УДК 550.837

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНОГО ЭФФЕКТА ОТ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ПОГРУЖЕННЫХ В ОДНОРОДНОЕ ПРОВОДЯЩЕЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО, В ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДИПОЛЯ

***Шестаков А.Ф., Горшков В.Ю.*** – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

***Аннотация.*** Приведены результаты математического моделирования электромагнитных аномалий в поле переменного вертикального магнитного диполя над проводящим полупространством с локальной неоднородностью. Рассмотрены варианты дистанционного зондирования и профилирования. Обсуждаются морфологические особенности проявления аномального эффекта в горизонтальных составляющих магнитного поля.

*Электромагнитное зондирование, индуктивное профилирование, магнитные аномалии, математическое моделирование.*

# THE CHARACTERISTICS OF THE ANOMALOUS EFFECT IDENTIFICATION OF LOCAL INHOMOGENEITIES, SUBMERGED INTO HOMOGENEOUS CONDUCTIVE HALF-SPACE IN THE FIELD OF VERTICAL MAGNETIC DIPOLE

*Shestakov A.F., Gorshkov V.Yu. – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg*

***Abstract.*** Results of mathematical modeling of electromagnetic anomalies are presented in the field of variable vertical magnetic dipole above conducting half-space with local inhomogeneity. The variants of the remote sounding and profiling are considered. Morphological features of anomalous effect in horizontal components of the magnetic field are discussed.

*Electromagnetic sounding, inductive profiling, magnetic anomalies, mathematical modeling.*

## *Введение*

Применение индукционных методов наземной электроразведки для решения задач геоэлектрического картирования базируется в большинстве случаев на модели плоскослоистого полупространства, для определения параметров которой разработаны различные методики частотных и дистанционных зондирований (Заборовский, 1963).

Наличие горизонтальных, а также локальных неоднородностей, отличающихся по электропроводности от зондируемой области геосреды, может оказывать значительное помехообразующее влияние на результаты одномерной интерпретации из-за искажений, вносимых в измеряемые составляющие магнитного поля при использовании вертикального магнитного диполя (ВМД) в качестве источника.

С другой стороны, эти же неоднородности могут представлять собой самостоятельный объект исследования при изучении строения верхней части геологического разреза. Так, например, область преимущественного применения методов индукционного профилирования – это обнаружение и локализация в плане геоэлектрических неоднородностей, контрастных по электропроводности в сравнении с вмещающей средой, с целью поиска рудоносных объектов и рудопроявлений, выявление погруженных проводящих образований и зон сочленения горных пород при крупномасштабных картировочных исследованиях, решение инженерно-геологических задач по обнаружению и трассированию подземных коммуникаций (трубопроводов) и т. п.

Применяемые для этих целей электроразведочные способы восходят к «методу индукции» (разработанному под руководством В.Р. Бурсиана в НИФИ при ЛГУ в 30-е годы прошлого века) – методу электроразведки переменным током, основанном на изучении магнитного поля индукционных токов, возбуждаемых в горных породах источником высокочастотного гармонического электромагнитного поля (Заборовский, 1963). Поскольку индуцированные токи распределяются в земле с не-

одинаковой плотностью и концентрируются преимущественно в хорошо проводящих геологических образованиях, то это неизбежно будет отражаться на морфологии вторичного магнитного поля, накладывающегося на первичное поле источника электромагнитного поля.

Так, например, в известном способе дипольного индуктивного профилирования, успешно используемом для поисков рудных месторождений и геоэлектрического картирования горных пород (Вешев и др., 1971; Светов, 1973), измерения проводят при последовательном (вдоль профиля) или параллельном (по соседним профилям) перемещении генераторной и приемной установок с постоянным расстоянием между источником электромагнитного поля и приемным магнитным датчиком. При измерениях применяют аппаратуру дипольного электромагнитного профилирования (например, серии ДЭМП разработки «ЦКБ Геофизика», г. Красноярск или ее современные аналоги), позволяющую регистрировать амплитуды вертикальной $H_z$ и радиальной $H_r$ составляющих электромагнитного поля. По измеренным значениям амплитуд, либо по их отношению, вычисляют эффективное сопротивление $\rho_{эф}$ среды и по распределению его значений вдоль профиля измерений судят о наличии геоэлектрической неоднородности в изучаемом разрезе. Для выявления хорошо проводящих рудных объектов анализируют графики абсолютных значений измеренных величин, либо соответствующих им магнитных чисел (Светов, 1973; Вешев, 1980).

Более поздние методики проведения работ в этом направлении, разработанные ведущими учеными и специалистами (Электроразведка…, 1989), достаточно хорошо известны и вошли в состав инструкции по электроразведке, разработанной по заданию Управления геофизических работ Мингео СССР (Инструкция…, 1984).

Однако при изучении геоэлектрического строения сложно построенной геологической среды важно отметить необходимость выработки критериев, позволяющих установить пределы допустимого и адекватного применения тех или иных методов частотно-дистанционных зондирований к изучению ее электрофизических параметров в рамках одномерной модели, а также оценить особенности проявления аномального эффекта в различных составляющих наблюденного поля (или их комбинаций) для более достоверного проведения детализационных геоэлектрических исследований по регламентированной методике.

Сравнительно недавно была разработана концепция трехэтапного подхода к проблеме комплексного изучения геоэлектрического строения геологической среды с применением ВМД в качестве источника поля на основе усовершенствованной методики площадных электромагнитных индукционных исследований (Хачай, 1996).

В отличие от традиционных методов изучения параметров нормального (плоско-слоистого) разреза среды, осложненного геоэлектрическими неоднородностями, в этой методике используется система «по-планшетно площадных наблюдений трех компонент электромагнитного поля $H_z$, $H_r$, $H_\varphi$ с перекрытиями при фиксированном положении генератора в центре каждого планшета» (Хачай, Новгородова, 1997).

В настоящей работе показано, что изучение морфологии абсолютных значений азимутальной составляющей магнитного поля позволяет получить полезную экспресс информацию о горизонтальных неоднородностях среды для отбраковки данных в варианте зондирования, а также оценить зональность характерных особенностей аномального эффекта и их приуроченность к аномалиеобразующему объекту в варианте индуктивного профилирования с ВМД в качестве источника.

***О «методах чистой аномалии» с применением ВМД***

Методической основой одного из критериев оценки наличия горизонтальных неоднородностей среды является изучение характера их проявления в поле вертикального магнитного диполя, а точнее – в азимутальной (относительно источника) составляющей его напряженности $H_\varphi$.

Следует заметить, что в большинстве работ по индуктивным методам исследований с контролируемым источником поля, а также в типовых инструкциях по проведению электроразведочных работ методами частотного или дистанционного зондирований и электромагнитного профилирования (Инструкция…, 1984) вопрос о регистрации и использовании $H_\varphi$ при изучении электромагнитного «отклика» среды в процессе интерпретации измеренных данных предметно не обсуждался.

Кроме того, для ВМД или горизонтально расположенной круговой петли, питаемой переменным током заданной частоты, обычно измеряемые ненулевые составляющие магнитного поля $H_z$, $H_r$ характеризуют суммарный эффект от нормального поля разреза и аномального, порождаемого локальной неоднородностью среды, что усложняет процесс интерпретации данных наблюдений и требует специальных приемов к выделению информативного параметра из «полезного» сигнала.

К ним относится прежде всего выделение определенных участков кривых дистанционного зондирования, на которых не наблюдаются резкие изменения поля, либо предварительное выполнение двухчастотной обработки данных измерений (Светов, 1973), дающее дополнительную информацию о наличии горизонтальных неоднородностей.

Вместе с тем, еще в середине прошлого века А.Г. Тархов обратил внимание на перспективность изучения геоэлектрического строения непосредственно по измеряемому аномальному эффекту (Тархов, 1957), где он охарактеризовал предпосылки применения «методов чистой аномалии» в электроразведке на постоянном и переменном токе для изучения геологических неоднородностей среды.

Применительно к индукционному зондированию с ВМД, перспектива применения этих методов следует из общей теории и сведений, касающихся определения элементов вторичного электромагнитного поля при заданной структуре и электрофизических параметрах исследуемой области геосреды (Великин, Франтов, 1962).

В связи с тем, что азимутальная (относительно источника электромагнитного поля) составляющая $H_\varphi$ отсутствует в нормальном поле при возбуждении горизонтально-слоистого полупространства с одномерным распределением электропроводности вертикальным магнитным диполем, то наличие в нем локальной геоэлектрической неоднородности неизбежно отразится на появлении чистой аномалии в измеряемой составляющей $H_\varphi$, пространственно приуроченной к аномалиеобразующему объекту.

В качестве количественной характеристики влияния горизонтальных неоднородностей среды в работе (Хачай, Бакаев, 1994) было предложено использовать параметр

$$\delta = (|H_\varphi| / |H_r|)\times 100\ \%,$$

учет которого необходим при картировании зон аномальной электропроводности, а также критериальной оценке применимости модели горизонтально-слоистой среды при решении обратной задачи дистанционного зондирования.

При комплексном изучения геоэлектрического строения геологической среды с применением ВМД в качестве источника поля на основе усовершенствованной методики площадных электромагнитных индукционных исследований, аппроксимация этого параметра суперпозицией полей от семейства трехмерных токовых линий, позволяет локализовать в конечном итоге приуроченные к ним структурные неоднородности (Хачай и др., 1999; Хачай, Новгородова, 1997; 1999).

Ранее, в порядке развития электроразведочных методов, относящихся к категории «чистой аномалии», был предложен способ электроразведки (Шестаков и др., 2006) для изучения верхней части геологического разреза. Область преимущественного применения – обнаружение и локализация в плане неоднородностей, контрастных по электропроводности в сравнении с вмещающей средой, с целью поиска рудных образований и решения некоторых задач малоглубинного геоэлектрического картирования горных пород.

В дополнение к арсеналу известных и ранее рекомендованных к применению (Инструкция…, 1984) методов дистанционного зондирования и индуктивного профилирования, учитывающим поведение отношения измеряемых составляющих напряженности поля $H_z$, $H_r$, этот способ несет более детальную информацию о локализации геоэлектрических неоднородностей среды, заложенную в морфологии чисто аномальной азимутальной (относительно источника) составляющей магнитного поля $H_\varphi$.

Это связано с тем, что традиционные методики оценки $\rho_{эф}$, вычисляемые по известным формулам для ближней, промежуточной и дальней зоны источника поля, могут не дать истинных результатов, а в ряде случаев привести вообще к ошибочным и физически неправомерным параметрам и оценкам (Светов, 1973).

Поэтому при геоэлектрическом картировании среды с локальными неоднородностями неизбежно возникает целесообразность в изучении морфологии абсолютных значений с последующим выявлением характерных особенностей наблюдаемых компонент поля и сравнении их с расчетными для основных типовых модельных объектов при заданных электрофизических параметрах.

В наиболее простых случаях форм объектов типа шара или сфероида, расположенных в безграничном пространстве, а также в других вариантах модели среды и видов источников возбуждения электромагнитного поля, допускающих скаляризацию задачи, расчетные элементы поля удается определить в замкнутом аналитическом виде (Вешев и др., 1971; Светов, 1973; Светов, Губатенко, 1988; и др.), в общем случае (произвольной формы границы объекта) возникает необходимость математического моделирования на основе применения метода интегральных уравнений (см., например, Дмитриев, Захаров, 1987). В отдельных вариантах допустимо ограничиться Борновским приближением при расчетах элементов электромагнитного поля, если геометрические параметры модели и электрофизические характеристики вмещающей среды, а также частота возбуждения поля в совокупности не противоречат требуемым ограничениям (Бердичевский, Жданов, 1981).

Таким образом, изучение морфологических особенностей поля в измеряемых абсолютных значениях различных его компонент необходимо как на начальном этапе геоэлектрического картирования с целью определения участков съемки, пригодных для детализационных исследований с привлечением методов дистанционно-частотного зондирования, так и независимого обнаружения и локализации в плане неоднородностей, контрастных по электропроводности в сравнении с вмещающей средой.

***Результаты моделирования при закрепленном источнике поля в варианте дистанционного зондирования***

В качестве базовой элементарной модели было рассмотрено проводящее полупространство с локальным объектом в форме куба и размерами, соизмеримыми с глубиной его залегания.

При закрепленном источнике возбуждения поля в варианте дистанционного зондирования элементы поля рассчитывались на равномерной квадратной горизонтальной сети, расположенной на высоте источника $h$ по алгоритму, изложенному в работе (Горшков, 2012) и адаптированному применительно к контрастным (по электропроводности) неоднородностям полупространства с плоской границей раздела земля-воздух. Удельное электросопротивление вмещающей среды $\rho_п$ и объекта $\rho_а$ принимались равными 100 и 0,02 Ом·м соответственно, частота возбуждения электромагнитного поля $\omega$ = 500 Гц, которая является близкой к используемым в отечественной и зарубежной аппаратуре для низкочастотных индукционных методов электроразведки (см., например, Электроразведка…, 1989).

Соотношение геометрических характеристик и электрофизических параметров модели с частотой поля позволяет учитывать расположенность объекта в ближней зоне

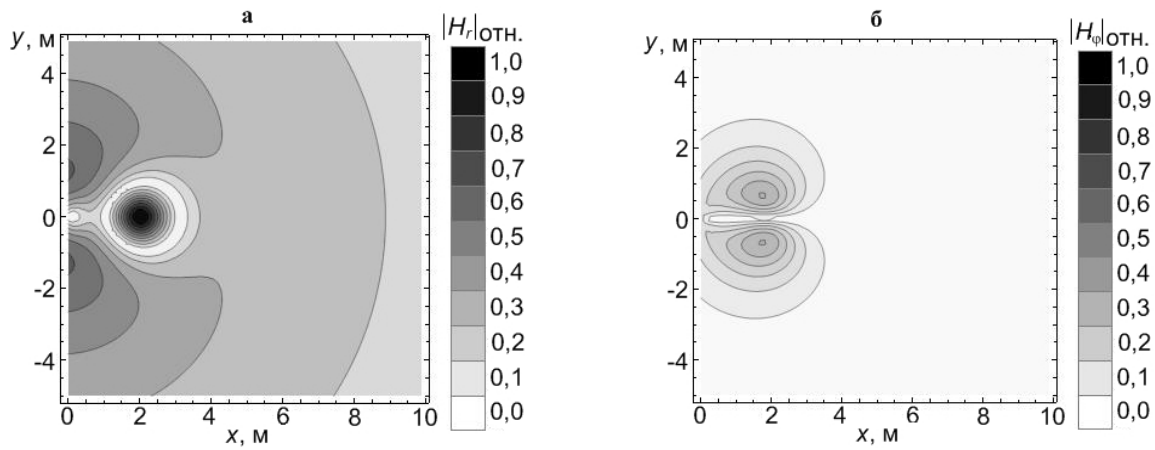


**Рис. 1.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) для изометричного объекта с центром [2,0,-2]

контролируемого источника – ВМД для приведенных в работе модельных примеров.

С целью изучения принципиальных особенностей морфологии различных элементов поля над возбуждаемым объектом неоднородности были рассмотрены различные варианты его удаления относительно источника, который был отнесен в плане к началу декартовой системы координат *X, Y, Z* с осью *Z*, направленной вертикально вверх. Все линейные размеры для определенности выражены в метрах.

В результате проведенного математического моделирования оказалось, что для выбранных характеристик среды и объекта аномальный эффект в вертикальной составляющей поля $H_z$ крайне незначителен на фоне нормального поля ВМД, поэтому для экспресс анализа были выбраны горизонтальные компоненты поля в цилиндрической системе координат, связанной с источником.

Учитывая, что арсенал серийной электроразведочной аппаратуры в меньшей степени представлен образцами для амплитудно-фазовых измерений, далее приведены результаты математического моделирования, ориентированные на возможности измерения модульных составляющих вертикальной, радиальной и азимутальной компонент поля, с применением аппаратуры ДЭМП-СЧ (ЦКБ «Геофизика», г. Красноярск), МЧЗ-8 (Байдиков, Человечков, 2011; ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург) или ее аналогов.

На всех рисунках демонстрируется площадное распределение (по квадратной сети) компонент суммарного магнитного поля, возбуждаемого ВМД в проводящем полупространстве с модельными объектами, контрастными по электропроводности.

На рис. 1–3 представлено распределение модульных значений (нормированных на максимальное значение модуля гори-

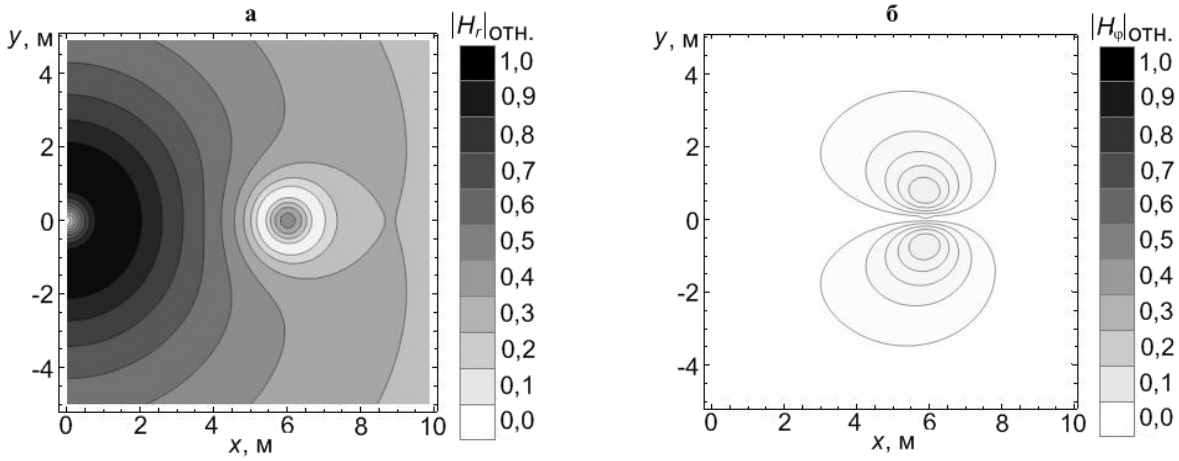


**Рис. 2.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) для

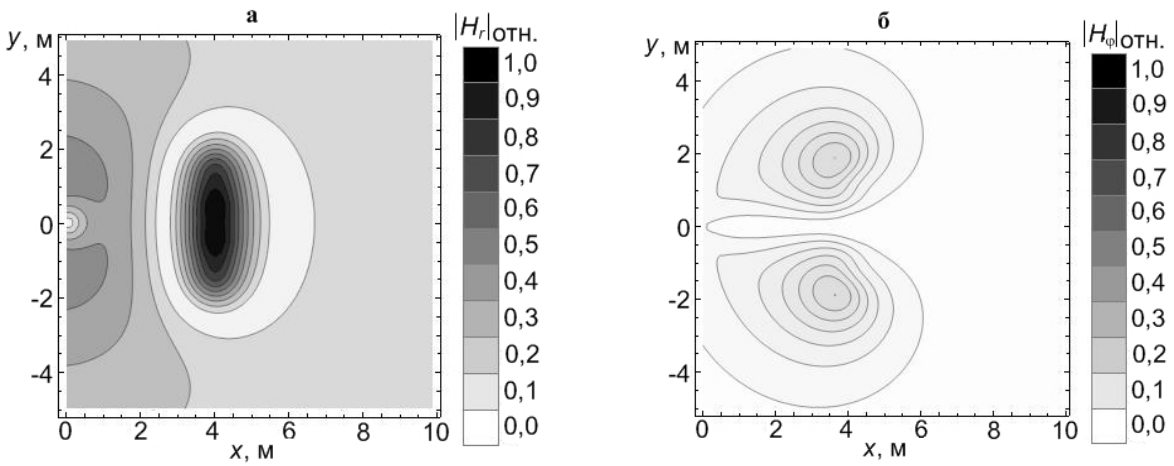


**Рис. 3.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) для протяженного объекта

зонтальной составляющей) радиальной $H_r$ и азимутальной $H_\varphi$ компонент в горизонтальной плоскости на участке [0,10] по оси $X$ и [-5,5] по оси $Y$ на высоте источника поля $h$ = 0,5 м относительно границы полупространства. На рис. 1а, б центр аномалиеобразующего объекта в форме единичного куба 1 м расположен в точке [2,0,-2]. На рис. 2а, б центр того же объекта расположен в точке [6,0,-2].

На следующем рисунке в качестве модельной неоднородности рассмотрен линейный протяженный объект, аппроксимируемый совокупностью четырех кубов, расположенных на одинаковом удалении от границы полупространства. Ниже представлено площадное распределение компонент суммарного магнитного поля (на высоте источника) при удалении объекта от -3,5 до 4,5 м по оси $X$, -2 до 2 м по оси $Y$, -1,5 до 2,5 м по оси $Z$ и поперечном расположении относительно ВМД с координатами [0, 0, 0,5]. Расчетные параметры электросопротивления вмещающей среды и объекта, частота электромагнитного поля принимают те же значения, что и ранее.

Из рис. 1–3 видно, что в радиальной составляющей аномальный эффект значительно выше, чем в азимутальной компоненте, и он неизбежно будет оказывать существенное помехообразующее влияние при вычислении $\rho_{эф}$ по известным расчетным формулам для ближней зоны источника над проводящим полупространством (см., например, Светов, 1973).

Это еще раз подтверждает необходимость предварительной разбраковки наблюдаемого сигнала в отношении обычно измеряемых компонент поля $|H_z|/|H_r|$ и оценки его применимости для интерпретации в рамках одномерной модели среды.

Другая особенность проявления аномального эффекта для рассматриваемой модели состоит в том, что $|H_r|$ имеет локально выраженный максимум непосредственно над объектом, а фокусы максимальных значений $|H_\varphi|$ смещены относительно нулевой линии значений, совпадающей с направлением на источник. Над протяженным объектом особенности морфологии поля в рассматриваемых значениях его компонент в целом сохраняются, при этом отмечается увеличение расстояния между экстремумами $|H_\varphi|$.

При выполнении практических измерений в принципе желательно оценивать независимо как радиальную, так и азимутальную составляющие (нормированные к модулю горизонтальной компоненты наблюденного поля), если в каждой из них аномальный эффект достаточно хорошо выражен. Однако опыт математического моделирования с маломощными объектами неоднородности показал, что это происходит в достаточной близости от источника поля. С некоторого удаления от источника аномальный эффект менее выражен и возможности выявления локальной неоднородности и приближенной ее локализации

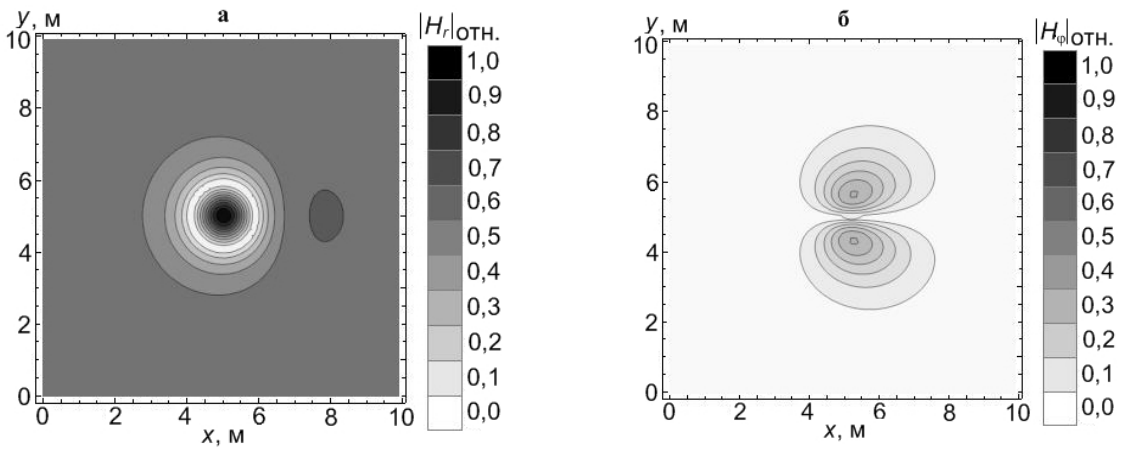


**Рис. 4.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) для изометричного объекта в форме куба

в плане при дистанционном зондировании могут быль весьма ограничены.

***Результаты моделирования в варианте профилирования с перемещаемыми источником и приемником поля***

Как и в предыдущем разделе, в качестве источника поля рассматривается ВМД, питаемый переменным током той же заданной частоты, а рассчитываются элементы суммарного (нормального и аномального) магнитного поля $|H_r|$, $|H_\varphi|$ в цилиндрической системе координат.

В качестве модельных неоднородностей были рассмотрены изометричный и протяженные объекты, расположенные в проводящем полупространстве на глубине, соизмеримой с разносом установки, представляющим расстояние между источником и приемником поля.

Подобный выбор связан с тем, что чувствительность установки определяется величиной аномального сигнала, который в свою очередь зависит от соотношения глубины залегания объекта с расстоянием между источником и приемником поля. Это обусловлено эффективной глубиной проникновения электромагнитного поля, а также методикой проведения радиального дистанционного зондирования среды (Титлинов, 1979).

На рис. 4–6 представлено распределение модульных значений радиальной $|H_r|_{\text{отн.}}$ и азимутальной $|H_\varphi|_{\text{отн.}}$ компонент в горизонтальной плоскости на участке [0,10] по оси $X$ и [-5,5] по оси $Y$ на высоте источника поля $h$ = 0,5 м относительно границы полупространства. Разнос установки $d$ принимался равным 2 м, направление профилирования – вдоль оси $X$.

На рис. 4 приведены расчетные элементы поля для объекта в форме единичного куба с центром в точке [5,5,-2].

Далее рассмотрены варианты как продольного, так и поперечного расположения

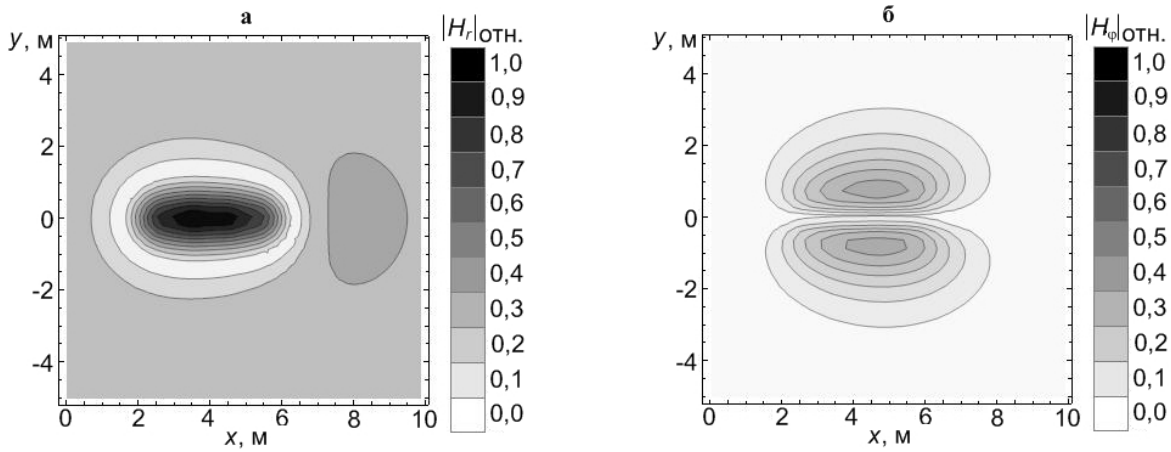


**Рис. 5.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) при продольном расположении объекта

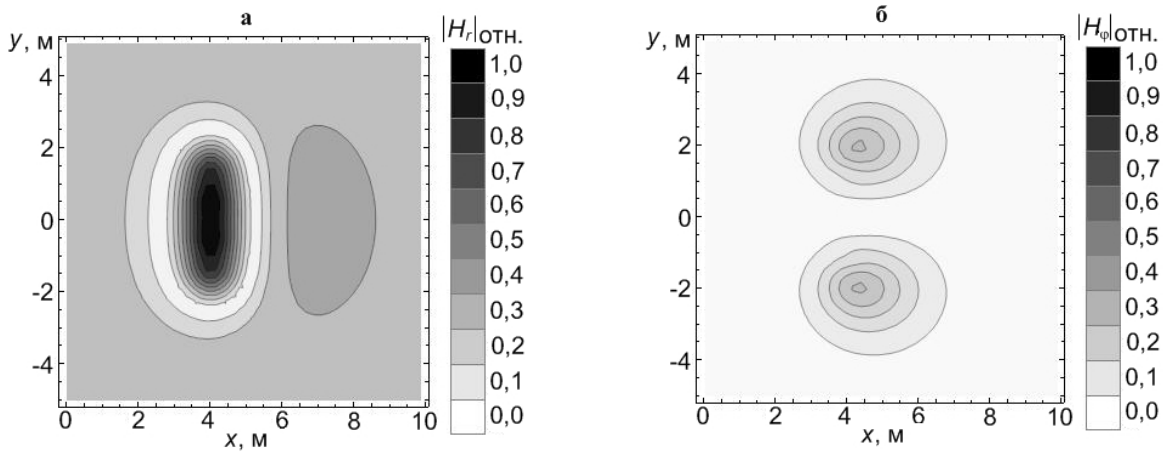


**Рис. 6.** Распределение в плане $|H_r|$ (а) и $|H_\varphi|$ (б) при поперечном расположении объекта

протяженного объекта относительно направления профилирования (вдоль оси $X$).

На рис. 5 объект, аппроксимируемый совокупностью четырех единичных кубов, расположен под линией $Y = 0$ с центром в точке [4,0,-2]. На рис. 6 рассмотрено поперечное расположение объекта под линией $X = 4$ с тем же центром.

На рис. 4а, 5а, 6а обращает на себя внимание незначительно выраженная (порядка 10 %) на фоновом уровне аномальная область, сопоставимая по размеру с основной аномалией в радиальной составляющей поля, а также некоторая асимметрия в ее значениях относительно эпицентральной линии, проходящей над объектом. Не исключено, что такая асимметрия вызвана особенностью расположения профилирующей установки относительно объекта, в данном случае источник поля располагается левее точки, в которой вычисляются элементы поля.

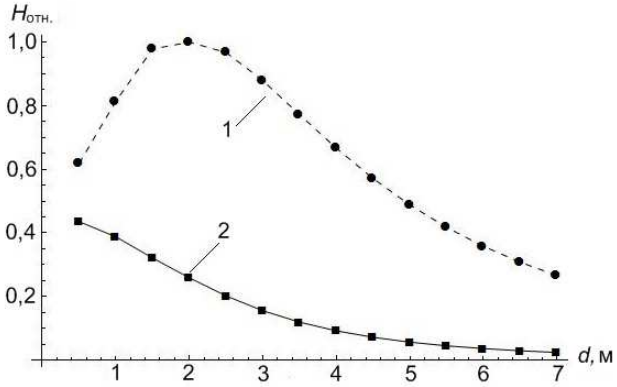


**Рис. 7.** Зависимость относительных максимальных значений компонент магнитного поля от разноса установки:
1 – максимальные значения $|H_r|/|H_r|_{max}$;
2 – максимальные значения $|H_\varphi|/|H_r|_{max}$

Следует заметить, что подобная асимметрия наблюдается для теоретически рассчитанного вторичного поля над проводящим шаром в работе (Светов, 1973) применительно к дипольному варианту профилирования. В этой работе также отмечаются характерные морфологические особенности кривых профилирования в различных компонентах поля при различном соотношении расстояния до центра шара и разноса установки. В частности, в случае использования ВМД в качестве источника, горизонтальная составляющая вторичного поля $H_x$ над центром шара (совпадающая на этом профиле с радиальной компонентой) имеет близкую морфологию, свойственную случаю поперечного расположения объекта, когда аномалия имеет один экстремум и затухает на расстоянии порядка глубины залегания центра шара, причем интенсивность затухания немного выше со стороны приемного диполя.

Поскольку интенсивность аномального эффекта оказывает определяющую роль в поисково-картировочных исследованиях, для одной и той же модели были рассмотрены различные варианты удаления источника от приемника с целью установления зависимости максимальных наблюдаемых значений компонент магнитного поля от разноса установки при фиксированном поперечном расположении объекта с указанными выше параметрами (рис. 7).

Анализ результатов математического моделирования показал, что аномальный эффект в радиальной компоненте наиболее отчетливо выражен, когда расстояние между источником и приемником поля сравнимо с глубиной залегания аномалиеобразующего объекта. Ранее при изучении морфологии кривых радиального индукционного зондирования над слоистыми структурами была выявлена аналогичная особенность, идентифицирующая искомый проводящий слой, когда расстояние между генераторным и приемным диполями коррелирует с глубиной до его центра (Титлинов, 1979). С увеличением разноса профилирующей установки эффект ослабевает, причем более значительно в азимутальной составляющей магнитного поля.

На практике это позволяет рассчитывать на возможность оценки глубины залегания объекта при выполнении детализационных профильных измерений с варьированием величины разноса установки.

***Обсуждение результатов***

Сравнивая результаты математического моделирования при закрепленном источнике поля и перемещаемом вдоль системы профилей, заданных на площади, можно отметить следующие принципиальные различия, касающиеся морфологии радиальной и азимутальной составляющих напряженности магнитного поля.

1. В первом случае аномальный эффект накладывается на нормальное поле источника (за исключением азимутальной составляющей) и уменьшается по мере удаления от него объекта неоднородности в обеих компонентах.

На распределении азимутальной компоненты в плане выявляются «фокусы», которые приурочены к проекциям границ неоднородности на горизонтальную плоскость, нулевая линия между фокусами проходит над центральной частью объекта.

2. Во втором случае аномальный эффект для радиальной компоненты также выражен на фоне нормального поля, но значения последнего остаются неизменными при перемещении установки с фиксированным разносом, что приводит к более уверенной разбраковке аномалии.

В азимутальной составляющей поля аномальный эффект выражен более интенсивно, чем в варианте зондирования, а его морфология определяется в основном геометрическими параметрами модельного объекта, в частности, соотношением продольного и поперечного характерных размеров.

3. Распределение максимальных модульных значений (фокусов) азимутальной компоненты приурочено к проекциям поперечных границ объекта по отношению к направлению профилирования. При продольном варианте профилирования над протяженным объектом (см. рис. 5б) отмечается вытянутый характер изолиний, которые расположены над его границами.

При поперечном варианте профилирования (см. рис. 6б) характер изолиний близок к круговому, что отражает значительно меньший (в 4 раза) поперечный размер объекта по отношению к его длине.

4. Характерная глубина залегания аномалиеобразующего изометричного объекта близка к расстоянию между фокусами площадного распределения модульных значений азимутальной составляющей (см. рис. 1б, 2б, 4б). Более точную оценку глубины может дать сравнительный анализ максимальных значений радиальной компоненты в зависимости от разноса установки (см. рис. 7).

В целом, характер поведения радиальной составляющей поля над рассмотренными выше модельными объектами соответствует морфологии теоретически рассчитанных кривых $H_x$ при профилировании над шаром с источником ВМД (Светов, 1973) для сопоставимых соотношений разноса установки и глубины залегания. Это позволяет рассчитывать на возможность применения некоторых общих методических приемов количественной интерпретации аномального эффекта от шара (в радиальной и вертикальной компонентах) к аномальным составляющим поля от локальных изометричных и ограниченных линейно протяженных неоднородностей.

Что касается азимутальной составляющей поля, то в ней содержится дополнительная информация о расположении и характеристиках аномалиеобразующего объекта, для извлечения которой необходимо разработать соответствующую методику.

В дальнейшем представляет интерес оценить также область влияния типичных локальных неоднородностей (расположенных как в однородном, так и слоистом полупространстве) на результат построения кривых $\rho_{эф}$ при дистанционном зондировании на ряде профилей для более выверенной оценки применимости последующей количественной интерпретации отбракованных данных в рамках одномерной модели среды.

***Литература***

*Байдиков С.В., Человечков А.И.* Аппаратура для индукционных зондирований МЧЗ-8 // Уральский геофизический вестник. 2011. № 1. С. 4–8.

*Бердичевский М.Н., Жданов М.С.* Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра, 1981. 327 с.

*Великин А.Б., Франтов Г.С.* Электромагнитные поля, применяемые в индукционных методах электроразведки. Л.: Гостоптехиздат, 1962. 352 с.

*Вешев А.В., Ивочкин В.Г., Игнатьев Г.Ф.* Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.

*Вешев А.В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.

*Горшков В.Ю.* Математическое моделирование вторичного магнитного поля локального проводящего объекта, возбуждаемого вертикальным магнитным диполем в однородной среде // Материалы XIII Уральской молодежной научной школы по геофизике. Екатеринбург, 2012. С. 43–45.

*Дмитриев В.И., Захаров Е.В.* Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики. М.: МГУ, 1987. 167 с.

*Заборовский А.И.* Электроразведка. М.: Гостоптехиздат, 1963. 424 с.

Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 335 с.

*Светов Б.С.* Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.

*Светов Б.С., Губатенко В.П.* Аналитические решения электродинамических задач. М.: Наука, 1988. 344 с.

*Тархов А.Г.* Об электроразведочных методах чистой аномалии // Известия АН СССР. Сер. геофизическая. 1957. № 8. С. 979–989.

*Титлинов В.С.* Индукционное электромагнитное зондирование при поисках рудных месторождений (методические рекомендации). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. 132 с.

*Хачай О.А., Бакаев В.П.* Об усовершенствовании методики площадных индукционных исследований на россыпных месторождениях // Горный журнал. 1994. № 1. С. 8–18.

*Хачай О.А.* Трехэтапный метод интерпретации переменных электромагнитных полей и его практическая реализация // Электромагнитные исследования с контролируемыми источниками. СПб., 1996. С. 30–31.

*Хачай О.А., Новгородова Е.Н.* Опыт площадных индукционных исследований резко неоднородных геоэлектрических сред // Физика Земли. 1997. № 5. С. 60–64.

*Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Бодин Вд.В.* О проблемах малоглубинной геоэлектрики и некоторых результатах их решения // Физика Земли. 1999. № 5. С. 47–53.

*Хачай О.А., Новгородова Е.Н.* Использование трехмерной методики индукционных электромагнитных исследований строения горных массивов // Физика Земли. 1999. № 6. С. 61–65.

*Шестаков А.Ф., Улитин Р.В., Бакаев В.П.* Способ геоэлектроразведки и устройство для его осуществления. Патент RU № 2276389, класс G 01 V 3/08. Опубл. 10.05.2006. Бюл. № 13.

Электроразведка. Справочник геофизика. Кн. первая. М.: Недра, 1989. 438 с.