Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 2, 1974 г.

О ГЛУБИННОСТИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ МЕТОДАМИ ДИПОЛЬНОГО ИНДУКТИВНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛИ

В. Х. Захаров

Значительным достижением в развитии электроразведки переменным током является разработка низкочастотных индуктивных методов с амплитудно-фазовыми измерениями. Использование оптимальных частот для решения конкретной геологической задачи и измерение, наряду с амплитудной, временной (фазовой) характеристики поля безусловно способствует повышению эффективности электроразведки переменным током. На этом принципе разработаны и используются в производстве следующие основные методы: незаземленной петли (НП) и дипольного индуктивного профилирования (ДИП) [5, 6]. Одной из главных задач этих методов являются поиски рудных тел, характеризующихся высокой электропроводностью. Именно при решении этой задачи наиболее полно реализуется их принципиальное по сравнению с методами постоянного тока преимущество — возможность классифицировать объекты по абсолютным значениям удельной электропроводности. Поскольку методы НП и ДИП используются для решения одной и той же задачи, необходимо сравнить их эффективность.

В начале разработок по низкочастотной индуктивной электроразведке за основу был выбран метод НП. Вследствие более однородного поля и меньшей степени его убывания с расстоянием априорно было принято преимущество метода НП по глубинности и простоте выделения аномалий по сравнению с методом ДИП. Именно это преимущество метода НП отмечается и в современной научной и справочной литературе и в инструкции по электроразведке переменным током [5, 7, 9, 10]. Однако строгого анализа этого вопроса нет, что привело, как будет показано ниже, к ошибочным представлениям. При решении указанного вопроса будем исходить из следующих положений.

1. Влияние вмещающих пород отсутствует, в этом случае наиболее полно реализуется возможность этих методов, уменьшение же аномалий вследствие поглощения поля во вмещающих породах для обоих методов одинаково, если радиус петли равен разносу диполей.

2. Мерой чувствительности метода, характеризующей возможность обнаружения искомого объекта, служит вызываемое этим объектом аномальное возмущение в относительных единицах нормального поля.

3. Точность измерений в обоих методах одинакова.

Эти положения соответствуют реальным условиям применения методов.

Исходя из одинаковой точности измерений, сравниваемые графики методов НП и ДИП на приведенных ниже рисунках построены в сопоставимых масштабах: фазовые кривые изображены в одинаковых масштабах, амплитудные кривые метода ДИП даны в относительных единицах нормального поля, а метода НП — в условных единицах, при этом в точках максимального аномального значения соблюден такой же масштаб относительно нормального поля, что и на графиках метода ДИП. При этих условиях полностью сохранен характер первичного графического материала, получаемого в обоих методах, а для сравнения интенсивностей аномалий достаточно сопоставить величины отклонений суммарного поля от линии нормального поля.

Заметим, что при выполнении работ методом ДИП аномальный эффект всегда наблюдается при оптимальных условиях взаимного расположения установки и возбуждающего аномалию объекта (установка перемещается относительно объекта), тогда как для метода НП аномальный эффект, как будет показано ниже, существенно зависит от места расположения искомого объекта относительно петли (источник поля — петля не перемещается). Наиболее благоприятным для поисков методом НП является случай изометрической рудной залежи при расположении ее под центром петли. Для расчета относительного аномального эффекта примем, что петля имеет форму окружности радиусом r, а рудное тело — форму шара радиусом a, центр шара расположен на глубине h от поверхности Земли (рис. 1, $а$). В этом случае максимальный аномальный эффект наблюдается в центре петли. Нормальное поле петли в ее центре [8] вертикально, его значение

$$H_{0z} = \frac{2\pi I}{r}, \qquad (1)$$

где I — сила тока в петле.

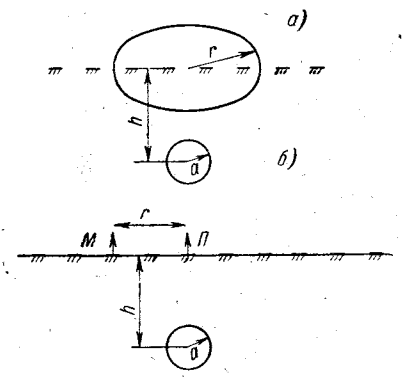


Рис. 1. Схема установок индуктивной электроразведки методами НП ($а$) и ДИП ($б$)

M — генераторная рамка — магнитный диполь, $П$ — приемная рамка

Будем считать, что в пределах шара поле однородно и имеет значение [8], равное величине поля в центре шара,

$$H_z(h) = \frac{2\pi I r^2}{(\sqrt{r^2+h^2})^3}. \qquad (2)$$

Электропроводный шар, помещенный в такое однородное поле, создает вторичное магнитное поле, значение которого максимально в центре петли над шаром и определяется равенством

$$H_{2z} = \frac{2\pi I r^2}{(\sqrt{r^2+h^2})^3} \cdot \frac{Da^3}{h^3}, \qquad (3)$$

где D — комплексная функция параметра $P = \gamma\omega\rho a^2$ (γ — удельная электропроводность шара, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота поля, μ — магнитная проницаемость). Функция D табулирована в широких пределах изменения параметра P [10].

Пользуясь равенствами (1) и (3), находим значение аномалии в относительных единицах нормального поля

$$\frac{H_{2z}}{H_{0z}}=\frac{r^3}{\left(\sqrt{r^2+h^2}\right)^3}\cdot\frac{Da^3}{h^3}. \qquad (4)$$

В случае дипольного индуктивного профилирования вторичное магнитное поле, обуславливаемое шаром [3], определится равенством

$$H_{2z}=\frac{1}{2}MDa^3\frac{\left[2h^2-\left(x+\frac{r}{2}\right)^2\right]\left[2h^2-\left(x-\frac{r}{2}\right)^2\right]+9h^2\left(x^2-\frac{r^2}{4}\right)}{\left[\left(x-\frac{r}{2}\right)^2+h^2\right]^{5/2}\left[\left(x+\frac{r}{2}\right)^2+h^2\right]^{5/2}}, \qquad (5)$$

где M — магнитный момент диполя; r — расстояние между рамками; x—координата центра установки, над центром шара $x=0$ (см. рис. 1, *б*).

Нормальное поле метода ДИП в процессе профилирования сохраняется постоянным [4],

$$H_{0z}=\frac{M}{r^3}. \qquad (6)$$

В относительных единицах нормального поля аномальное поле

$$\frac{H_{2z}}{H_{0z}}=F\left(\frac{x}{h},\frac{r}{h}\right)\frac{Da^3}{h^3}, \qquad (7)$$

где

$$F=\frac{r^3}{2}\cdot\frac{\left[2-\left(x+\frac{r}{2}\right)^2\right]\left[2-\left(x-\frac{r}{2}\right)^2\right]+9\left(x^2-\frac{r^2}{4}\right)}{\left[\left(x-\frac{r}{2}\right)^2+1\right]^{5/2}\left[\left(x+\frac{r}{2}\right)^2+1\right]^{5/2}}. \qquad (8)$$

В равенстве (8) величины x и r даны в единицах h.

Сравнивая выражения (4) и (7), замечаем, что в них имеется множитель $D(a^3/h^3)$, не зависящий от установки. Следовательно, относительный аномальный эффект, при прочих равных условиях, определяется для метода НП функцией

$$\Phi=\frac{r^3}{\left(\sqrt{r^2+h^2}\right)^3}, \qquad (9)$$

а для метода ДИП — функцией (8).

Функция Ф для метода НП определяет собой максимальное аномальное значение в центре петли для наиболее благоприятного случая расположения шара под центром петли. С увеличением $\sim r/h$ функция Ф монотонно увеличивается и при $\sim r/h\to\infty$ стремится к единице (рис. 2).

Функция F для метода ДИП, поскольку нормальное поле остается постоянным, определяет собой всю аномальную кривую при измерении над шаром вдоль профиля x. При $\sim r/h\geqslant 2$ максимальное значение функции наблюдается в точках профиля, определяемых [3] равенством

$$x=\pm\sqrt{\left(\frac{r}{2}\right)^2-h^2}. \qquad (10)$$

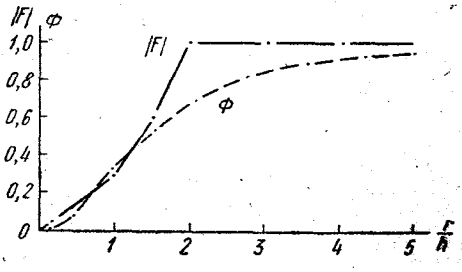


Рис. 2. Графики функций $|F|$ и Ф

В этих точках значение F остается постоянным, равным единице. При $\sim r/h \leqslant 2$ максимальное значение функции наблюдается в точках $x=0$ и $x=(2/3)h$ (точка записи относится к центру между рамками). Таким образом, при поисках изометрических рудных тел методом ДИП существует оптимальный разнос рамок, определяемый неравенством $\sim r/h \geqslant 2$, при котором обеспечивается максимальная глубинность метода. Так как в этом случае максимальное значение $F=1$, то, согласно равенству (7), максимальная глубинность определится выражением

$$h_{\max \text{ дип}} = a\sqrt[3]{\frac{D}{\varepsilon}}, \tag{11}$$

где ε — минимальное отклонение, которое может быть надежно измерено.

В методе НП не существует оптимального размера петли, а его максимальная возможная глубинность при поисках объектов изометрической формы всегда меньше, чем в методе ДИП. Согласно равенству (4),

$$h_{\max \text{ нп}} = \frac{r}{\sqrt{r^2+h^2}}\, a\sqrt[3]{\frac{D}{\varepsilon}}. \tag{12}$$

Из равенств (11) и (12) следует, что $h_{\max \text{ дип}} > h_{\max \text{ нп}}$.

Анализ кривых F и Φ позволяет отметить еще одно очень важное обстоятельство, касающееся относительного влияния мелких поверхностных неоднородностей. При характеристике методов НП и ДИП в литературе [9] как одно из преимуществ метода НП отмечается лучшее соотношение между аномалиями от глубинных объектов и мелких поверхностных неоднородностей, поэтому соответственно увеличивается глубинность исследования. Это заключение основывается только на том, что первичное поле петли убывает с глубиной менее быстро, чем поле диполя. Никаких расчетных данных для подтверждения этого заключения не приводится. Пользуясь же графиками рис. 2 и формулами (4) и (7) для определения относительного аномального эффекта, легко показать, что фактическое положение противоположно такому заключению. Действительно, при работе на оптимальных разносах отношение аномалии от поверхностной неоднородности к аномалии от глубинного объекта для метода ДИП определится выражением

$$\delta_{\text{дип}} = \frac{D_{\text{п}} a_{\text{п}}^3}{h_{\text{п}}^3} \cdot \frac{h_{\text{гл}}^3}{D_{\text{гл}} a_{\text{гл}}^3}, \tag{13}$$

для метода НП

$$\delta_{\text{нп}} = \frac{D_{\text{п}} a_{\text{п}}^3}{h_{\text{п}}^3} \cdot \frac{h_{\text{гл}}^3}{D_{\text{гл}} a_{\text{гл}}^3} \cdot \frac{\left(\sqrt{r^2+h_{\text{гл}}^2}\right)^3}{\left(\sqrt{r^2+h_{\text{п}}^2}\right)^3}, \tag{14}$$

индексы «п» и «гл» отмечают характеристики соответственно поверхностного и глубинного объектов.

Сравнивая выражения (13) и (14) и учитывая, что $h_{\text{гл}} \gg h_{\text{п}}$, получаем $\delta_{\text{нп}} > \delta_{\text{дип}}$. Если же для некоторых более глубоких рудных тел разносы метода ДИП окажутся меньше оптимальных, то и в этом случае вследствие очень четкой зависимости характера аномалий от отношения $\sim r/h$ [3] глубинные аномалии надежно отличаются от поверхностных. В частности, при $h > r$ аномальный эффект положительный, а при $h \ll r$ — отрицательный (рис. 3, *в*). В методе НП такой за-

висимости нет. Кроме того, следует также отметить, что неоднородность поля диполя сильнее сказывается для крупных рудных тел, ее влияние приводит к увеличению аномального эффекта по сравнению с рассчитанным для однородного поля. Для мелких же поверхностных объектов помех неодородность поля диполя практически не сказывается [3].

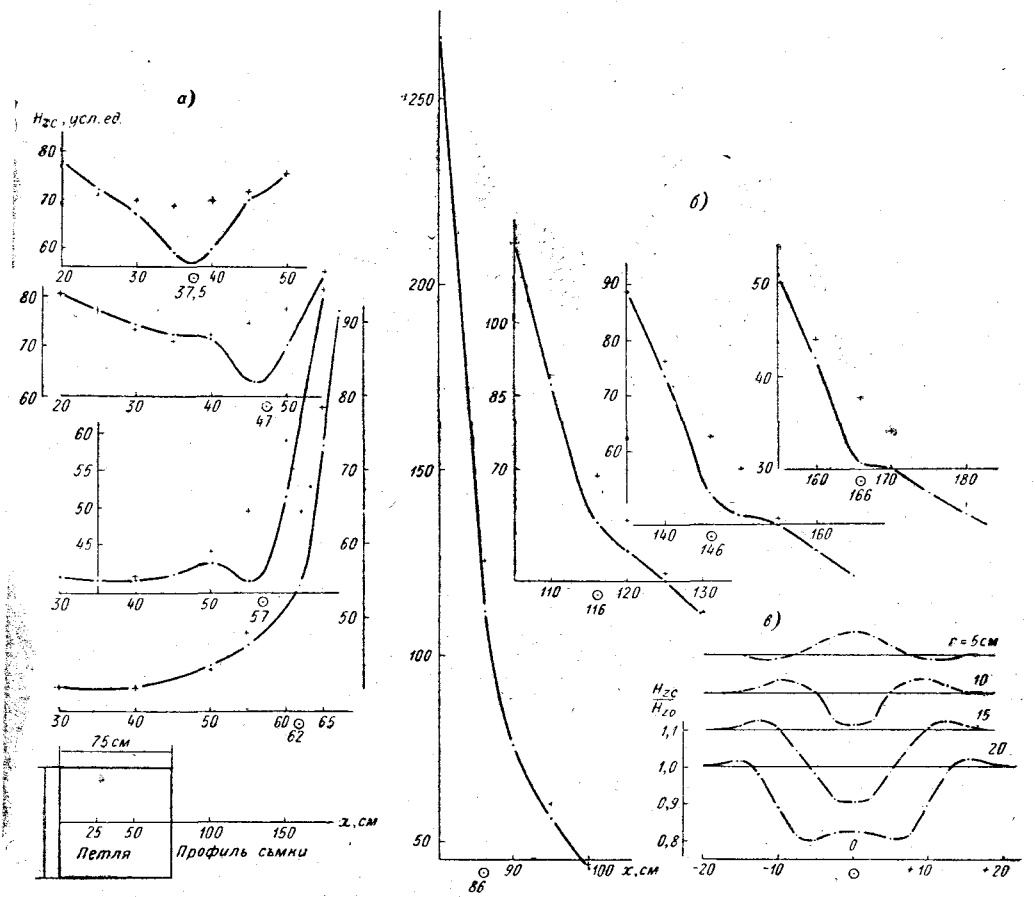


Рис. 3. Графики моделирования поля над шаром: внутри петли (*а*), вне петли (*б*), дипольного индуктивного профилирования (*в*)
⊙ шар, + — нормальное поле петли

Для сравнительной оценки аномалий ДИП и НП над различными формами объектов с учетом влияния их положения относительно петли выполнены модельные исследования. Схема планшета съемки НП приведена на рис. 3. Относительно этого планшета дается привязка на всех рисунках. Наблюдения методами НП и ДИП выполнены на частоте 10 *кгц* над алюминиевым шаром ($\gamma = 3{,}5 \cdot 10^7$ *сим/м*) радиусом 5 *см* с глубиной центра 8 *см*. При этой частоте $D \approx 1$, так что фазовые аномалии отсутствуют, а амплитудные выражены наиболее резко. Графики по данным моделирования полностью согласуются с рассчитанными по формулам (4) и (7). Как видно, в методе НП характер аномального проявления, обусловливаемого шаром, очень сильно зави-

сит от местоположения шара относительно петли (см. рис. 3, *а, б*). Более или менее уверенно могут быть выделены лишь аномалии в средней части петли (при съемке внутри петли) и вдали от стороны петли (при съемке вне петли), где они обусловливают заметное качественное отличие суммарного поля от нормального. Вблизи от стороны петли, примерно до расстояния, равного одной пятой ее длины (при съемке внутри петли) и половине ее длины (при съемке вне петли), хотя аномалии по величине и составляют еще более 10% относительно значений нормального поля, выделить их практически невозможно, так как по характеру изменения суммарное магнитное поле не отличается от нормального. При моделировании нормальное поле петли измерялось без шара, в полевых условиях такой возможности нет. Теоретически рассчитать «нормальные» поля при сложном рельефе для использования их при интерпретации невозможно [10].

Если измерения выполнены на оптимальной частоте, для которой действительная часть функции D равна 0,374, то, согласно равенству (4), аномалия по амплитуде уменьшается более чем в 2,5 раза. Из графиков видно, что при таком уменьшении могут быть выделены лишь амплитудные аномалии при расположении шара на пикетах 37,5 и 47. Правда, в этом случае будут фазовые аномалии, позволяющие определить местоположение объекта, однако отсутствие знаний о величине амплитудной аномалии резко снижает классификационную возможность метода.

Аномалии ДИП (см. рис. 3, *в*), наблюденные при тех же условиях, выгодно отличаются от аномалий НП. Они рельефно выделяются на фоне постоянного значения нормального поля. Даже при $r < h$, когда аномалия составляет 7% от нормального значения поля, она выделяется увереннее, чем бо́льшие по величине аномалии НП. Интересно отметить, что при удалении шара от петли аномалия над ним постепенно увеличивается (см. рис. 3, *б*) и, когда шар удален от центра петли на расстояние, примерно в 2 раза большее размера петли (ПК 166), величина аномалии НП стремится к величине аномалии ДИП, наблюдаемой при оптимальных разносах. Это объясняется тем, что здесь (ПК 155 — ПК 180) поле петли изменяется практически обратно пропорционально кубу расстояния от ее центра, т. е. петля на этом расстоянии может быть принята за дипольный источник. Этот факт еще раз убедительно доказывает, что глубинность метода НП при поисках изометрических рудных тел в принципе не может быть больше глубинности метода ДИП и лишь в некоторых точках планшета (в центре и очень далеко от петли) стремится к ней.

Наиболее распространенной формой рудных тел являются пласты различной мощности. Будем называть пласт маломощным, если его мощность значительно меньше глубины залегания верхней кромки, а длина волны в пласте используемого электромагнитного поля больше мощности пласта. Пластом конечной мощности будем называть такой пласт, мощность которого сравнима или больше глубины залегания его верхней кромки, а длина волны в пласте меньше его мощности.

Существенной особенностью образования аномалий над пластами является то, что в маломощном пласте вихревые токи могут наводиться только в плоскости пласта, тогда как в пласте конечной мощности токи наводятся и в плоскостях, перпендикулярных к пласту [4]. Поэтому вертикальный или крутопадающий маломощный пласт, расположенный в центре петли, не вызывает никакого аномального возмущения поля и, следовательно, не может быть обнаружен методом НП,

так как поле в средней части петли вертикально и не создает потока через боковую плоскость пласта. Этот же факт в методе ДИП используется для установления точного местоположения пласта в плане: положению, при котором рамка-диполь стоит точно над пластом, соответствует характерная точка перехода аномальной кривой через значение нормального поля [2].

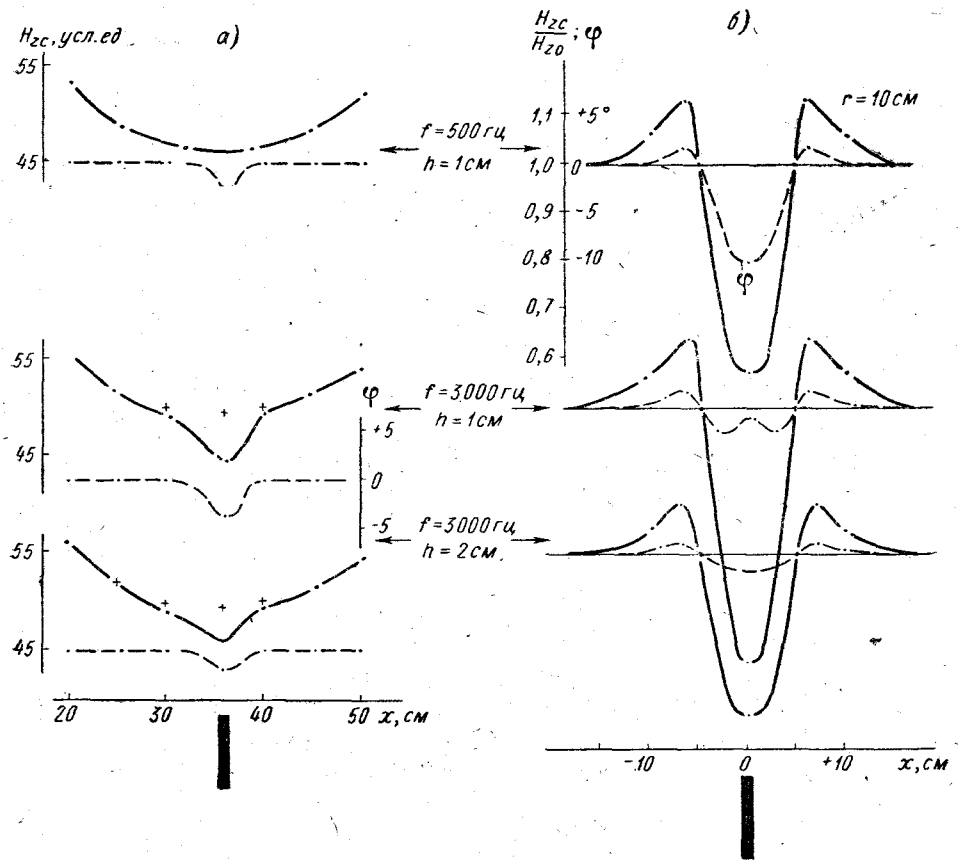


Рис. 4. Графики моделирования поля методами НП (*а*) и ДИП (*б*) над пластом конечной мощности

В качестве модели пласта конечной мощности использовалась алюминиевая пластина $40 \times 20 \times 1$ *см* (рис. 4). При сравнении аномалий НП и ДИП обращает на себя внимание огромная разница в их интенсивности. Аномалии ДИП достигают 70% от значения нормального поля, тогда как аномалии НП при тех же условиях не превышают 10%. Такая резкая разница объясняется тем, что аномалии НП обусловлены лишь вихревыми токами, циркулирующими в горизонтальных плоскостях пласта, так как первичное магнитное поле вертикально. Поэтому возмущающее действие вертикального пласта конечной мощности, расположенного под центром незаземленной петли, практически эквивалентно действию цилиндра диаметром, равным мощности пласта. В методе ДИП при перемещении установки вдоль профиля направление первичного магнитного поля диполя относительно пласта закономерно изменяется и создается магнитный поток как через боковую (верти-

кальную) грань пласта, так и через торцовую (горизонтальную) [4]. Площадь боковой грани значительно больше, чем торцовой, поэтому и аномальный эффект ДИП значительно выше аномального эффекта НП. Это отчетливо иллюстрируется графиками моделирования.

Закономерность изменения аномалии над пластом в методе НП полностью согласуется с теоретическими выводами для поля цилиндра, находящегося в однородном гармоническом поле [10]. На частоте 500 *гц* длина волны в пласте соизмерима с его мощностью m и параметр эквивалентного цилиндра [4], определяемый выражением

$$P_{\text{НП}} = \gamma\omega\mu\left(\frac{m}{2}\right)^2, \tag{15}$$

очень мал, поэтому в поле незаземленной петли над пластом амплитудной аномалии нет, а наблюдается лишь фазовая аномалия 2,5°. Аномалии ДИП на этой же частоте над пластом составляют по амплитуде более 50%, по фазе (—11)° (см. рис. 4, *б*). Аномальный эффект в методе ДИП обусловлен главным образом магнитным потоком первичного поля через боковую грань пласта, чем и объясняется его бо́льшая величина. Параметр пласта в этом случае [4] определяется выражением

$$P_{\text{дип}} = \gamma\omega\mu\, m\, r. \tag{16}$$

Из сравнения (15) и (16) вытекает очень важное следствие. Для метода ДИП оптимальная частота (наиболее выгодная для поисковых работ)

$$f_{\text{опт дип}} = \frac{P_{\text{опт дип}}}{\gamma\mu\, 2\pi\, mr}, \tag{17}$$

для метода НП

$$f_{\text{опт нп}} = \frac{P_{\text{опт нп}}}{\gamma\mu\, 2\pi\left(\frac{m}{2}\right)^2}. \tag{18}$$

Отсюда

$$\frac{f_{\text{опт дип}}}{f_{\text{опт нп}}} = \frac{m}{4r}\cdot\frac{P_{\text{опт дип}}}{P_{\text{опт нп}}}. \tag{19}$$

Так как $P_{\text{опт дип}} = 11$, а $P_{\text{опт нп}} = 7$, то оптимальная частота для метода ДИП в 25 раз ниже, чем для метода НП. Понижение рабочей частоты эквивалентно снижению уровня помех от поверхностных неоднородностей примерно во столько же раз и увеличению интенсивности поля, так как уменьшается поглощение его во вмещающих породах, поэтому даже при одинаковой интенсивности аномалий глубинность исследования ДИП значительно выше. Для данного пласта оптимальная частота в методе НП равна ~ 3000, в методе ДИП ~ 100 *гц*. На частоте 3000 *гц* влияние мощности пласта (вихревых токов в горизонтальных плоскостях пласта) четко проявляется и на фазовой аномалии ДИП в виде локального максимума на фоне общего минимума кривой (см. рис. 4, *б*; $h = 1$ *см*), что позволяет однозначно определить мощность пласта и его удельную электропроводность. С увеличением глубины тела аномалия НП над пластом резко уменьшается и практически исчезает совсем при глубине верхней кромки 3 *см*. Аномалия ДИП для этой же частоты и глубины составляет более 30% [4].

Наиболее выгодным для поисков маломощных пластов методом НП является участок вне петли, центр которого расположен от стороны петли на расстоянии, равном примерно половине длины петли.

Очень далеко от петли поле до больших глубин имеет преимущественно вертикальную составляющую, поэтому здесь, так же как и в центре петли, маломощные крутопадающие пласты не возбуждаются. Вблизи от петли аномалии трудно выделить вследствие чрезмерно больших градиентов нормального поля. Сравнение аномалий НП и ДИП проведем для случая, когда пласт расположен на наиболее выгодном расстоянии от стороны петли, равном половине ее длины (рис. 5).

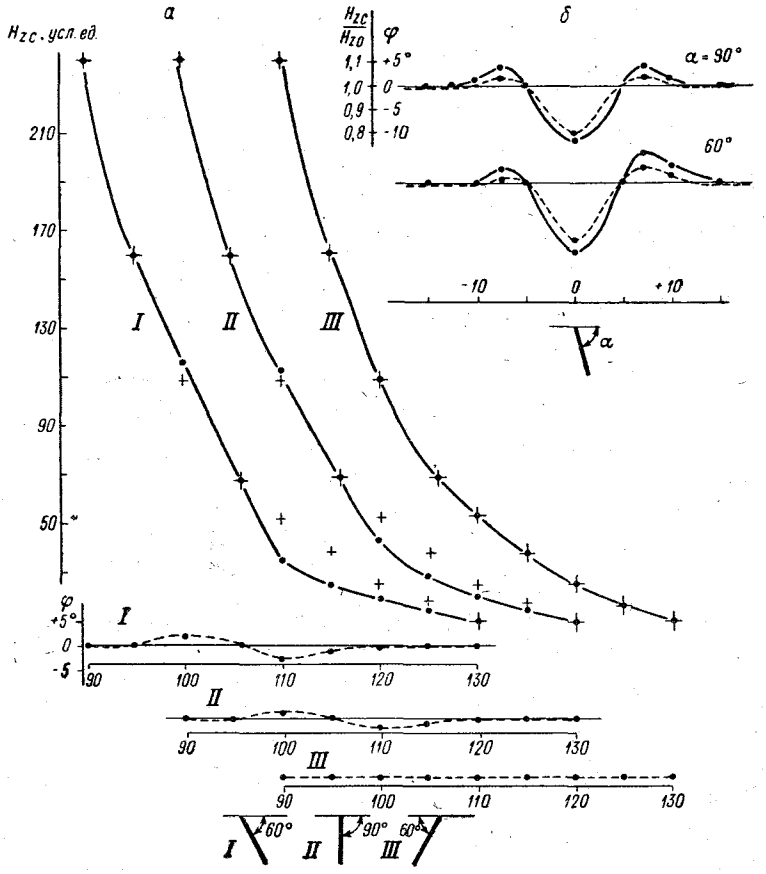


Рис. 5. Графики моделирования поля методами НП (вне петли) (*а*) и ДИП (*б*) над маломощным пластом

Падение пласта: *I* — от петли, *II* — вертикальное, *III* — к петле

В качестве модели маломощного пласта использовалась алюминиевая пластина 40×20×0,1 *см*. Наблюдения проведены на частоте 1000 *гц* при глубине верхней кромки 2 *см*. Поскольку поле петли в месте расположения рудного тела имеет определенное направление, существенное значение имеет условие залегания пласта относительно петли. Возможны три основных положения пласта: *I* — пласт падает от петли, *II* — пласт вертикальный, *III* — пласт падает к петле. Величина аномалии ДИП от направления падения пласта не зависит [4], поэтому аномалии ДИП приведены для вертикального и наклонного пластов. Направление падения пластов по аномалиям ДИП определяется бо́льшим краевым максимумом [4]. Для пластовых (жильных) рудных тел наиболее характерны углы падения от 90 до 60°, эти крайние значения и

взяты для сравнения аномалий. Как видно из графиков, наибольший аномальный эффект в методе НП наблюдается над пластом, падающим от петли. Над вертикальным пластом аномалия меньше, а пласт, падающий к петле, вообще не вызывает заметного аномального возмущения поля. Физически такая закономерность объясняется следующим образом. В случае *I* угол встречи первичного магнитного поля петли с плоскостью пласта изменяется от 34° у верхней кромки пласта до 57° у нижней, в случае *II* — от 4° до 35°, в случае *III* — от —26° до +15°. Отсюда ясно, что наибольший магнитный поток первичного поля через боковую грань пласта, в прямой зависимости от которого находится величина аномалии, возникает в случае *I*. В случае же *III* вследствие изменения знака составляющей первичного магнитного поля, нормальной к плоскости пласта, суммарный поток через контур пласта практически равен нулю, поэтому вторичное магнитное поле не возбуждается. Аномалии ДИП, как над вертикальным, так и над наклонным маломощным пластом превышают аномалии метода НП по амплитуде приблизительно в 2 раза, по фазе — в 7—10 раз. Аномалии ДИП уверенно выделяются на фоне постоянного значения нормального поля. Аномалии же НП даже для самого благоприятного случая в производственных условиях выявить трудно, если неизвестна точно закономерность изменения нормального поля.

Главными критериями оценки эффективности геофизических методов, используемых для решения одной и той же задачи, являются глубинность, количество информации об изучаемом (искомом) объекте и стоимость работ. При выполнении амплитудно-фазовых измерений вся установка ДИП практически соответствует измерительной группе НП, техника измерений в обоих методах одинакова. Поэтому стоимость работ методом ДИП не может быть выше, чем методом НП. Для последнего необходимы дополнительные затраты на обслуживание петли [5]. Информативность этих методов оценивается сведениями об удельном электрическом сопротивлении объекта и его геометрии (местоположение, форма, размеры, условия залегания), которые можно получить в результате интерпретации наблюдаемых аномалий. Геометрические характеристики объекта методом ДИП определяются значительно полнее и точнее, чем методом НП [4, 6]. Вычисление удельного электрического сопротивления в обоих методах основано на одном и том же физическом принципе, поэтому его значение тем точнее, чем увереннее выделяются аномалий над искомыми объектами. Таким образом, первостепенное значение для сравнительной оценки геологической эффективности от двух методов приобретает вопрос о глубинности и надежности выявления аномалий.

Выводы

1. Для основных наиболее часто встречающихся форм рудных тел глубинность метода ДИП больше, чем метода НП вследствие: а) большой величины аномального эффекта, б) меньшего относительного влияния поверхностных неоднородностей, в) значительно более низких оптимальных частот для крутопадающих пластов, г) простоты и надежности выделения аномалий на фоне постоянного значения нормального поля.

2. Крутопадающие пласты, мощность которых меньше длины волны возбуждающего поля в них, практически вообще не могут быть обнаружены в поле незаземленной петли, что делает метод НП непригодным для поисков этого наиболее распространенного типа рудных тел.

3. Учитывая эти факты, а также бо́льшую мобильность, производительность и информативность метода ДИП по сравнению с методом НП, можно заключить, что метод ДИП как по геологической результативности, так и по экономическим показателям более эффективен, чем метод НП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дивильковский М. А. Задача о шаре, помещенном в однородное переменное магнитное поле.— ЖТФ, 1939, т. 9, вып. 5.

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

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

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

5. Инструкция по электроразведке. Ч. 2. М., «Недра», 1966.

6. Методы рудной геофизики. Л., изд. ВИРГ, 1968.

7. Справочник геофизика. Т. 3. М., Гостоптехиздат, 1963.

8. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., Гостехиздат, 1956.

9. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике. М., «Недра», 1966. Авт.: Б. С. Светов, А. Д. Петровский, Е. М. Ершов, Ф. М. Каменецкий, В. Ф. Коваленко, Г. С. Франтов, А. Д. Фролов и Ю. Б. Шауб.

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