

Низкочастотная электроразведка с измерениями пространственно-временных инвариантов магнитного поля

Александр Николаевич РАТУШНЯК*
Алексей Дмитриевич КОНОПЛИН

Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Введение. В статье рассмотрены вопросы теории, методики и интерпретации индуктивной электроразведки с измерением характеристик эллипса поляризации магнитного поля для низкой частоты (зоны индукции), представляющей основной интерес при изучении проводящих свойств геологической среды.

Цель работы – обосновать преимущество использования в наземных и воздушных методах электроразведки измерений полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля, величины которых не зависят от пространственной ориентации датчиков магнитного поля.

Методология. Математическое моделирование рассеяния гармонического магнитного поля индуктивного источника на проводящем 3D-объекте и экспериментальные полевые работы на рудном месторождении методом незаземленной петли для проверки работоспособности макета электроразведочной аппаратуры и определения информативности использования параметров отношения полуосей эллипса поляризации магнитного поля при выделении проводящего рудного тела.

Результаты. Проводящее рудное тело выделяется на ряде частот по локальным аномалиям отношения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля, полученных в результате обработки материалов измерений индуктивным методом незаземленной петли.

Выводы. Измерения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля в наземных и воздушных методах индуктивной электроразведки имеют преимущество перед измерениями пространственных составляющих магнитного поля, поскольку не зависят от пространственной ориентации датчиков составляющих поля, что полностью исключает методическую погрешность измерений. Использование измерений относительных фаз составляющих магнитного поля позволяет существенно упростить измерительное устройство для определения полуосей полного эллипса поляризации, поскольку не требует канала передачи фазы тока от источника поля к измерителю.

Ключевые слова: гармоническое электромагнитное поле, эллипс поляризации магнитного поля, пространственная ориентация измерительных систем.

Введение

Методы электроразведки являются одними из основных в комплексе методов геофизики, применяемых при изучении строения верхней части земной коры и поисках месторождений полезных ископаемых. Измеряемыми информативными параметрами в методах низкочастотной электроразведки, отражающими зависимость электромагнитного поля от проводящих свойств геологической среды, являются пространственные составляющие напряженностей электромагнитного поля и их относительные характеристики – импедансы, фазовые углы, отношения составляющих поля и др. Вместе с традиционно измеряемыми параметрами поля, отражающими проводящие свойства среды, большой интерес вызывает использование параметров эллипса поляризации магнитного поля.

Само появление эллиптической поляризации гармонического магнитного поля обусловлено наличием двух полупространств – верхнего непроводящего (воздух) и нижнего проводящего (земля), благодаря чему магнитное

поле приобретает эллиптическую поляризацию, причем тем больше, чем выше электропроводность подстилающего полупространства. Идея использования характеристик эллипса поляризации магнитного поля, создаваемого гармоническим током стороннего источника с ориентацией измерительных катушек в вертикальной плоскости, проходящей по линии «источник–приемник», для определения проводящих свойств среды известна достаточно давно [1]. Причем в качестве излучателей поля применяются предпочтительно индуктивные источники (ток в незаземленной петле или магнитном диполе), поскольку явление индукции и поляризация магнитного поля проявляются с ними более сильно, чем с гальваническими источниками (ток в заземленной линии или электрическом диполе).

Непосредственные измерения величин полуосей эллипса поляризации магнитного поля при последовательной ориентации измерительной катушки в плоскости поляризации поля с

нахождением экстремальных значений является очень низкопроизводительной операцией. Более качественным способом определения полуосей эллипса поляризации являются фазочувствительные измерения декартовых составляющих магнитного поля H_x , H_z с фиксированной ориентировкой ортогональных измерительных катушек в вертикальной плоскости XOZ относительно линии «источник–приемник» и дальнейшим пересчетом квадратурных компонент поля Re и Im в величины большой и малой полуосей эллипса [2, 3]. Устройство для реализации данного способа требует применения фазочувствительной аппаратуры с синхронизацией фазы тока источника поля и сигналов поля, регистрируемых измерителем.

Известен более простой технический способ измерения полуосей эллипса поляризации магнитного поля с ориентировкой приемных катушек в вертикальной плоскости, проходящей по линии «источник–приемник», и устройство для его осуществления [4]. Он заключается в применении двух взаимно перпендикулярных датчиков магнитного поля, в котором сигнал, принятый одним датчиком, поворачивают по фазе на угол, равный четверти периода, а затем половине периода, и после каждого поворота фазы складывают с сигналом, снимаемым со второго датчика; полученные два напряжения выпрямляются и определяют их полусумму и полуразность, которые численно пропорциональны большой и малой полуосям эллипса поляризации.

Необходимо отметить, что в условиях неоднородной проводящей среды плоскость поляризации магнитного поля может существенно отклоняться от вертикальной плоскости, проходящей через источник и точку измерений, хотя эллиптическая поляризация поля сохраняется. Для точного определения полуосей полного эллипса поляризации в пространстве необходимы измерения трех составляющих магнитного поля, реализованные в способе [5]. При этом, кроме регистрации амплитуд трех составляющих поля выполняют измерения относительных сдвигов фаз составляющих поля.

Теоретические основы метода

Поясним физические принципы реализации предложенного способа и его преимущества перед традиционно используемыми методами измерения проекций полуосей эллипса поляризации магнитного поля.

Первая особенность гармонического электромагнитного поля заключается в том, что, являясь пространственным инвариантом, величины полуосей эллипса поляризации не зависят от пространственной ориентации датчиков трех декартовых составляющих поля. Повороты измерительной системы координат в пространстве на произвольные углы (ориентация ортогональных датчиков) изменяют только проекции эллипса на оси координат.

На рис. 1 изображена проекция пространственного эллипса поляризации магнитного поля на плоскость XOZ , его полуоси и составляющие магнитного поля H_x , H_z в основной XZ и H_x' , H_z' в смещенной $X'Z'$ системах декартовых координат. Поворот системы координат, т. е. изменение ориентации датчиков поля, приводит

к изменению угла наклона большой полуоси эллипса поляризации θ и величин составляющих магнитного поля H_x , H_z , при этом сами величины полуосей эллипса поляризации не изменяются. Эта инвариантность поля используется в методике измерений полуосей проекции эллипса поляризации на плоскость профиля [6]. Главным обстоятельством инвариантности эллипса поляризации магнитного поля является его сохранение в случае пространственного изменения ориентации всех трех ортогональных датчиков магнитного поля. Пространственная инвариантность эллиптической поляризации особенно важна в подвижных измерительных системах аэроэлектроразведки, выполняющих регистрацию составляющих магнитного поля, которые особенно сильно зависят от ориентации датчиков поля [7–9].

Второй особенностью является временная инвариантность поля. Она заключается в том, что величины полуосей эллипса поляризации не зависят от абсолютных значений сдвига фаз составляющих магнитного поля относительно фазы тока в источнике поля, и достаточно ограничиться относительными измерениями сдвигов фаз составляющих поля.

На рис. 2 изображена пространственно-временная развертка эллипса поляризации магнитного поля в системе координат xzt , где в качестве одной из осей является время. Временная развертка представляет собой дискретное положение конца вектора магнитного поля, ортогонального оси времени t и вращающегося в плоскости xz по поверхности цилиндра с эллиптическим основанием, в заданный момент времени t и представляет собой винтовую линию.

Измерения величин составляющих магнитного поля H_x , H_z за период T могут быть выполнены как при синхронизации начала фаз измеряемого сигнала относительно фазы тока в источнике относительно времени t_0 (что реализуется в фазочувствительной аппаратуре), так и за тот же период T относительно

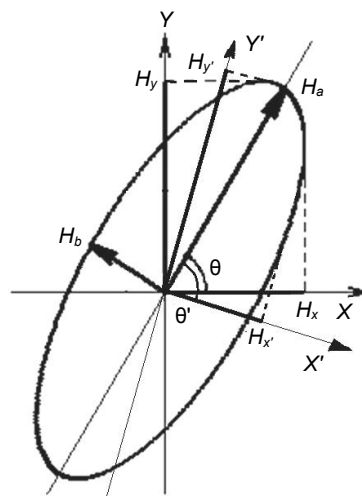


Рисунок 1. Эллипс поляризации магнитного поля и его проекции в основной XZ и смещенной $X'Z'$ системах координат
Figure 1. Magnetic field polarization ellipse and its projections in the main XZ and shifted $X'Z'$ coordinate systems

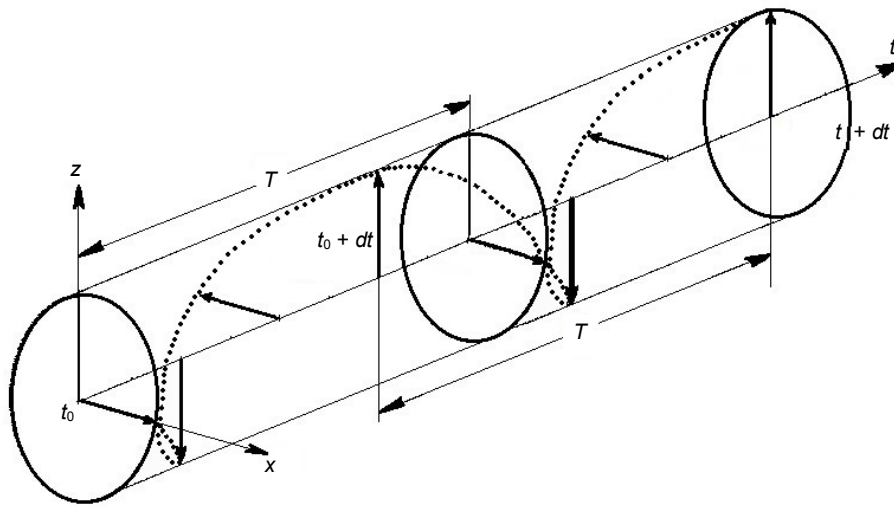


Рисунок 2. Пространственно-временная развертка поляризованного магнитного поля
Figure 2. Spatio-temporal scan of a polarized magnetic field

времени $t_0 + dt$, если за начало отсчета принять фазу сигнала внутреннего генератора измерителя или одного из датчиков поля. За полный период T вектор магнитного поля описывает эллипс начиная с произвольного момента времени, если проецировать его на плоскость xz . Эта инвариантность поля сохраняется в случае произвольной ориентации ортогональных датчиков магнитного поля.

По амплитудам трех составляющих магнитного поля H_x, H_y, H_z и относительным фазам $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, одну из которых можно принять за начальную фазу, величины полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля в пространстве определяют по формулам, подобным [3]:

$$H_a = \sqrt{H_x^2 \cos^2(\varphi_x + \alpha) + H_y^2 \cos^2(\varphi_y + \alpha) + H_z^2 \cos^2(\varphi_z + \alpha)}, \quad (1)$$

$$H_b = \sqrt{H_x^2 \sin^2(\varphi_x + \alpha) + H_y^2 \sin^2(\varphi_y + \alpha) + H_z^2 \sin^2(\varphi_z + \alpha)}, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left[\frac{H_x^2 \sin 2\varphi_x + H_y^2 \sin 2\varphi_y + H_z^2 \sin 2\varphi_z}{H_x^2 \cos 2\varphi_x + H_y^2 \cos 2\varphi_y + H_z^2 \cos 2\varphi_z} \right]$.

Использование измерений относительных фаз составляющих магнитного поля позволяет существенно упростить измерительное устройство, поскольку не требует канала передачи фазы тока от источника поля к измерителю и синхронизации измерительного и генераторного устройств.

Составляющие эллипса поляризации магнитного поля при исследовании проводящих свойств неоднородных сред имеют такое же разрешение, как и декартовы составляющие поля, поскольку являются пространственным инвариантом. При дистанционных индукционных зондированиях слоисто-неоднородных сред на фиксированной частоте удельная электропроводность однородного полупространства в ближней (низкочастотной) зоне определяется с изменением величины разности r по отношению составляющих магнитного поля или полуосей эллипса поляризации по совершенно аналогичным формулам [2]:

$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 r^2} \cdot \frac{H_r}{H_z} = \frac{4}{\omega \mu_0 r^2} \cdot \frac{H_b}{H_a}.$$

Изучение закономерностей изменения пространственного эллипса поляризации магнитного поля в среде с 3D-проводящими объектами выполнено с использованием аппарата математического моделирования методов индуктивной электроразведки с помощью модернизированного пакета программ D6_ELECTRO [10]. Основной частью пакета является программа расчета составляющих напряженностей электромагнитного поля в точках наблюдений, создаваемых гармоническим током стороннего источника (незаземленный контур, магнитный диполь и т. п.) в присутствии проводящих трехмерных тел, погруженных в проводящее полупространство. Расчет составляющих поля выполняется в точках наблюдений в верхнем полупространстве с моделированием воздушных или наземных методов индуктивной электроразведки. Вспомогательные программы пакета применяются для ввода исходных данных, обработки и визуализации результатов расчетов. По результатам расчета составляющих напряженностей электромагнитного поля определяются дополнительные характеристики, отражающие перераспределение поля вблизи проводящего 3D-объекта: фазовые углы, тензор импеданса, величины полуосей эллипса поляризации магнитного поля по формулам (1)–(2), отношения составляющих поля и т. п.

Расчет поля основан на решении уравнения рассеяния гармонического электромагнитного поля на 3D-объекте в виде шестикомпонентной системы объемных векторных интегральных соотношений для напряженностей электрического и магнитного поля [10, 11]. Отличительной особенностью используемого уравнения рассеяния электромагнитного поля является учет индукционного возбуждения локального тела гармоническим магнитным полем и возникающих в проводящем теле токов индукции, что позволяет исследовать рассеяние поля проводящим объектом, находящимся даже в непроводящей среде.

Результаты математического моделирования приведены на рис. 3. Магнитное поле создается

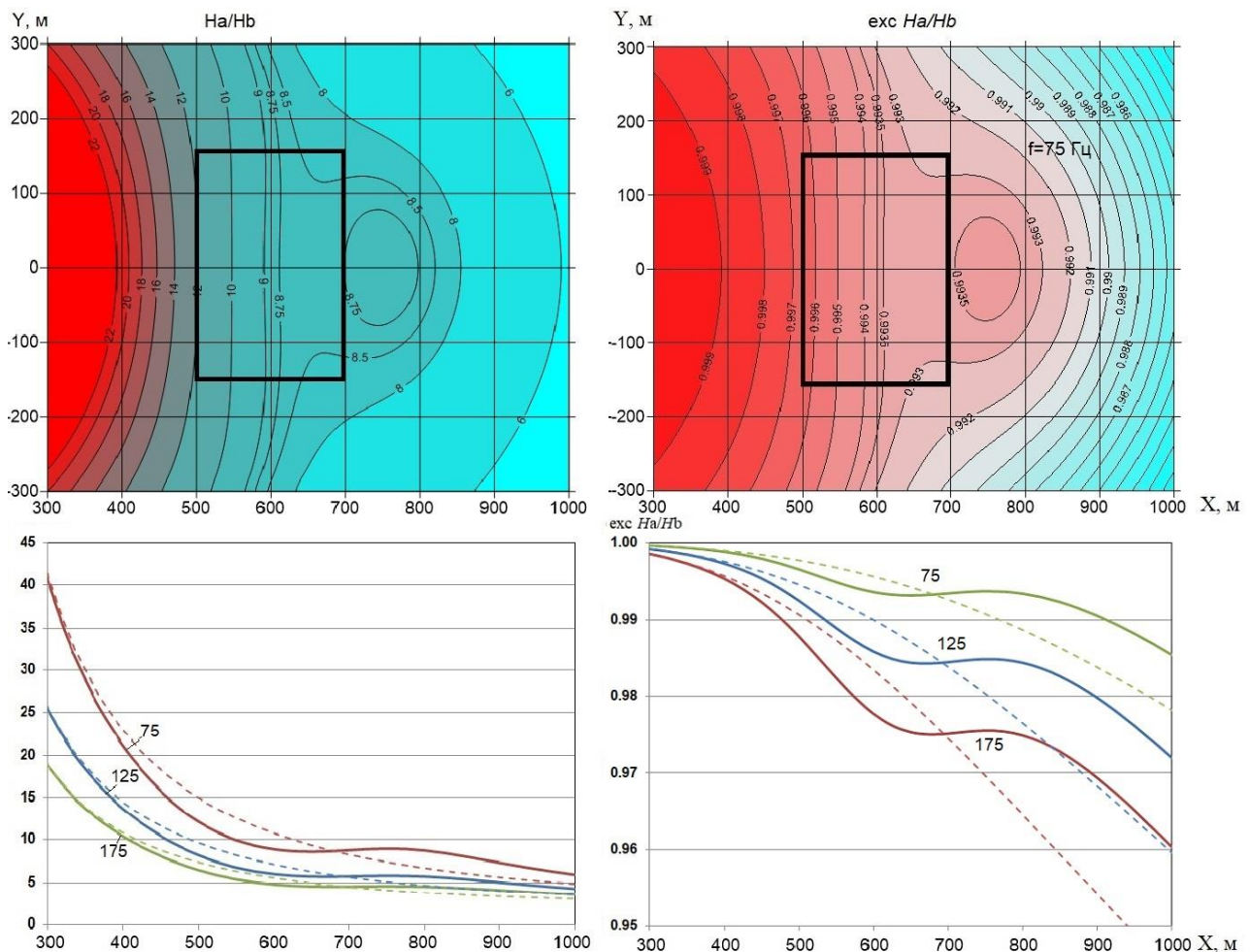


Рисунок 3. Результаты математического моделирования: вверху – планы изолиний H_a/H_b (слева) и эксцентриситета (справа) над 3D-проводящим объектом на частоте 75 Гц; внизу – графики H_a/H_b (слева) и эксцентриситета (справа) по профилю $Y = 0$ над 3D-объектом (сплошные) и над однородным полупространством (штриховые) на частотах $f = 75, 125, 175$ Гц (шифр кривых)

Figure 3. Results of mathematical modeling: above – plans of H_a/H_b isolines (left) and eccentricity (right) over a 3D conducting object at a frequency of 75 Hz; below – graphs of H_a/H_b (left) and eccentricity (right) along the profile $Y = 0$ over a 3D object (solid) and over a homogeneous half-space (dashed) at frequencies $f = 75, 125, 175$ Hz (curve code)

гармоническим током в контуре размером 200×200 м с центром, расположенным в начале координат. Ряд частот выбран как нечетные гармоники основной рабочей частоты тока 25 Гц. Проводящий 3D-объект в виде прямоугольного параллелепипеда имеет размеры по осям $200 \times 300 \times 100$ м, глубина погружения центра $h = 200$ м. Прямоугольником на рис. 3 изображена проекция 3D-тела на границу «земля–воздух» $z = 0$. Удельное электрическое сопротивление полупространства $\rho_o = 500$ Ом · м, проводящего объекта $\rho = 1$ Ом · м. Высота плоскости наблюдений $z = 25$ м.

Кроме соотношения полуосей эллипса поляризации H_b/H_a удобной характеристикой для выделения локальных аномалий электропроводности при измерениях магнитного поля при площадной съемке является величина эксцентриситета эллипса $\sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ которая уменьшается с удалением точки наблюдений от источника в ограниченных пределах 1–0.

На рис. 3 вверху приведены планы изолиний отношений полуосей эллипса поляризации магнитного поля H_a/H_b (слева) и эксцентриситета эллипса

поляризации (справа) над проводящим 3D-объектом в виде прямоугольного параллелепипеда на частоте $f = 75$ Гц.

Графики внизу на рис. 3 – отношение полуосей эллипса поляризации H_a/H_b (слева) и кривые эксцентриситета эллипса (справа) по профилю $Y = 0$ над 3D-объектом (сплошные) и над однородным полупространством (штриховые) на частотах $f = 75, 125, 175$ Гц (шифр кривых).

Изолинии отношения полуосей эллипса поляризации H_a/H_b над проводящим однородным полупространством представляют собой замкнутые кривые, близкие к окружности относительно центра источника, величины которого убывают с удалением от петли. 3D-объект отмечается на планах изолиний H_a/H_b и эксцентриситета эллипса в виде локальных искажений изолиний над проекцией проводящего объекта.

Кривые отношения H_a/H_b и эксцентриситета эллипса на графиках рис. 3 над 3D-объектом представляют собой аномалии сложной формы, что объясняется суперпозицией магнитных полей от аномальных токов проводимости и токов индукции в проводящем теле.

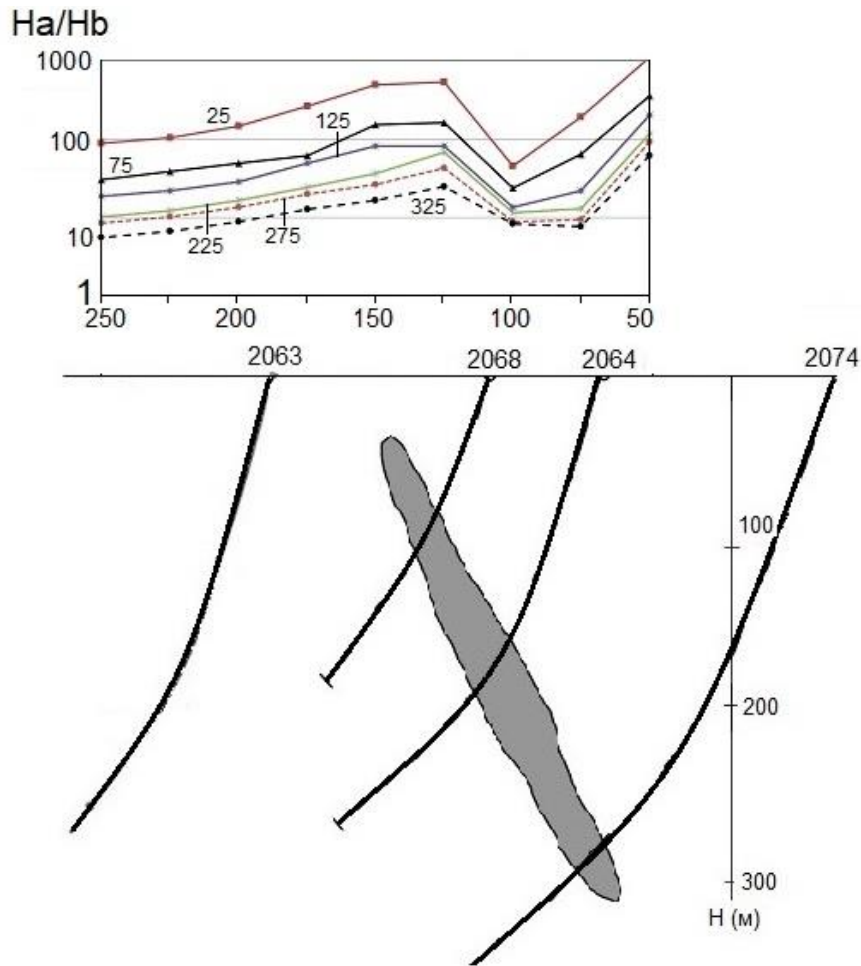


Рисунок 4. Результаты измерений методом НП-Н на месторождении Чусовское: сверху – графики отношения полуосей H_a/H_b (шифр кривых – частота, Гц); внизу – проекции скважин и рудного тела на разведочную линию «восток–запад»
Figure 4. The results of measurements by the UL-S method at the Chusovskoye field: above – graphs of the ratio of semi-axes H_a/H_{bm} (curve code – frequency, Hz); below – projections of wells and ore body on the exploration line “East–West”

Величины аномалий магнитного поля от локального проводника существенно зависят от частоты тока в источнике и контрастности удельных сопротивлений 3D-объекта и вмещающей среды. Из приведенных ранее графиков поля на различных частотах рис. 3 видно, что для достижения значимого аномального эффекта при контрастности удельных сопротивлений 3D-объекта и среды 1 : 500 над проводящим локальным объектом можно ограничиться достаточно низкими частотами исследований.

Методика и техника экспериментальной проверки

Для проверки работоспособности метода были проведены экспериментальные измерения методом незаземленной петли (НП-Н) на Чусовском медноколчеданном месторождении Среднего Урала. В качестве источника поля была использована незаземленная петля размером 100 × 100 м с силой тока $I = 20$ А. Форма тока – прямоугольная, что позволило выполнить измерения на нескольких высших гармониках. Частота основной гармоники выбрана равной 25 Гц, что позволило максимально разнести по частоте основную и высшие гармоники полезного сигнала от частоты помехи промышленной сети 50 Гц.

Результаты измерений в виде отношения полуосей H_a/H_b на нескольких частотах по одному из профилей

приведены на рис. 4. Проводящее рудное тело хорошо выделяется по локальным аномалиям над рудным телом месторождения, что подтверждает работоспособность метода.

В качестве регистратора сигнала был использован измеритель многочастотного комплекса индукционного зондирования [12] с трехкомпонентным индукционным датчиком, при этом измерения выполнялись на нескольких гармониках основной частоты в частотном диапазоне 25–2700 Гц.

Результаты

На рис. 5 приведены кривые рассчитанного эксцентриситета (вверху) и кажущегося удельного сопротивления однородного полупространства ρ_k (внизу), соответствующие измеренным характеристикам полуосей эллипса магнитного поля H_a, H_b по методике, предложенной в работе [13].

С ростом частоты профильные кривые отношения полуосей H_a/H_b над рудным телом (рис. 4, вверху) становятся менее рельефными на фоне спада нормального магнитного поля источника. Выделению аномалии магнитного поля на высоких частотах помогают величины эксцентриситета, которые резко зависят от изменения величины малой полуоси эллипса поляризации магнитного поля (рис. 5, вверху).

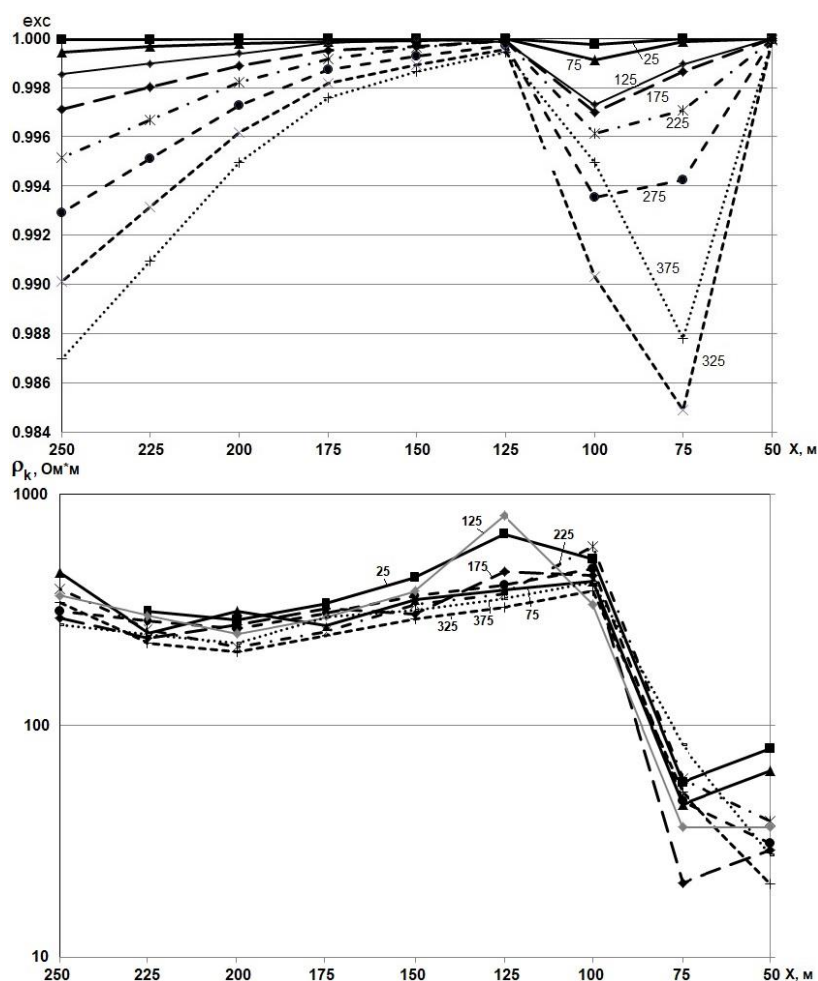


Рисунок 5. Результаты обработки измерений методом НП-Н на месторождении Чусовское: вверху – графики эксцентриситета эллипса поляризации магнитного поля, внизу – кривые ρ_k , Ом · м, соответствующие отношению полуосей H_x/H_y , шифр кривых – частота, Гц
Figure 5. The results of processing measurements by the NP-N method at the Chusovskoye field: above – graphs of the eccentricity of the magnetic field polarization ellipse, below – curves ρ_k , Ohm · m, corresponding to the ratio of the semiaxes H_x/H_y , curve code – frequency, Hz

Рассмотренный подход может найти применение в широком классе исследований: в наземном варианте сокращаются время и трудозатраты на проведение съемки и повышаются точность и воспроизводимость результатов; в набирающем в настоящее время актуальность варианте воздушной съемки с применением беспилотных летающих аппаратов (БПЛА) отпадает необходимость ориентировки измерительной системы в воздухе, что значительно упрощает конструкцию и уменьшает несомую БПЛА нагрузку [8, 9, 14]. Метод может найти применение в скважинном варианте электромагнитных исследований.

Изложенный метод и реализующая аппаратура были положены в основу изобретения «Способ измерения по-

луосей полного эллипса поляризации магнитного поля и устройство для его осуществления» [15].

Заключение

1. Измерения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля в индуктивной электроразведке имеют преимущество перед измерениями составляющих магнитного поля, поскольку не зависят от пространственной ориентации датчиков составляющих поля, что полностью исключает методическую погрешность измерений.

2. Использование измерений относительных фаз составляющих магнитного поля позволяет существенно упростить измерительное устройство для определения полуосей полного эллипса поляризации, поскольку не требует канала передачи фазы тока от источника поля к измерителю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заборовский А. И. Электроразведка. М.: ГНТИ, 1963. 424 с.
2. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 254 с.
3. Светов Б. С., Мизюк Л. Я., Поджарый В. М. Рудная электроразведка по методике эллиптически поляризованного поля. М.: Недра, 1969. 136 с.
4. А. с. SU 132345, МПК G 01 V3/10. Способ измерения полуосей эллипса поляризации магнитного поля и устройство для его осуществления / Б. С. Светов. № 651800; заявл. 25.01.60; опубл. 10.10.60. Бюл. № 19.
5. А. с. SU 179394. Устройство для измерения элементов полного эллипса поляризации переменного магнитного поля при индуктивной электроразведке / Л. Я. Мизюк, Б. С. Светов, В. М. Поджарый. № 872336/26–25; заявл. 26.12.63; опубл. 08.11.66. Бюл. № 5.

6. Электромагнитные методы разведки в рудной геофизике / Б. С. Светов [и др.]. М.: Недра, 1966. 308 с.
7. Волковицкий А. К. Структура и алгоритмы бортовых электромагнитных систем относительного позиционирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 27 с.
8. Павлов Б. В., Волковицкий А. К., Каршаков Е. В. Низкочастотная электромагнитная система относительной навигации и ориентации // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С. 3–14.
9. Трусов А. А. Особенности современной аэроэлектроразведки // Разведка и охрана недр. 2011. № 7. С. 31–36.
10. Аэроэлектроразведка при поисках месторождений проводящих руд / А. И. Человечков [и др.]. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 78 с.
11. Ратушняк А. Н. Рассеяние гармонического электромагнитного поля на трехмерных объектах // Геофизика. 2012. № 1. С. 61–65.
12. Арзамасцев Е. В., Коноплин А. Д., Астафьев П. Ф. Многочастотный комплекс фазочувствительного частотного индукционного зондирования // Датчики и системы. 2018. № 5. С. 55–60.
13. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатъев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.
14. Петров С. И., Новак В. Д., Тихомиров О. Д. Аэроэлектроразведка методом ДИП // Разведка и охрана недр. 2006. № 4. С. 38–42.
15. Пат. 2793393 Рос. Федерация. Способ измерения полуосей полного эллипса поляризации магнитного поля и устройство для его осуществления / Ратушняк А. Н., Коноплин А. Д. № 2021132606; заявл. 18.11.21; опубл. 03.04.23. Бюл. № 10.

Статья поступила в редакцию 05 мая 2023 года

Low-frequency electrical prospecting with measurements of spatio-temporal invariants of the magnetic field

Aleksandr Nikolaevich RATUSHNYAK*
Aleksey Dmitrievich KONOPLIN

Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Introduction. In the article discussed the theory, methodology and interpretation of inductive electrical prospecting with the measurement of the characteristics of the polarization ellipse of the magnetic field for low frequency (induction zone), which is of primary interest in the study of the conductive properties of the geological environment.

The purpose of this work is to substantiate the advantage of using measurements of the semi-axes of the full polarization ellipse of the magnetic field in ground and air methods of electrical exploration, the values of which do not depend on the spatial orientation of the magnetic field sensors.

Methodology. Mathematical modeling of the scattering of the harmonic magnetic field of an inductive source on a conductive 3D object and experimental field work at an ore deposit using the ungrounded loop method to test the operability of a model of electrical exploration equipment and determine the information content of using the parameters of the ratio of the semi-axes of the magnetic field polarization ellipse when identifying a conductive ore body.

Results. The conductive ore body is distinguished at a number of discrete frequencies by local anomalies in the ratio of the semi-axes of the full polarization ellipse of the magnetic field obtained as a result of processing the measurement materials by the inductive method of an ungrounded loop.

Conclusions. Measurements of the semi-axes of the full ellipse of magnetic field polarization in surface and air methods of inductive electrical prospecting have an advantage over measurements of the spatial components of the magnetic field, since they do not depend on the spatial orientation of the sensors of the field components, which completely eliminates the methodological measurement error. The use of measurements of the relative phases of the magnetic field components makes it possible to significantly simplify the measuring device for determining the semi-axes of the complete polarization ellipse, since it does not require a channel for transmitting the current phase from the field source to the meter.

Keywords: Harmonic electromagnetic field, magnetic field polarization ellipse, spatial orientation of measuring system.

REFERENCES

1. Zaborovskiy A. I. 1963, Electrical prospecting. Moscow, 424 p. (*In Russ.*)
2. Svetov B. S. 1973, The theory, methods of interpretation of data of low frequency inductive electrical prospecting. Moscow, 254 p. (*In Russ.*)
3. Svetov B. S., Mizyuk L. Ya., Podzhary V. M. 1969, Electrical prospecting of ores by method of elliptical polarized field. Moscow, 136 p. (*In Russ.*)
4. Svetov B. S. A. c. SU 132345. The method of measurement of semi-axes of polarization ellipse of magnetic field and device for it realization. No. 651800; applied 25.01.60; published 10.10.60, bul. No. 19. (*In Russ.*)
5. Mizyuk L. Ya., Svetov B. S., Podzhary V. M. A. c. SU 179394. The device for measurement of elements of full polarization ellipse of alternating magnetic field for inductive electrical prospecting. No. 872336/26–25; applied 26.12.63; published 08.11.66, bul. no. 5. (*In Russ.*)
6. Svetov B. S. [et al.]. 1966, Electromagnetic methods of prospecting in ore geophysics. Moscow, 308 p. (*In Russ.*)
7. Volkovitskiy A. K. 2012, The structure and algorithms of onboard relative positioning systems: PhD thesis, 27 p. (*In Russ.*)
8. Pavlov B. V., Volkovitskiy A. K., Karshakov E. V. 2010, Electromagnetic low frequency system of relative orientation and navigation. *Giroscopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], no. 1, pp. 3–14. (*In Russ.*)
9. Trusov A. A. 2011, Characteristics of Modern air-born electrical prospecting. *Razvedka i ohrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 7, pp. 31–36. (*In Russ.*)
10. Chelovechikov A. I. [et al.]. 2012, Air-born electrical prospecting for searches conductive ores. Ekaterinburg, 78 p. (*In Russ.*)
11. Ratushniak A. N. 2012, Scattering harmonic field on three-dimension objects. *Geofizika* [Geophysics], no. 1, pp. 61–65. (*In Russ.*)
12. Arzamashev E. V., Konoplin A. D., Astafev P. F. 2018, The complex of multifrequent phase sensitive induction sounding. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], no. 5, pp. 55–60. (*In Russ.*)
13. Veshev A. V., Ivochkin B. G., Ignat'ev G. F. 1971, Electromagnetic profiling. Leningrad, 216 p. (*In Russ.*)
14. Petrov S.I., Novak V.D., Tikhomirov O.D. 2006, Aehroehlektorazvedka metodom DIP. *Razvedka i okhrana nedr*, no 4, pp.38–42. (*In Russ.*)
15. Ratushniak A. N., Konoplin A. D. Method of measurement of semi-axes of polarization ellipse of magnetic field and device for it realization. Pat. 2793393 Russian Federation. No. 2021132606; applied 18.11.21; published 03.04.23, bul. no. 10. (*In Russ.*)

The article was received on May 05, 2023