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

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫЕ АНОМАЛИИ ДИПОЛЬНОГО ИНДУКТИВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ НАД СЛОЖНЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМИ ЗОНАМИ

В.Х.ЗАХАРОВ

Определяющим фактором при образовании результирующей аномальной кривой над сложной электропроводной зоной является расстояние между отдельными пластами, слагающими зону. При этом в зависимости от расстояния основные изменения аномальных значений, очевидно, будут происходить в точках интервала между пластами – местах наиболее сильного взаимного влияния соседних пластов. Поэтому достаточно установить закономерности этих изменений на примере двух пластов.

Основные варианты структурных положений двух пластов – вертикальные пласты (рис.1), наклонные пласты согласного падения (рис.2, а), наклонные пласты синклинального (рис.2,б) и антиклинального (рис.2,в) падений. Для установления влияния условий взаимного залегания пластов во всех вариантах использовали пары моделей-пластин одинаковой удельной электропроводности. С целью оценки влияния различия электропроводности исследована пара пластин разной электропроводности.

Из анализа результатов модельных исследований (рис.1, 2) следует, что для всех вариантов структурных положений пластин при расстоянии между ними $d \geqslant 0{,}8\,r$ (r – разнос рамок-диполей) результирующая аномалия над ними определяется суперпозицией аномалий над соответствующими уединенными пластинами. В соответствии с этим и структурным положением пластин и отмечаются те или иные особенности в результирующей аномалии. При этом над каждой из пластин наблюдают еще более или менее отчетливо выраженные минимумы аномальных значений.

При $d \leqslant 0{,}5$ над обеими пластинами отмечается один общий минимум и, кроме того, начинает сказываться эффект близости, т.е. каждая из пластин уже не создает того аномального поля, которое она создавала бы в уединении.

Эффект близости проявляется прежде всего в изменении отношения фазовой аномалии к амплитудной:

$$I_m H_{zx} / \mathrm{Re} H_{zx} . \qquad (1)$$

Как видно из рис.1,а, отношение (1), взятое в точках минимумов, практически постоянно при $d \geq 0{,}8r$ и соответствует практически продольной проводимости (произведению мощности m на удельную электропроводность пластин γ) одной пластины. При дальнейшем же уменьшении d отношение (1) постепенно уменьшается и, когда расстояние между пластинами становится меньше глубины h залегания их верхних кромок, вновь приходит к постоянному значению, но уже соответствующему удвоенной продольной проводимости. Эффект близости проявляется и в виде некоторого нарушения подобия форм амплитудной и фазовой аномалий. Особенно отчетливо это про-

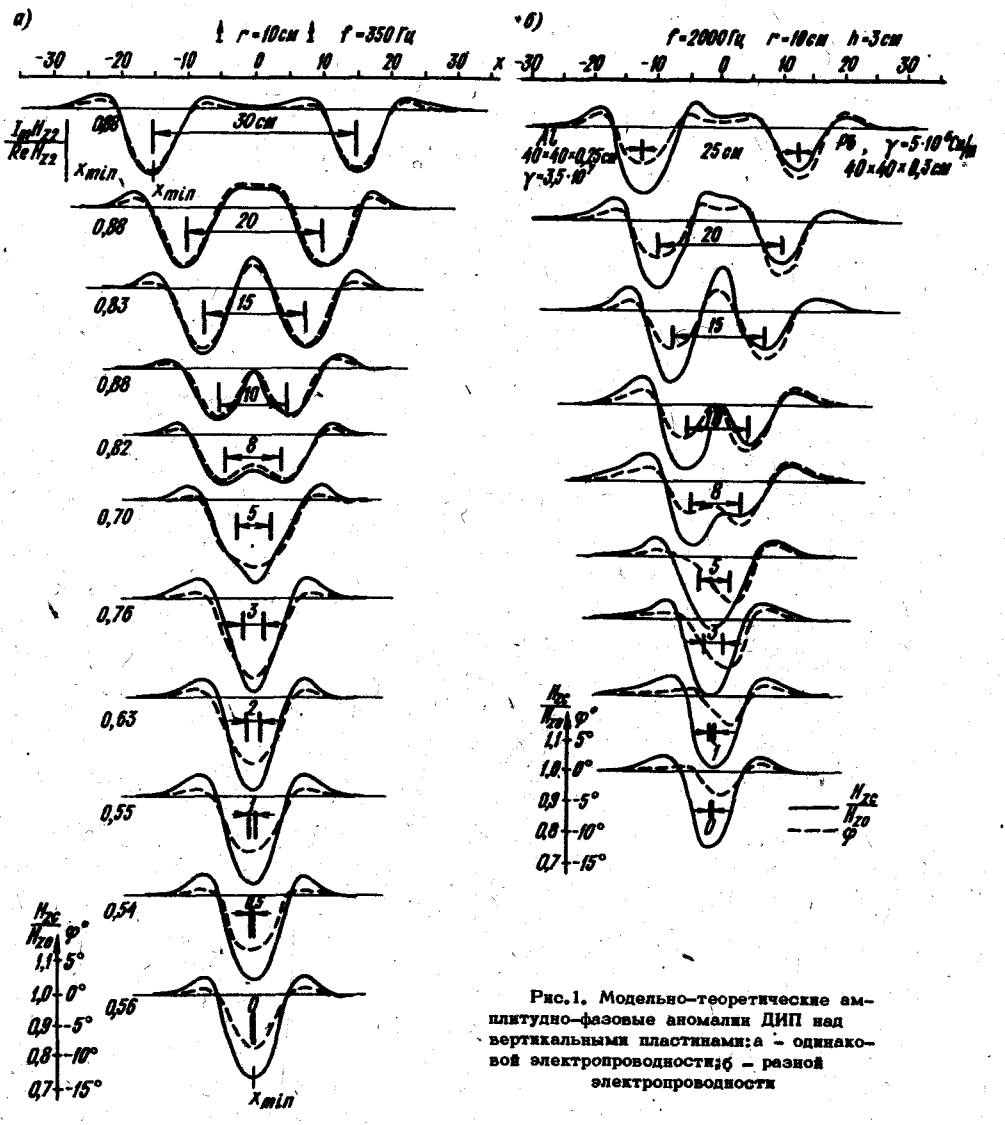


Рис.1. Модельно-теоретические амплитудно-фазовые аномалии ДИП над вертикальными пластинами: а – одинаковой электропроводности; б – разной электропроводности

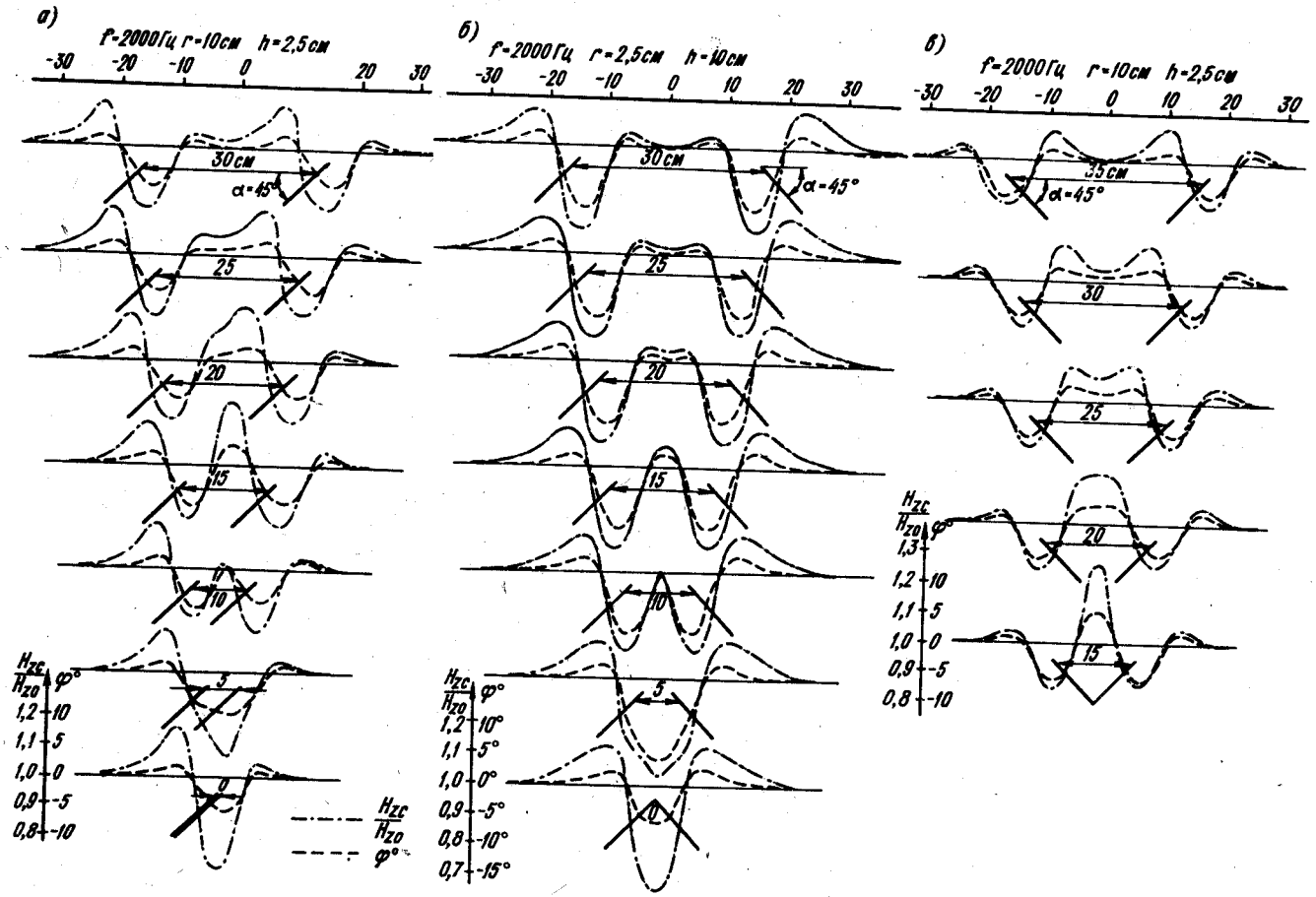


Рис. 2. Модельно-теоретические амплитудно-фазовые аномалии ДИП над наклонными пластинами

является, когда d сравнимо с h (рис.1, а, d равно 2 и 3 см). Для этих случаев точки перехода фазовых кривых через значение нормального поля уже не совпадают с соответствующими точками амплитудных кривых. Интервал между точками перехода для фазовой аномалии шире, чем для амплитудной. Такое поведение их объясняется взаимной индукцией вихревых токов соседствующих пластин, в результате которой появляется так называемое «третичное" поле [1]. При $d > h$ расстояние между точками перехода аномальных кривых через значение нормального поля (среднее по амплитудной и фазовой аномалиям) равно $r + d$, при $d < h$ оба пласта отмечаются как один маломощный пласт удвоенной продольной проводимости и это расстояние равно разносу рамок.

Одной из важных для практики поисково-разведочных работ является задача выделения рудных тел повышенной электропроводности среди других геологических объектов, также обладающих хорошей электропроводностью. Для оценки этой возможности метода ДИП проведены модельные исследования поля над двумя пластинами различной электропроводности (рис.1, б).

В качестве моделей использованы алюминиевая и свинцовая пластины, отличающиеся по продольной проводимости лишь в пределах одного порядка. Наблюдения выполнены на частоте 2000 Гц. Для алюминиевой пластины эта частота больше оптимальной, для свинцовой несколько меньше. Поэтому, в соответствии с зависимостью амплитудно-фазовых аномалий от параметра $P = m\gamma\mu\omega r$ (ω – круговая частота возбуждающего поля, μ – магнитная проницаемость пластины) [1], над алюминиевой пластиной преобладает амплитудная аномалия, над свинцовой – фазовая. Контрастность проявления разной проводимости пластин в характере результирующей амплитудно-фазовой аномалии усиливается с уменьшением расстояния между пластинами до $d = 0{,}8r$. Это объясняется неэквивалентной компенсацией отрицательных амплитудных и фазовых аномальных значений в минимумах положительными аномальными значениями налагающихся на минимумы краевых максимумов. При оценке электропроводности это следует учитывать. Во внешних краевых максимумах аномальные значения практически не искажены, т.е. являются лишь следствием реакции одной соответствующей крайней пластины, и, таким образом, одно из слагаемых результирующего аномального значения в минимуме известно. Проведя соответствующие сложения, получим исправленные, соответствующие действию одной пластины, значения и в минимумах. По исправленным значениям амплитуды и фазы в минимумах проводимость каждой пластины определяют как и для уединенной [1, 2].

При $d \leqslant 0{,}5\,r$ обе пластины отмечаются одним общим минимумом амплитудно-фазовой аномалии, при этом наблюдается относительное смещение фазового и амплитудного минимумов. Фазовый минимум смещен в сторону худшего проводника, обуславливающего преимущественно фазовую аномалию, амплитудный – в сторону лучшего проводника, вызывающего преимущественно амплитудную аномалию. Это характерное смещение наблюдается при уменьшении расстояния между пластинами вплоть до их контакта, когда образуется один маломощный пласт, неоднородный по электропроводности.

Рассмотрим типичные примеры амплитудно-фазовых аномалий ДИП для сложных зон электропроводности из практики полевых работ и принципы их расшифровки на основе установленных закономерностей.

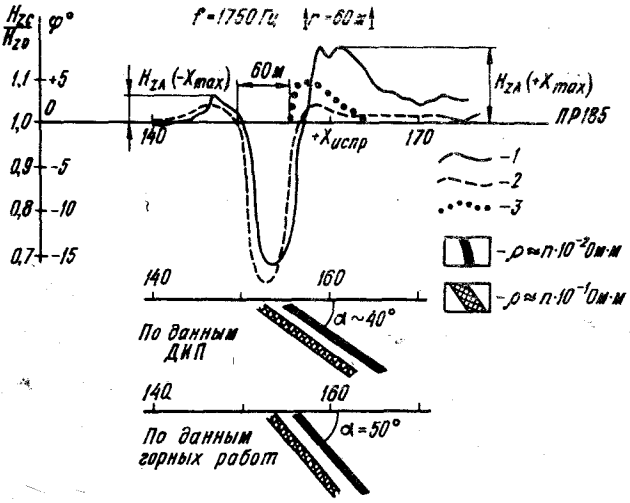


Рис.3. Практические аномалии ДИП над двумя пластами разной электропроводности

1 – наблюденная кривая амплитуды $\frac{H_{zc}}{H_{z0}}$; 2 – кривая фазы $\varphi°$; 3 – восстановленный краевой максимум амплитудной аномальной кривой, обусловленной только левым пластом

Одним из распространенных типов осложненных амплитудно-фазовых аномалий ДИП являются аномалии вида, представленного на рис.3. От аномалий над уединенным пластом их отличает смещение амплитудной и фазовой аномальных кривых относительно друг друга. Сопоставляя данную амплитудно-фазовую аномалию с модельными над двумя пластинами разной электропроводности (рис.1, б), не трудно определить, что она соответствует двум маломощным пластам разной электропроводности, расположенным друг от друга на расстоянии $d \approx 1/3\, r$. Общий параметр P для обоих пластов здесь меньше, чем в приведенном теоретическом примере, в соответствии с бо́льшим отношением фазового аномального значения к амплитудному (в минимумах). Согласно смещению фазовой аномалии относительно амплитудной, слева располагается пласт с худшей электропроводностью. Пласты падают вправо, о чем свидетельствует значительно больший по интенсивности и ширине с этой стороны краевой максимум амплитудной кривой. Угол падения в данном случае можно определить, как и для уединенного пласта [1], по отношению аномальных значений в краевых максимумах амплитудной кривой (рис.3):

$$H_{AZ_{(+X_{max})}} \Big/ H_{AZ_{(-X_{max})}} \,. \qquad (2)$$

Так как со стороны направления падения расположен пласт более высокой электропроводности, то отношение (2) будет практически таким же, как и для соответствующего наклонного уединенного пласта. При обратном соотношении электропроводности пластов такого соответствия не будет, так как, с одной стороны, краевой максимум увеличится за счет падения в эту сторону, а с другой, за счет пласта более высокой электропроводности, создающего поэтому больший аномальный эффект по амплитуде. Возможно даже, что интенсивности краевых максимумов вследствие этого могут сравняться, как в нашем примере на фазовой кривой. Очевидно, что это может произойти и

вследствие разных глубин залегания пластов. В таких случаях следует внимательнее оценивать направление и величину угла падения и, конечно, всегда использовать данные по соседним профилям.

В рассматриваемом примере отношение (2) равно 3, что соответствует углу падения 40^0 [1]. Положение в плане верхней кромки левого пласта определяют по точке перехода левой ветви фазовой аномальной кривой через линию нормального поля, отложив от нее к центру аномалии полуразнос рамок $r/2$. В случае двух близко расположенных друг от друга пластов эта точка может сместиться ближе к левому пласту вследствие наложения краевого максимума от соседнего правого пласта. Однако в данном примере указанный краевой максимум мал, так как расположен со стороны, противоположной направлению падения (см.рис.2, а), и, кроме того, обусловлен пластом (правым), который вообще вызывает меньшую фазовую аномалию. Учитывая, что точка перехода аномальной кривой через линию нормального поля находится в зоне максимальных градиентов, ее смещение будет мало и определится равенством

$$\Delta X = \frac{\Delta\varphi^{\text{п}}\left(X_{\text{л.п}} - \frac{r}{2}\right)}{\left.\frac{\partial\varphi^{(\text{л})}}{\partial X}\right|_{X=\left(X_{\text{л.п}} - \frac{r}{2}\right)}}, \qquad (3)$$

где $X_{\text{л.п}}$ – абсцисса верхней кромки левого пласта; $\varphi^{\text{п}}$ – значение фазы в точке $X_{\text{л.п}} - \frac{r}{2}$, обусловленное правым пластом; $\frac{\partial\varphi^{(\text{л})}}{\partial X}$ – градиент левой ветви фазовой кривой, обусловленной левым пластом.

Положение в плане верхней кромки правого пласта следует определять по правой ветви амплитудной кривой, так как с этой стороны преобладает амплитудная аномалия. Однако точка перехода через значение нормального поля этой ветви аномальной кривой смещена к центру аномалии относительно того положения, которое она занимала бы в присутствии только одного правого пласта. Величина смещения определяется выражением (3), в котором фазовые значения надо заменить соответствующими амплитудными. Так как пласты падают вправо, то налагающийся краевой максимум от левого пласта имеет большую интенсивность (рис.2, а) и, следовательно, может вызвать заметное смещение результирующей ветви кривой к центру. Предельную величину этого смещения практически можно оценить, восстановив правый краевой максимум амплитудной аномальной кривой, вызванной только левым пластом (рис.3). Интенсивность (предельную) восстанавливаемого максимума принимают равной половине суммарного, а начало – в точке, отстоящей на расстоянии r от точки перехода через ноль левой ветви фазовой кривой. Соблюдая соответствующую закономерность, получим восстановленный краевой максимум, обуславливаемый только левым пластом. Очевидно, что абсцисса точки пересечения ветвей восстановленного краевого максимума и результирующего наблюденного определит абсциссу точки перехода через линию нормального поля правой ветви аномальной кривой, связанной только с правым пластом ($^{+}X_{0\,\text{испр}}$). Отложив от этой точки расстояние $\frac{r}{2}$ к центру аномалии, найдем абсциссу верхней кромки правого пласта. Суммарную продольную проводимость обоих пластов определим, как и для единичного мало-

мощного пласта, по отношению (1), взятому в минимуме. Затем определяем глубину залегания по интенсивности амплитудной и фазовой аномалий в минимуме, пользуясь векторной диаграммой, или по характерным точкам аномальных кривых [1]. Однако при наложении односторонних максимумов глубина по характерным точкам получается завышенной.

Результаты данных ДИП и последующей проверки горными работами приведены на рис.3. Канавой вскрыты два пласта с пирит-пирротиновой минерализацией (20-30%), в висячем боку правого пласта отмечен пропласток сплошного халькопирита.

Другой тип сложной аномалии, также часто встречающейся в практике поисковых работ, приведен на рис.4, а. Рядовая съемка на этом участке выполнена на частоте 7500 Гц с разносом рамок 60 м. Наблюденная при этой съемке аномалия явно отличается от аномалии над уединенным маломощным пластом. Во-первых, правая ветвь фазовой аномальной кривой резко отличается от амплитудной – на интервале краевого максимума амплитудной кривой фазовая кривая, напротив, образует здесь следующий минимум, и, во-вторых, ширина основного минимума равна 105 м, т.е. на 45 м шире, чем для уединенного маломощного пласта.

Отрицательные аномальные значения по фазе на интервале правого краевого максимума амплитудной кривой, по-видимому, обусловлены присутствием на этом фланге пласта сравнительно невысокой электропроводности, который вызывает практически лишь фазовую аномалию. Тогда, согласно частотной зависимости амплитудно-фазовых аномалий ДИП, при понижении частоты эта фазовая аномалия должна резко уменьшиться или исчезнуть. Действительно, на частоте 1750 Гц здесь уже практически не наблюдается аномального понижения фазы, ширина же основного минимума осталась прежней (105 м). Такая ширина может быть обусловлена или двумя маломощными пластами с расстоянием между ними $d = 105 - 60 = 45$ м, или серией пластов с таким же расстоянием между крайними, или пластом мощностью 45 м. Проведя наблюдения при $r = 40$ м, устанавливаем, что основная аномалия обусловлена двумя маломощными пластами с расстоянием между ними 45 м. При $r = 40$ м каждый из них фиксируется соответствующим отдельным минимумом. Положение пластов определяется по внешним ветвям аномальных кривых, проводимость – по отношению (1) в соответствующих минимумах аномалии, наблюденной при $r = 40$ м. Положение крайнего правого пласта, обусловившего лишь фазовую аномалию на частоте 7500 Гц, определим по внешней ветви фазовой аномалии, отложив от точки ее перехода через ноль внутрь аномалии $\frac{r}{2}$. Окончательные результаты данных ДИП и последующего бурения приведены на рис.4, а. Бурением подсечены два пласта, представленные сильно графитизированными породами с вкрапленностью пирита и пирротина. Их положение и свойства соответствуют данным определений ДИП. Пласт более высокой электропроводности, по данным бурения, почти нацело сложен графитом.

Более общий тип сложной аномалии представлен на рис.4, б. Здесь амплитудная аномалия имеет классический вид, соответствующий одиночному маломощному наклонному пласту, – ширина ее минимума (61 м) с точностью до шага наблюдений равна разносу рамок, интенсивный и широкий максимум справа определяет угол падения в эту сторону (55°). Фазовая же аномалия суще-

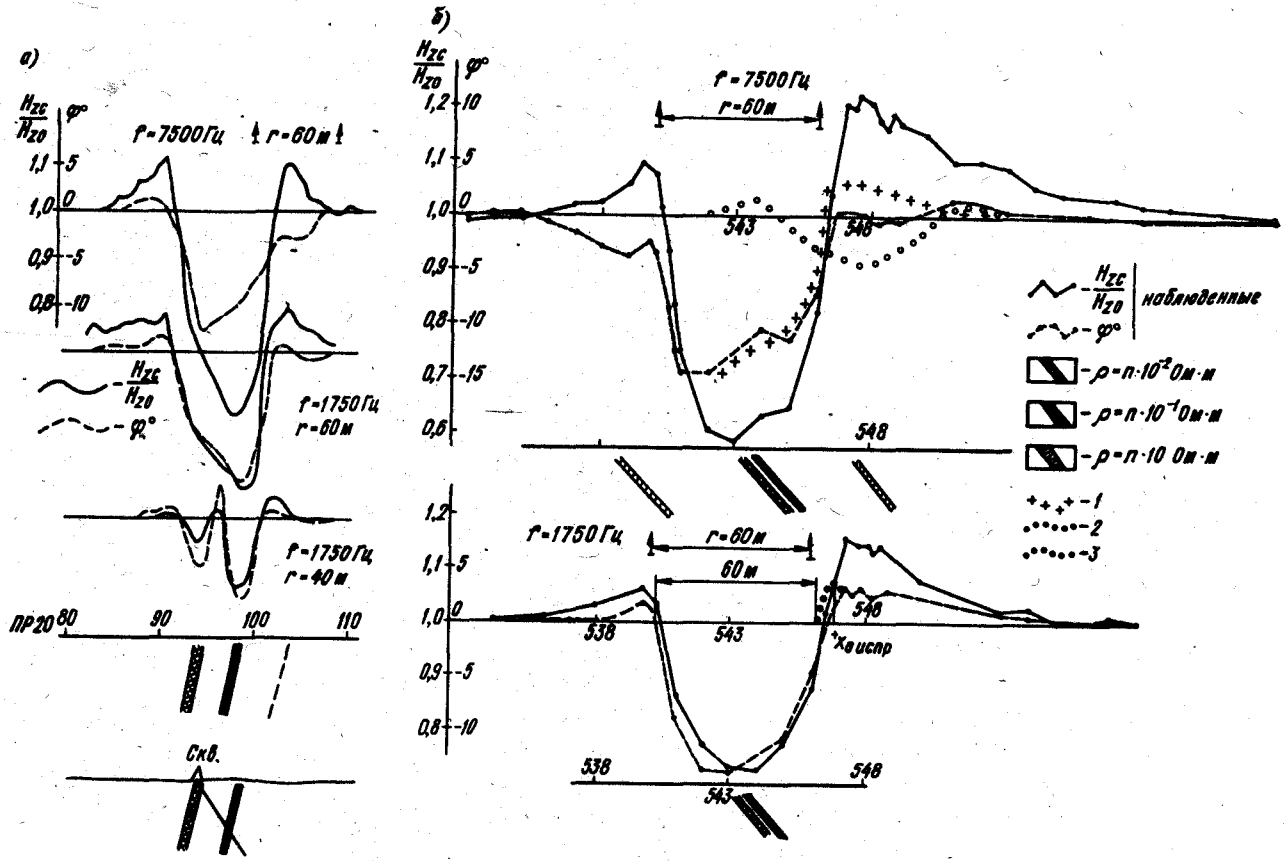


Рис.4. Аномалии ДИП над группой пластов разной электропроводности. Пример разделения пластов: а – посредством измерения на разных частотах и с разными разносами рамок; б – посредством измерения на разных частотах и восстановления аномалий от отдельных пластов

1 – восстановленная ветвь фазовой аномальной кривой, обусловленной двумя пластами, расположенными в центре; 2 – восстановленная фазовая аномальная кривая, обусловленная лишь крайним правым пластом; 3 – восстановленный краевой максимум амплитудной аномальной кривой, обусловленной одним левым пластом из двух центральных

ственно осложнена. Кроме основного минимума, связанного с интенсивной амплитудной аномалией, отчетливо отмечаются еще два минимума. Эти минимумы, очевидно, вызваны пластами относительно невысокой электропроводности, обрамляющими основную зону высокой проводимости, отмечаемую интенсивной амплитудно-фазовой аномалией. Основной фазовый минимум незначительно, но явно смещен влево относительно амплитудного и осложнен в средней части небольшим максимумом. Смещение фазового минимума свидетельствует о том, что основная зона представлена двумя пластами разной электропроводности. Согласно направлению смещения справа располагается пласт более высокой электропроводности. Расстояние между этими пластами, судя по ширине основного минимума, не превышает первых единиц метров. При таком малом расстоянии относительно r над обоими пластами должен наблюдаться один общий минимум без какого-либо локального повышения в его средней части. Такое повышение возможно лишь с $d = 0{,}8r$ (см. рис.1). Наблюдаемое же осложнение основного фазового минимума в виде локального максимума в средней части, очевидно, является следствием наложения краевого максимума фазовой аномалии, обусловленной крайним правым пластом. Эта фазовая аномалия вся лежит в пределах интенсивного аномального проявления основной зоны проводимости и поэтому сильно искажена. Ее минимум почти полностью скомпенсирован краевым максимумом фазовой аномалии основной зоны. Несмотря на это, она легко восстанавливается (рис.4, б). Сначала восстанавливается правая ветвь фазовой аномалии, обусловленной только основной зоной проводимости, путем закономерного проведения ее относительно амплитудной кривой, на поведение которой крайний правый пласт не оказал влияния. Разница между наблюденной кривой и восстановленной ветвью определит фазовую аномалию, соответствующую уединенному крайнему правому пласту. По этой аномалии положение пласта устанавливается достаточно уверенно. Положение крайнего левого пласта устанавливается по левой ветви наблюденной фазовой кривой. Ввиду относительной удаленности этого пласта от основной зоны проводимости и расположения его со стороны восстания пород, левая ветвь обуславливаемой им фазовой аномалии практически не искажена. Для уточнения строения основной зоны проводимости проведены наблюдения на более низкой частоте – 1750 Гц, на которой амплитудно-фазовая аномалия связана только с основной зоной проводимости, представленной двумя близко расположенными друг от друга пластами разной электропроводности. Расшифровка ее проводится аналогично первому примеру (см.рис.3).

В одном из районов Кольского полуострова при проведении поисковых работ на площади 400 км^2 по интенсивным аномалиям метода переходных процессов в однопетлевом варианте (МППО) [3] с петлей 200 х 200 м выделено несколько зон повышенной электропроводности, занимающих около 60% всей площади. Для установления внутренней структуры этих зон по ряду профилей выполнены наблюдения методом ДИП с амплитудно-фазовыми измерениями. Результаты наблюдений по одному профилю представлены на рис.5. Как видно, на интервале профиля примерно в 600 м зафиксирована серия амплитудно-фазовых аномалий. По ним уверенно выделяются 7 маломощных пластов различной электропроводности, расположенных на разном расстоянии друг от

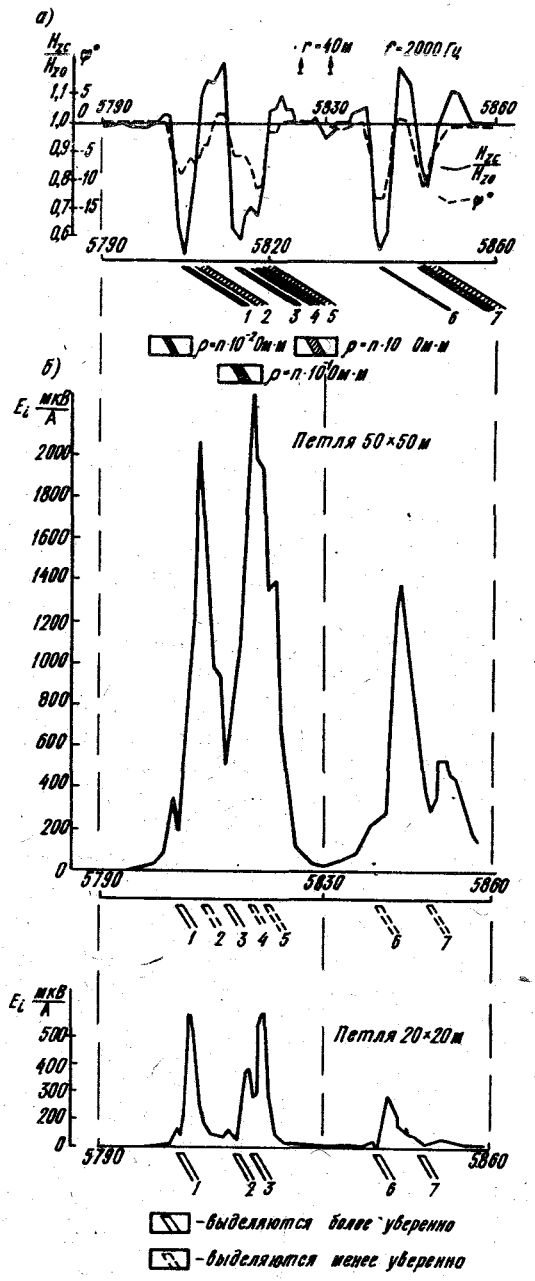


Рис.5. Результаты сравнения разрешающей способности метода ДИП (а) и МППО (б) в сложных геоэлектрических зонах

друга и падающих под углом 45° в сторону возрастающих номеров пикетов. Не останавливаясь на принципах и деталях расшифровки – они те же, что и в предыдущих примерах, и отчетливо реализуются в этом случае, рассмотрим лишь определение угла падения.

По отношению экстремальных аномальных значений в разносторонних краевых максимумах определяют угол падения уединенного пласта [1]. Однако в данном случае нет ни одной аномалии, которая не была бы искажена с той или другой стороны влиянием соседних тел. В таких случаях угол падения определяют сравнением разносторонних ветвей (краевых максимумов) аномалий, обусловленных разными пластами, которые не искажены в результате суперпозиции. В данном примере можно сравнивать левую ветвь крайнего левого пласта и правую ветвь крайнего правого пласта, за пределами которых наблюдаются уже нормальные значения поля. При этом, конечно, следует иметь в виду, что аномалии эти обусловлены разными пластами и вследствие этого могут быть разными по интенсивности. Поэтому для определения угла падения сравниваемые максимумы необходимо привести к единице интенсивности относительно своих минимумов. Так, аномальное значение в минимуме амплитудной аномалии над правым пластом, с учетом некоторой компенсации из-за наложения аномалии от соседнего пласта (см.рис.2, а), примерно в 1,5 раза меньше аномаль-

ного значения в минимуме над крайним левым пластом. Тогда приведенная интенсивность крайнего правого максимума будет примерно в 3,5 раза превышать интенсивность крайнего левого максимума. По этому отношению можно определять угол падения, как и для уединенного пласта [1]. В данном случае оно соответствует падению вправо под углом 40–45°. Анализируя с учетом суперпозиции внутренние максимумы, нетрудно убедиться, что и они соответствуют данной ситуации. Последующее бурение подтвердило данные ДИП. Пластам повышенной электропроводности соответствуют зоны пирит–пирротиновой минерализации.

Для выяснения детализационной возможности МППО в этих условиях проведены исследования с петлями 50 х 50 м и 20 х 20 м по методике «скользящей петли", с шагом перекладывания (скольжения) петель до 5 м (рис.5). Из этих данных видно, что все выделенные методом ДИП пласты более или менее уверенно проявляются на аномалиях МППО. Однако надежность их выделения по данным МППО ниже, чем по ДИП. Производительность детализационнных работ МППО значительно ниже, чем методом ДИП. Поэтому в таких сложных геоэлектрических зонах поисковые работы следует сразу проводить методом ДИП.

В заключение рассмотрим пример, иллюстрирующий возможности ДИП при выделении медно–никелевых руд в сложных геоэлектрических условиях. Пример взят из результатов работ, выполненных на одном участке Печенгской продуктивной толщи (Кольский п–ов). Медно–никелевые руды здесь генетически и пространственно связаны с ультраосновными интрузиями, размещаясь обычно в виде линз или пластообразных залежей в их лежачем боку. Наиболее распространенными вмещающими породами в пределах продуктивной толщи являются филиты. Существенным осложнением для применения электроразведки при поисках медно–никелевых рудных тел в этих условиях является относительно невысокое удельное электрическое сопротивление филитов и значительная неоднородность их по этому параметру. В местах тектонических нарушений, зонах дробления, в приконтактовых зонах часто наблюдается интенсивная графитизация, приводящая к понижению сопротивления до десятых-сотых долей ом–метра и менее. На данном участке, вследствие сложности локальной структуры, наблюдения методом ДИП проведены по ортогональной системе профилей с расстоянием между ними 40 м и шагом 10 м. Для участка наиболее характерны аномалии типа, приведенного на рис.6. Как видно, полученная здесь аномалия соответствует двум маломощным пластам разной электропроводности, расположенным на расстоянии друг от друга $d = (0{,}8 \div 0{,}9)r$ (см.рис.1, б). По характеру аномалии, используя вышеизложенные принципы расшифровки, с высокой точностью определяют положение пластов в плане, падение и удельную электропроводность. Правый пласт имеет более высокую электропроводность и отмечается преимущественно амплитудной аномалией. Геологически он соответствует тектоническому нарушению, проходящему в филитах, сопровождающемуся интенсивной графитизацией и пирит–пирротиновой минерализацией. Левый пласт имеет примерно в 10–15 раз меньшую электропроводность, чем правый, и отмечается преимущественно фазовой аномалией. Минимум его амплитудной аномалии практически полностью скомпенсирован интенсивным краевым максимумом от правого пласта.

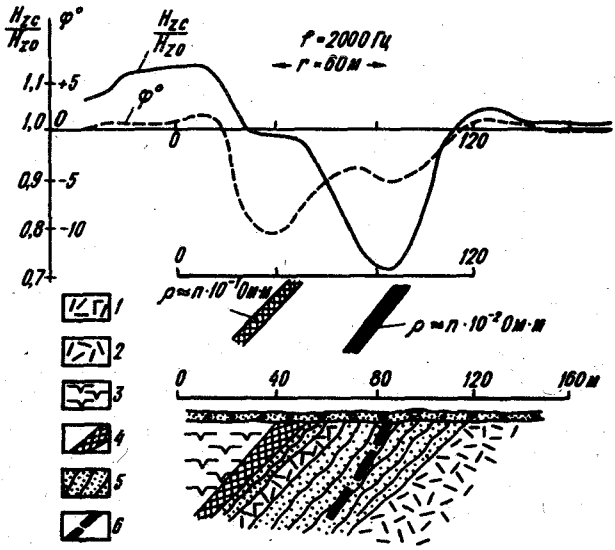


Рис.6. Амплитудно-фазовые аномалии ДИП над медно-никелевым рудным телом вблизи интенсивной зоны графитизации

1 – габбро-диабазы; 2 – диабазы; 3 – перидотиты; 4 – вкрапленные медно-никелевые руды; 5 – филиты; 6 – зона нарушения с интенсивной графитизацией

По своему положению в разрезе левый пласт соответствует медно-никелевому рудному телу, залегающему в лежачем боку ультраосновного массива. По данным бурения, содержание сульфидов в рудном теле в среднем не превышает 15–20%, что находится в хорошем соответствии с относительно невысокой электропроводностью пласта, определенной по данным ДИП.

Таким образом, модельно-теоретические исследования и результаты полевых поисково-разведочных работ показывают, что метод ДИП с амплитудно-фазовыми измерениями обладает высокой разрешающей способностью при дифференциации сложных геоэлектрических зон. По амплитудно-фазовой структуре аномальных полей могут быть надежно выделены и охарактеризованы отдельные проводящие тела, очень близко расположенные друг к другу. Эти данные вместе с другими геологическими и геофизическими сведениями об участке, как показано, в ряде случаев могут значительно повысить эффективность выделения именно тех проводящих тел в сложной зоне, которые связаны с искомым полезным ископаемым.

Литература

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

2. Захаров В.Х. К интерпретации дипольного электромагнитного профилирования. Изв. вузов. „Геология и разведка", 1961, № 3.

3. Великин А.Б., Булгаков Ю.И. Индуктивная электроразведка методом переходных процессов с совмещенным источником и приемником поля. Л., „Недра", 1967.