве положением нормалей к их плоскостям. Тогда очевидно, что возможны следующие основные варианты взаимного расположения рамок на профиле: 1) *ZZ*, 2) *ZY*, 3) *ZX*, 4) *XX*, 5) *XY*, 6) *YY* На основании экспериментального и теоретического изучения установлено, что наиболее эффективной для обнаружения локальных рудных тел является установка *ZZ* — вертикальный возбуждающий диполь и измерение вертикальной составляющей магнитного поля. При этом рамки должны быть расположены на линии профиля, проложенного перпендикулярно предполагаемому простиранию искомых объектов [1]. На установках с другими возможными вариантами расположения диполей аномальный эффект теряется в погрешностях, обусловленных угловыми отклонениями рамок (неточность ориентации рамок в 1° для установки *ZX* вызывает ошибку 1,75% в относительных единицах нормального поля, тогда как для установки *ZZ* лишь 0,02%). Аномальный эффект, наблюдаемый на установке *XX*, примерно в четыре раза меньше, чем на установке *ZZ* [2].* Поэтому за основу при разработке метода была принята установка *ZZ* (рис. 1), и все последующие выводы относятся к ней.

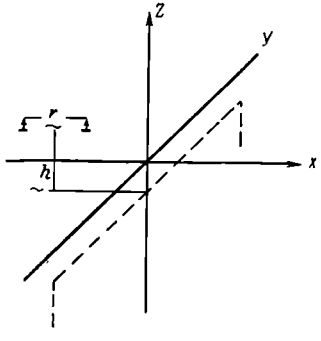


Рис. 1. Схема дипольного индуктивного профилирования. Установка *ZZ*:
r — разнос рамок; *h* — глубина верхней кромки рудного тела

* Приводимые сравнительные данные относятся к случаю наиболее распространенной формы сульфидных рудных тел — крутопадающего пласта.

Наиболее рациональным диапазоном частот для поисков и разведки сульфидных рудных тел методом ДИП является диапазон от 100 до 10000 *гц*. При работе в нем уверенно выделяются не только сами рудные тела, но и основные рудоконтролирующие структуры — зоны тектонических нарушений, характеризуемые сопротивлением в единицы — первые десятки омметров, тогда как другие геологические неоднородности, не представляющие интереса для поисковых целей, практически не вызывают искажения поля. Это позволяет наблюдать отчетливые аномалии над искомыми объектами на фоне спокойного нормального поля. Так, например, даже для самой высокой частоты 10000 *гц* и разноса рамок 100 *м*, при изменении удельного электрического сопротивления вмещающих пород от 5000 до 20000 *омм*, амплитуда поля изменяется не более чем на $\pm 0{,}5\%$ нормального поля и фаза на $\pm 30'$ [3].

Образование амплитудно-фазового возмущения поля локальными электропроводными телами в какой-либо точке профиля можно рассматривать как векторную сумму первичного (нормального) поля диполя и вторичного, обусловленного индуктированными в электропроводном теле вихревыми токами, величина которых пропорциональна э. д. с. индукции E_i.* В результате их сложения получается суммарный вектор $\vec{H}_{ZS}$, сдвинутый по фазе относительно нормального поля на угол φ. Аномалия по амплитуде

$$H_{ZA} = |\vec{H}_{ZS}| - |\vec{H}_{Z_0}|,$$

по фазе равна углу φ.

Разлагая вектор вторичного магнитного поля H_{Z2} на мнимую $\mathrm{Im}\,\vec{H}_{Z2}$ и вещественную $\mathrm{Re}\,\vec{H}_{Z2}$ составляющие, видим, что аномалия по фазе пропорциональна составляющей $\mathrm{Im}\,\vec{H}_{Z2}$, а по амплитуде составляющей $\mathrm{Re}\,\vec{H}_{Z2}$. В настоящее время имеются комплекты аппаратуры, позволяющие измерять, как квадратурные составляющие $\mathrm{Im}\,\vec{H}_{ZS} = \mathrm{Im}\,\vec{H}_{Z2}$ и $\mathrm{Re}\,\vec{H}_{ZS} = |\vec{H}_{Z_0}| - \mathrm{Re}\,\vec{H}_{Z2}$ (аппаратура ВИТРа), так и амплитуду суммарного вектора $\vec{H}_{ZS}$ и его фазу φ (аппаратура ЛГИ и Сибцветметавтоматики, г. Красноярск).

Из векторной схемы видно, что по амплитуде и фазе суммарного вектора элементарным расчетом могут быть получены квадратурные составляющие и наоборот.

Отношение $\dfrac{\mathrm{Im}\,\vec{H}_{Z2}}{\mathrm{Re}\,\vec{H}_{Z2}}$ в большинстве случаев для локальных электропроводных тел не зависит от точки измерения и однозначно определяет величину параметра

$$P = \gamma\mu\omega\eta\,(l),$$

где γ и μ — соответственно, удельная электропроводность и магнитная проницаемость рудного тела, ω — круговая частота возбуждающего поля, $\eta\,(l)$ — функция характерных линейных размеров (обычно имеет вид квадрата одного или произведения двух определяющих линейных размеров).

Для разработки надежных способов определения геометрических и физических параметров с помощью моделирования и теоретических расче-

---

* См. настоящий сб. Захаров В. Х. «Теория и практика амплитудно-фазовых измерений и обработка результатов при дипольном индуктивном профилировании» (рис. 1).

тов исследованы поля над различными по форме электропроводными телами: шар, горизонтальный цилиндр, маломощный пласт (мощность меньше глубины залегания верхней кромки пласта) любого падения; пласт конечной мощности (мощность сравнима или больше глубины залегания верхней кромки); сочетание параллельных пластов.

Над вертикальным маломощным пластом аномалии по амплитуде и фазе подобны и имеют форму симметричных кривых с двумя краевыми максимумами и центральным минимумом (рис. 2). Точки перехода кривых через значение нормального поля $\pm X_0$ соответствуют положениям установки, когда одна из рамок находится непосредственно над кромкой пласта, так что расстояние между ними равно разносу рамок. По этим точкам с высокой точностью определяется местоположение пласта в плане. Абсциссы краевых максимумов $\pm X_{max}$ связаны с глубиной залегания верхней кромки пласта равенством [2]

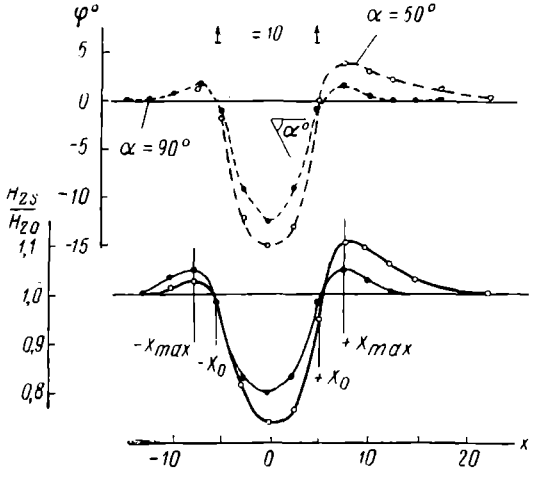


Рис. 2. Аномалии ДИП над маломощным вертикальным и наклонным пластом (H_{Z_0} и H_{ZS} — соответственно, вертикальные составляющие нормального и суммарного полей)

$$h = (\pm X_{max}) - (\pm X_0) = |X_{max}| - \frac{r}{2}$$

Функция линейных размеров, входящая в выражение параметра P, для крутопадающего маломощного пласта равна произведению мощности пласта m на разнос рамок r. Таким образом, измерив амплитуду и фазу суммарного вектора или его квадратурные составляющие и составив отношение $\frac{\mathrm{Im}\, H_{Z2}}{\mathrm{Re}\, H_{Z2}}$, определим по графику (рис. 3) параметр P, а затем продольную проводимость пласта как

$$m\gamma = \frac{P}{\mu\omega r}$$

Заметим сразу же, что для сильно магнитных тел на достаточно низких частотах аномалии по амплитуде имеют противоположный знак и достигают нескольких сот процентов, а фазовые аномалии отсутствуют. Варьируя частотами, можно определить раздельно μ и γ [2].

Значение оптимального параметра, при котором наблюдается максимальная аномалия по фазе, равно одиннадцати, исходя из которого определяется оптимальная частота для поисков рудных тел с заданными свойствами.

Наклон пласта приводит к асимметрии аномалий — увеличиваются краевые максимумы со стороны направления падения пласта и уменьшаются с противоположной. Угол падения определяется по отношению аномальных значений в краевых максимумах $-\frac{H_{ZA}(+X_{max})}{H_{ZA}(-X_{max})}$ [2]. Глубина залегания верхней кромки пласта определяется так же, как и для вертикального пласта, но при этом используется лишь ветвь аномальной кривой со сто-

роны противоположной направлению падения пласта. Отношение $\frac{\mathrm{Im}\, H_{Z2}}{\mathrm{Re}\, H_{Z2}}$ для определения параметра берется, как и для вертикального пласта, в минимуме, где наблюдается максимальное аномальное значение.

Для тел других форм разработаны аналогичные способы вычислений — по распределению поля, или по форме аномальной кривой, определяются геометрические элементы тел, а по соотношению амплитудной и фазовой аномалий — проводимость. Для пласта конечной мощности, кроме величин, указанных для маломощного пласта, по наблюдаемым над ним аномалиям определяется мощность пласта, а для ряда параллельных пластов — расстояние между ними [2]. По амплитудно-фазовым аномалиям ДИП над шаром и горизонтальным цилиндром однозначно определяются их радиус, глубина залегания центра и удельная электропроводность [4].

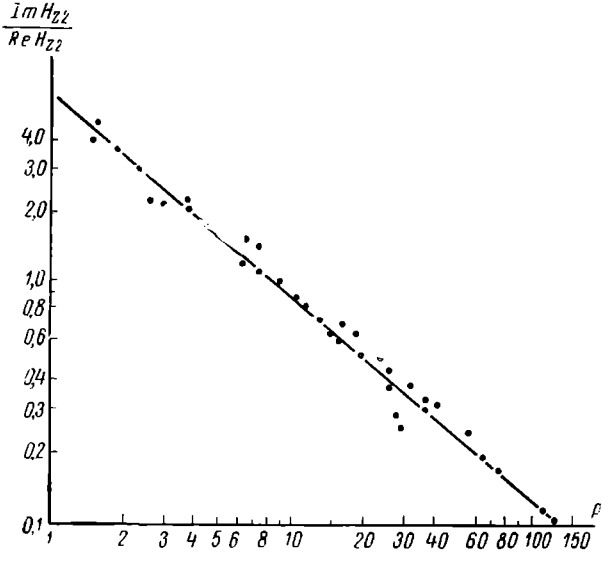


Рис. 3. График-палетка зависимости отношения $\frac{\mathrm{Im}\, H_{Z2}}{\mathrm{Re}\, H_{Z2}}$ от параметра P для маломощного пласта (по данным моделирования)

Начиная с 1962 г., метод дипольного профилирования с амплитудно-фазовыми измерениями применяется в производственных масштабах. За это время наблюдения выполнены как над известными уже разведанными горными работами месторождениями, так и на закрытых участках с поисково-разведочными целями. Многие аномалии после их рекомендации были проверены горными работами.

Основной объем поисково-разведочных работ выполнен на Кольском полуострове. По геоэлектрическим условиям этот район является благоприятным для проведения поисковых работ индуктивными методами. Вмещающие породы и четвертичные отложения имеют высокие удельные электрические сопротивления (от нескольких сот до тысяч и десятков тысяч омметров) и практически не вызывают искажения нормального поля даже на самой высокой частоте 7500 *гц*. Рудные тела имеют низкое сопротивление (до сотых — тысячных долей омметра) и хорошо отмечаются уже на сравнительно низких частотах.

Анализ аномальных полей и сравнение данных интерпретации с результатами последующих проверок горными работами показали, что в данных условиях по аномалиям ДИП уверенно определяются форма возмущающего объекта (рудного тела), его геометрические элементы и условия залегания, на основании вычисления удельного электрического сопротивления надежно отделяются сульфидные рудные тела от безрудных зон тектонических нарушений. В качестве иллюстрации возможностей метода приведены случаи сложных аномалий с результатами их интерпретации и данными последующих проверок (рис. 4).

На участке *I* (рис. 4, *а*) основные поисковые работы выполнены на частоте $f = 7500$ *гц* при разносе рамок $r = 60$ *м*. Выявленные аномалии имеют особенность, заключающуюся в резком несоответствии характера правых ветвей амплитудной и фазовой аномальных кривых — краевой максимум амплитудной кривой не сопровождается таковым на фазовой кривой, а напротив, на фазовой кривой образуется здесь новый минимум. Такой характер амплитудной и фазовой аномалий может быть объяснен двояко. Первое наиболее вероятное объяснение заключается в том, что на этом пикете (103) имеется пласт сравнительно высокого сопротивления, который вызывает лишь фазовую аномалию. Если это так, то с понижением частоты

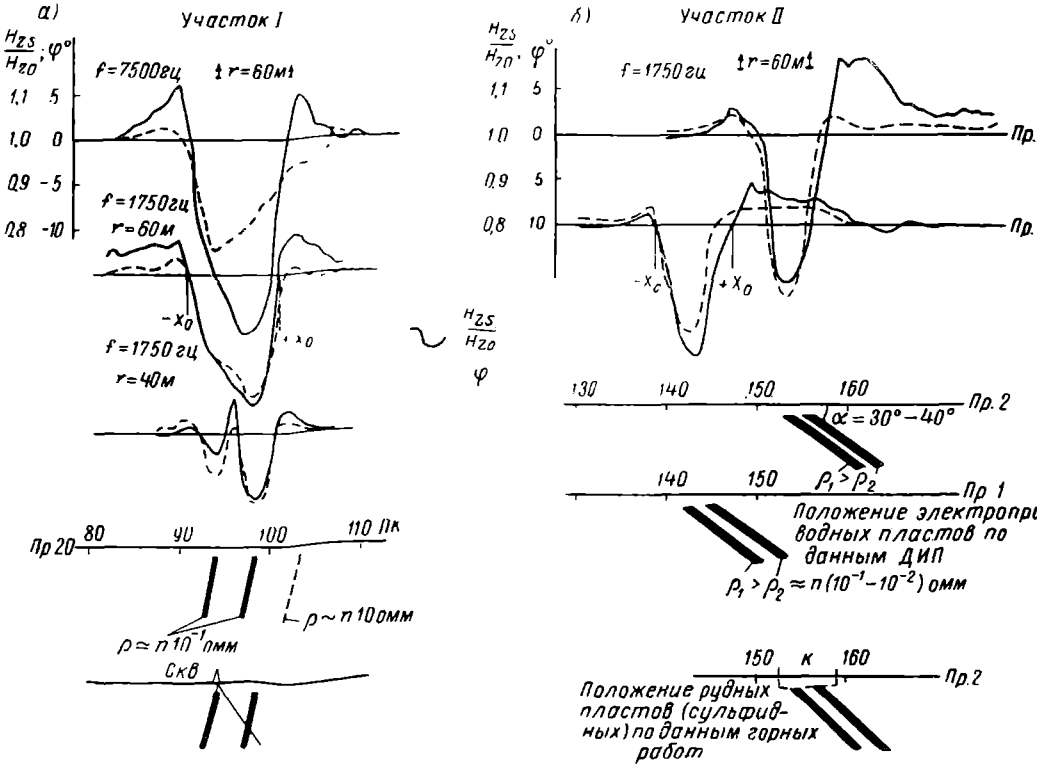


Рис. 4. Примеры сложных аномалий ДИП (ρ — удельное электрическое сопротивление)

эта аномалия должна исчезнуть. Второе объяснение — весьма пологое ($\sim 10 — 15°$) падение пластов в сторону возрастания номеров пикетов, что может вызвать отмеченное искажение фазовой аномальной кривой на этом фланге [2], но в этом случае форма аномалии не изменится с понижением частоты. Проведя измерения на частоте 1750 *гц*, убеждаемся в правильности первого предположения. Ширина основной аномальной зоны (расстояние между точками перехода через значение нормального поля $-X_0$ и $+X_0$) на частоте 1750 *гц* осталась такой же, как и на частоте 7500 *гц* по амплитудной кривой, и составляет 105 *м*. Это позволяет заключить, что аномалия вызвана или пластом с мощностью $m = 105 — r = 45$ *м*, или совокупностью параллельных маломощных пластов с расстоянием между крайними 45 *м*. Выполнив наблюдения с разносом рамок 40 *м*, убеждаемся, что аномалия обусловлена двумя параллельными пластами, расположенными друг от друга на расстоянии 45 *м*. При этом разносе ра-

мок каждый пласт фиксируется отдельно. Окончательные выводы и результаты горных работ изображены на рис. 4, *а*).

Особенностью аномалий, которые наблюдались на участке *II* (рис. 4, *б*). является относительное параллельное смещение амплитудной и фазовой аномальных кривых так, что отношение фазовых аномальных значений к амплитудным в левых ветвях меньше, чем в правых. Это говорит о том, что аномалия вызвана двумя маломощными сближенными пластами, при этом пласт, расположенный справа, имеет большую проводимость, чем пласт, находящийся слева. Угол падения пластов определяется по отношению аномальных значений в краевых максимумах $-\frac{H_{ZA}(+X_{max})}{H_{ZA}(-X_{max})}$. Окончательные выводы приведены на рис. 4, *б*. Заданная для проверки на профиле *2* канава вскрыла в указанном интервале два сближенных пласта (рис. 4, *б*). Согласно описанию они характеризуются следующими данными: пласт, расположенный слева, несет в себе пирит-пирротиновую минерализацию от вкрапленной до сплошной; пласт, расположенный справа, кроме такой же минерализации, содержит в висячем боку пропласток мощностью 0,5 *см*, представленный сплошным халькопиритом.

Кроме работ на Кольском полуострове, в небольшом объеме выполнялись наблюдения в Восточном Забайкалье [2]. Объектами поисков здесь являлись зоны полиметаллических оруденений, имеющие удельное электрическое сопротивление порядка единиц — десятых долей омметра, среди вмещающих пород в первые сотни омметров и перекрывающих четвертичных отложений, характеризующихся сопротивлением от сотен до первых десятков омметров. Несмотря на неблагоприятные геоэлектрические условия для индуктивных методов электроразведки, здесь на всех рудопроявлениях также были получены четкие аномалии ДИП. Однако вычислить все параметры удается не всегда. Можно лишь уверенно провести оси проводимости и иногда оценить мощность зон. В случаях, когда скопления сульфидных минералов образуют отдельные линзы или пропластки внутри мощных тектонических зон нарушений, их удается выделить по форме амплитудной и фазовой аномалий, отражающих локальное понижение сопротивления. Зона нарушения отмечается общей широкой аномалией, преимущественно фазовой, и на фоне ее над линзой сульфидов наблюдается локальное увеличение аномальных значений по амплитуде.

Метод ДИП мобилен и обладает высокой производительностью. За 7 *ч* рабочего времени с используемым комплектом аппаратуры производительность достигала 650 — 700 точек по сети 100 × 10 *м* в условиях IV категории местности при полевой бригаде в пять человек. При некоторой модернизации аппаратуры производительность может быть повышена и определится практически лишь временем перехода по профилю (на измерение амплитуды и фазы на одной точке требуется 5—10 *сек*), а состав бригады уменьшен до трех-четырех человек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров В. Х. Зависимость аномалии от направления пересечения вертикального маломощного пласта при дипольном электромагнитном профилировании. Изв. АН СССР. Сер. геофиз., № 12, 1961.

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

3. Гасаненко Л. Б. Нормальное поле вертикального гармонического низкочастотного магнитного диполя. Сб. «Вопросы геофизики». Уч. зап. ЛГУ, № 249. Вып. 10, 1958.

4. Захаров В. Х. Интерпретация аномалий дипольного электромагнитного профилирования над телами вращения (шар, цилиндр). Изв. АН СССР. Сер. геофиз., № 4, 1964.