

на правах рукописи

Чистосердов Борис Михайлович

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ КОМПЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК
И МЕТОДИКА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ИНДУКЦИОННОЙ
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКЕ

Автореферат диссертации на соискание степени
кандидата технических наук

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Екатеринбург-2008

Работа выполнена в Институте геофизики УрО РАН

Научные руководители:

доктор технических наук
Человечков Александр Иванович,
кандидат технических наук
Улитин Руслан Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук
Голиков Юрий Владимирович,
Кандидат технических наук
Волынский Дмитрий Николаевич

Ведущая организация:

Пермский государственный
университет (г. Пермь)

Защита состоится 26 декабря 2008 г. в 10.00 на заседании
диссертационного совета Д 004.009.01 при Институте геофизики УрО РАН,
по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Института геофизики УрО РАН.

Автореферат разослан

2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор физико-математических наук,
профессор



Хачай Ю. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние годы ведутся поиски более мелких месторождений в районах, прилегающих к освоенным рудным полям. При этом основным поисковым методом является метод переходных процессов, который себя хорошо зарекомендовал при проведении разведочных работ в районах, слабо освоенных в промышленном отношении. Однако, в настоящее время из-за большего количества на обследуемых территориях линий электропередач для получения качественных результатов приходится использовать как мощные источники магнитного поля, так и новейшие методы фильтрации помех. Использование мощных источников нередко приводит к возбуждению нескольких аномальных объектов, для выявления которых требуется проведение детализации. Все это значительно удорожает производство электроразведочных работ.

Метод дипольного индукционного профилирования при поисках рудных объектов применяется значительно реже вследствие недостаточной чувствительности этого метода. Однако использование в этом методе гармонического сигнала позволяет добиться высокой добротности измерительной аппаратуры, в результате чего отпадает необходимость в мощных источниках магнитного поля.

В настоящее время при проведении профилирования аномальный объект может быть обнаружен лишь в том случае, если профиль пройдет над объектом. Процедура поисков значительно упрощается, если используемая при профилировании установка позволяет выявлять искомый объект даже тогда, когда профиль проходит в стороне от него.

При интерпретации экспериментальных данных, полученных при картировании аномального объекта, очень часто используют приближение слоистой среды. Вблизи границ объекта это приближение оказывается очень грубым, поэтому положение границы аномального объекта в плане находится с ошибками.

Таким образом, **актуальность** работы определяется необходимостью:

- а) повысить чувствительность исследуемых установок при измерении магнитного поля, возбуждаемого в неоднородной геосреде контролируемым источником;
- б) создать установки, позволяющих повысить эффективность обнаружения проводящих объектов, расположенные в стороне от профиля геоэлектрических наблюдений;
- с) разработать способы определения положения границ аномального объекта в плане с использованием только экспериментальных данных.

Цель работы. Учитывая упомянутые выше требования к методике измерений, можно сформулировать цель работы следующим образом:

1. Создание измерительных установок, обладающих не только высокой добротностью, но и высокой чувствительностью, которая позволяла бы выделять аномальные объекты даже в том случае, когда они сверху перекрыты наносами с повышенной электропроводностью.

2. Разработка методики измерений, позволяющих выявлять объекты, расположенные в стороне от профиля.

3. Создание измерительных установок, позволяющих определять положение в плане вертикальных границ аномальных объектов.

Задачи исследования:

1. Выбор конструкции установок, позволяющих уменьшить влияние верхних слоев разреза на измеряемый сигнал.

2. Теоретическое обоснование применимости предлагаемых установок для горизонтально слоистых сред.

3. Расчеты профильных кривых и кривых частотного и дистанционного зондирования для разрезов, содержащих аномальные объекты с пониженным электрическим сопротивлением.

4. Экспериментальное опробование разработанных методов.

Объект исследований

В данной работе изучаются компенсационные методы, для реализации которых предлагается использование трех индукционных установок: двухпетлевой, «квадрупольной» и дифференциальной.

Научная новизна полученных результатов

1. Предложен способ прецизионной компенсации первичного магнитного поля, создаваемого индукционной двухпетлевой установкой (патент № 2230341).

2. Показано, что для повышения чувствительности измерительной установки целесообразно использовать фазочувствительные измерения, по результатам которых строится кривая частотной зависимости кажущегося сопротивления отдельно по реальной и мнимой частям измеренной компоненты магнитной индукции; для определения типа разреза целесообразно использовать частотную зависимость кажущегося сопротивления, рассчитанного по реальной части измеренного сигнала.

3. Разработана методика расчета параметров двух- и трехслойного разреза, основанная на экспериментальном определении количества слоев в разрезе с последующим численным решением системы уравнений, что позволяет определять электрофизические параметры среды без использования процедуры подбора.

4. Показана целесообразность использования двухпетлевой установки при вертикальном зондировании среды, что позволяет выявлять аномальные объекты, обладающие повышенной электропроводностью, на глубинах, соизмеримых с размерами установки.

5. Предложена индукционная «квадрупольная» установка, позволяющая существенно уменьшить экранирующее влияние верхних слоев разреза (патент № 2310214).

6. Показана перспективность использования дифференциальной индукционной установки при определении положения вертикальных границ исследуемого объекта (для профилей, проходящих над объектом) и для определения положения центра объекта в плане (для профилей, проходящих в стороне от объекта).

Выделяя основополагающие из полученных результатов, сформулируем следующие защищаемые **научные положения**:

1. Впервые разработана и экспериментально опробована методика прецизионной компенсации первичного магнитного поля, создаваемого двухпетлевой индукционной установкой. Данная методика позволяет визуально контролировать процесс компенсации по измерительному прибору, в результате чего в точке измерения первичное магнитное поле может быть плавно снижено до уровня помех (патент № 2230341).

2. Впервые предложен способ определения типа разреза, основанный на построении частотной зависимости кажущегося сопротивления, рассчитанного по реальной части измеряемой компоненты магнитной индукции. Применение этого способа позволяет по результатам частотного зондирования качественно определить порядок чередования в изучаемом разрезе слоев с повышенным и пониженным сопротивлением.

3. Впервые предложена и теоретически обоснована «квадрупольная» электроразведочная установка, позволяющая существенно снизить влияние верхних слоев разреза на измеряемый сигнал, в результате чего появляется возможность выявлять слои в разрезе, перекрытые наносами повышенной электропроводности (патент № 2310214).

Практическая ценность и реализация результатов исследования

Для выявления глубоко залегающих аномальных объектов с использованием дипольной установки требуются разносы, превышающие глубину залегания аномального объекта. При таких разносах часто оказываются возбужденными несколько аномальных объектов, для выявления которых требуется большой объем детализационных работ. В таких ситуациях целесообразно использовать рассмотренные в данной диссертации двухпетлевую и «квадрупольную» установки, позволяющие обнаружить объект на глубинах, соизмеримых с размерами установки.

Разработанные способы измерений вторичного магнитного поля позволяют при профилировании в стороне от аномального объекта определять положение центра проекции объекта на дневную поверхность.

Дифференциальная установка может быть использована при поисках мест фильтрации отходов промышленного производства. С её помощью прямыми измерениями можно выявить положение вертикальных границ тектонически нарушенных, водопроницаемых пород, по которым происходит

фильтрация загрязненной воды из отстойника. Аналогичным образом с использованием дифференциальной установки устанавливается положение вертикальных границ при изучении зон просачивания воды сквозь тело плотины.

Разработанные способы измерений магнитной индукции и методика построения частотной зависимости по экспериментальным данным впервые были опробованы на Чусовском медноколчеданном месторождении вблизи г. Полевского Свердловской области. Для зондирования использовалась двухпетлевая установка. Полученные результаты не противоречат известным по этому месторождению геологическим данным. Построенные частотные зависимости также подтвердили вывод, что наибольшую информацию об аномальном объекте несет величина кажущегося сопротивления, определенного по реальной части измеряемой компоненты магнитного поля. В то же время по кажущему сопротивлению, рассчитанному по мнимой части измеряемой компоненты объект практически не выделяется. Аналогичные измерения были проделаны на Бобровской магнитной аномалии вблизи г. Реж Свердловской области. По результатам измерений эта аномалия была определена как приповерхностная.

Дифференциальная методика использовалась при работах в районе ПО «Маяк». С её использованием прямыми измерениями выявлены положения границ тектонически нарушенных, водопроницаемых пород, по которым происходит фильтрация загрязненной воды из озера Карачай. Аналогично, с помощью дифференциальной установки определены положения границ зон просачивания воды из водоема В-11 сквозь тело плотины. Сформулированные выводы хорошо согласуются с результатами интерпретации данных, полученных на тех же объектах методом ВЭЗ.

Апробация работы. Результаты работ докладывались на международном семинаре им. Д. Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» (Екатеринбург 1999г., Пермь 2005г., Екатеринбург 2006г.), на научных чтениях им. Ю. П. Булашевича «Ядерная геофизика, геофизические исследования литосферы, геотермия (Екатеринбург 2003г., 2007г.)», на межрегиональном форуме «Приборостроение 2004».

Личный вклад автора.

При рассмотрении двухпетлевой установки автором самостоятельно решены следующие задачи:

- 1) определение параметров горизонтально слоистого разреза;
- 2) профилирование двухпетлевой установкой над аномальным объектом;
- 3) двухпетлевое частотное зондирование над аномальным объектом.

Методика прецизионной компенсации первичного магнитного поля разработана автором совместно с Человечковым А. И.

При рассмотрении дифференциальной установки автор самостоятельно проделал все теоретические расчеты, полевые измерения сделаны под руководством Улитина Р. В.

В главе, посвященной «квадрупольной» установке, автором получены самостоятельно все результаты.

Полевые измерения производились автором в составе бригады, состоящей из сотрудников Института.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе получено четыре патента.

Работа над диссертацией выполнялась в Институте геофизики УрО РАН г. Екатеринбург.

Автор выражает благодарность научным руководителям Человечкову А. И. и Улитину Р. В. за помощь в работе и полезные советы, заведующему лаборатории «Экологической геофизики» Шестакову А. Ф. за обсуждение полученных результатов и полезные советы,. Автор считает необходимым поблагодарить сотрудников лаборатории экологической геофизики Бакаева В. П., Девятьярова В. В., Журавлеву Р. Б., Федорову О. И. за помощь в проведении полевых работ и обсуждении полученных результатов, автор благодарен также сотрудникам других лабораторий Института Астафьеву П. Ф., Байдикову С. В., Ратушняку А. Н. за помощь при оформлении диссертации и обсуждении полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 94 страницы текста, 53 рисунка и список литературы из 57 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. В этом разделе рассмотрены актуальность работы, цель, основные задачи и научная новизна исследований, сформулированы защищаемые научные положения, рассмотрены практическая значимость и апробация работы.

Первая глава (Исследование методических вопросов применения двухпетлевой индукционной установки в электроразведке). В этой главе излагаются принципы работы двухпетлевой установки (ДПУ) и демонстрируются различные аспекты ее применения.

1. 1 Основы измерений двухпетлевой установкой

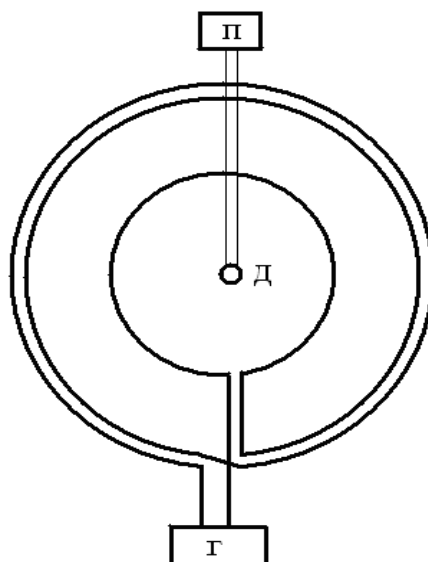


Рис. 1. Схема двухпетлевой установки (Г-генератор, П-приемник, Д-датчик)

Двухпетлевая установка (рис. 1) содержит две горизонтально ориентированные соосные незаземленные рамки, подключенные последовательно к источнику таким образом, чтобы создаваемые ими магнитные моменты имели противоположные направления, при этом датчик измерительного прибора располагается вблизи центра установки. Поскольку напряженность магнитного поля в центре рамки с радиусом R равна $H=WI/R$ (W -число витков рамки, I -величина тока), то при $W=2$ и $R_2=2R_1$ в точке измерения первичное магнитное поле оказывается полностью скомпенсированным. Человечковым А. И. и автором диссертации была разработана методика плавной прецизионной компенсации первичного магнитного поля, причем степень компенсации контролируется по измерительному прибору. Для осуществления прецизионной компенсации размеры внутренней петли увеличиваются при раскладке в 1.01 раза. При этом создается небольшая недокомпенсация первичного магнитного поля при положении датчика в центре петель. Установление максимальной компенсации достигается на минимально возможной частоте f_k путем перемещения датчика в радиальном направлении до достижения минимальных показаний приемника. Необходимо учитывать, что на частоте f_k компенсируется суммарное значение первичного магнитного поля и реальной части вторичного магнитного поля, поэтому на этом этапе измерения не производятся. Расчеты показывают, что на низких частотах реальная часть вторичного поля растет пропорционально квадрату частоты, поэтому измерения можно начинать с частоты $4f_k$. В этом случае ошибка в определении реальной части вторичного магнитного поля оказывается порядка 6%. На более высоких частотах ошибка измерения становится еще меньше.

В момент полной компенсации модульный измерительный прибор регистрирует чисто мнимую часть измеряемого магнитного поля, которая не

может быть скомпенсирована по причине ее ортогональности к реальной части магнитного поля.

Наличие плавной контролируемой компенсации первичного магнитного поля существенно отличает рассматриваемый метод от метода искусственного подмагничивания (МИП), в котором контроль степени компенсации первичного магнитного поля не осуществим из-за невозможности разделения измерительным прибором первичного и аномального магнитного поля.

Известен зарубежный аналог двухпетлевой установки (I. J. Won, H. Huang), однако конструкция установки такова, что она может быть использована только для малоглубинных измерений. Существенно также, что первичное поле, создаваемое этой установкой, не обладает вертикальной фокусировкой (в отличие от двухпетлевой установки, рассматриваемой в диссертации).

Конструкция двухпетлевой установки, в которой первичное магнитное поле скомпенсировано в точке измерений, позволяет сфокусировать магнитное поле петель вдоль оси установки на заданной глубине (порядка радиуса внутренней петли). Фокусировка первичного поля позволяет уменьшить влияние верхних слоев разреза на измеряемый сигнал, в то же время увеличивается доля сигнала, возбуждаемая в зоне, где первичное поле максимально. Таким образом, благодаря фокусировке, происходит увеличение чувствительности установки.

Для фазочувствительных измерений в описываемой установке используется модульный прибор, датчик которого имеет дополнительный виток, в который подается ток от шунта, включенного в цепь рамок. Меняя фазу тока в дополнительном витке на 180° , т.е. используя «суммо-разностный метод», можно по трем измерениям модуля магнитного поля определить реальную и мнимую части измеряемого магнитного поля по известной формуле $V_{1,2} = (V_0^2 + V_v^2 \pm 2 V_0 V_v \cos\varphi)^{0.5}$, где V_0 - модуль поля в отсутствие тока в витке, V_v - магнитное поле, создаваемое дополнительным витком, $V_{1,2}$ - модуль поля при различных фазах этого тока.

Фазочувствительные измерения позволяют получать частотную и дистанционную зависимости отдельно по реальной и мнимой частям измеряемого магнитного поля, на основании которых можно строить соответствующие кривые кажущегося сопротивления.

Численные расчеты показывают, что кривые частотной зависимости кажущегося сопротивления, построенные по реальной части магнитного поля, оказываются более информативными, чем соответствующие кривые, построенные по мнимой части. Это объясняется тем, что реальная часть магнитного поля является более чувствительной к изменениям сопротивления среды, нежели мнимая часть.

При измерениях использовали аппаратуру МЧЗ-11 (частоты 317Hz-325000Hz) и НЧЗ (частоты 4.88Hz-5000Hz), разработанную А.

И. Человечковым.

1. 2 Определение параметров горизонтально слоистого разреза.

Обычно определение электрофизических характеристик горизонтально–слоистого разреза осуществляется путем подбора параметров слоев при многократном решении прямой задачи. В данном разделе описывается методика решения обратной задачи, позволяющая получать параметры двух- и трехслойного разреза без использования процедуры подбора.

Процесс интерпретации имеет две стадии: сначала определяется модель среды, после чего находят параметры этой модели. При определении модели среды целесообразно использовать двухпетлевую установку, которая обладает повышенной чувствительностью к наличию слоев, обладающим пониженным сопротивлением. Для этого необходимо проделать частотное зондирование с использованием фазочувствительных измерений. Частотная зависимость кажущегося сопротивления разреза, полученная на основе реальной части магнитного поля, позволяет, как правило, однозначно установить тип разреза. В дальнейшем величина кажущегося сопротивления, определяемая отдельно по реальной и мнимой частям измеряемой компоненты магнитного поля, будет обозначаться ρ_{ω}^r , ρ_{ω}^i , соответственно.

На рис. 2 в качестве примера приводятся кривые ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^i , построенные по результатам частотного зондирования. По виду кривой 2 на этом рисунке можно достаточно обоснованно предположить, что изучаемый разрез является трехслойным.

Дальнейшая процедура определения параметров разреза предполагает использование измерений на низких частотах, для которых можно использовать низкочастотное приближения для функции отражения α_n . Для трехслойного разреза функция отражения имеет вид

$$\alpha_3 \approx (i\omega\mu/4\lambda^2) \{ \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) \exp(-2\lambda h_1) + (\sigma_3 - \sigma_2) \exp(-2\lambda(h_1 + h_2)) \}.$$

В этом приближении значения σ_1 , σ_2 , σ_3 фигурируют в качестве сомножителей,

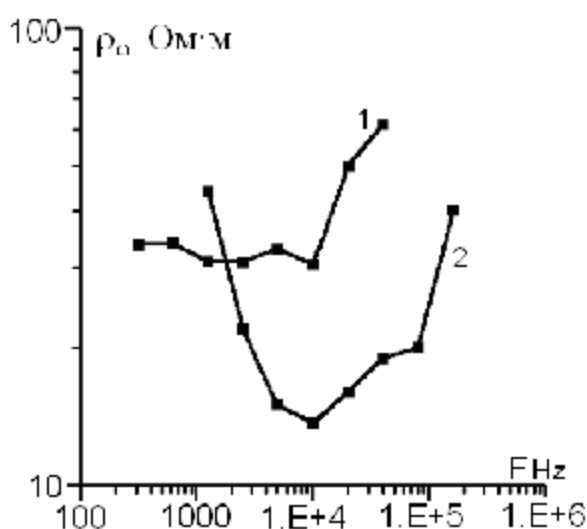


Рис. 2. Участок Логиново. Двухпетлевая установка ($R_1=8\text{м}$, $R_2=16\text{м}$), кривая 1- ρ_{ω}^i , кривая 2- ρ_{ω}^r

в результате чего появляется возможность с помощью трех измерений на низкой частоте получить аналитическую зависимость σ_1 , σ_2 , σ_3 через остальные параметры разреза. Для определения значений h_1 и h_2 следует сделать два измерения на высоких частотах с помощью двухпетлевой установки. В результате получаем два уравнения, численное решение которых позволяет установить значения h_1 и h_2 . Описанная процедура определения параметров разреза не содержит элементов подбора, что позволяет однозначно определять искомые параметры. В том случае, когда разрез содержит геологические помехи, но используемые выше системы уравнений имеют решения, можно говорить о полученных значениях параметров как о кажущихся. При существенном отличии изучаемого разреза от горизонтально однородного, когда системы уравнений решения не имеют, предлагаемый метод неприменим.

1. 3. Экспериментальное опробование способа определения параметров горизонтально слоистого разреза. Работы по определению параметров горизонтально слоистого разреза производились вблизи деревни Логиново (Белоярский район, Свердловская область). На Логиновском участке были сделаны следующие измерения:

1. Частотное зондирование с помощью двухпетлевой установки (радиус большой петли 16 и 8 метров).

2. Измерение сопротивления верхнего слоя с помощью установки Шлюмберже (ВЭЗ) при малых значениях $AB/2$.

Частотные зависимости кажущегося сопротивления, построенные по результатам измерений, показали, что изучаемый разрез является трехслойным. Далее, согласно разработанной методике, следовало, используя низкочастотные измерения, получить выражения для электропроводностей слоев. Однако дальнейшие расчеты показали, что для электропроводности верхнего слоя получаются заведомо нереальные (отрицательные) значения. Это, скорее всего, свидетельствовало о том, что верхний слой имеет небольшую мощность и повышенное удельное сопротивление, в результате чего вторичное магнитное поле, генерируемое этим слоем, пренебрежимо мало по сравнению с полями от других слоев. В такой ситуации целесообразно использовать прямое измерение электропроводности верхнего слоя с помощью метода ВЭЗ при минимальных разносах $AB/2$.

По значениям определенных параметров разреза для контроля была построена частотная зависимость величины B_{zr}/B_s (B_{zr} -реальная часть магнитной индукции, B_s -модуль магнитного поля при синфазности магнитных моментов петель). На рис. 3 приведены теоретическая и экспериментальная частотные зависимости этой величины. Как видно, на высоких частотах точность измерений понижается (при 80 кГц отличие от среднего значения составляет 8.1%), что связано, по-видимому, с появлением емкостных токов утечки с проводов на землю.

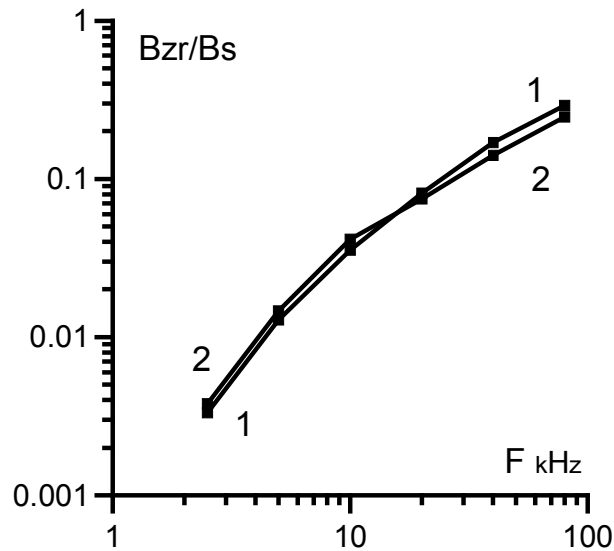


Рис. 3. 1-теоретическая кривая, 2-экспериментальная кривая

1. 4. Профилирование двухпетлевой установкой над аномальным объектом.

Для упрощения численных расчетов рассмотрим бесконечное однородное пространство с электропроводностью σ_n , в котором находится аномальный объект с однородной электропроводностью σ_1 , имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, у которого осевая линия совпадает с осью «х» (рис. 4).

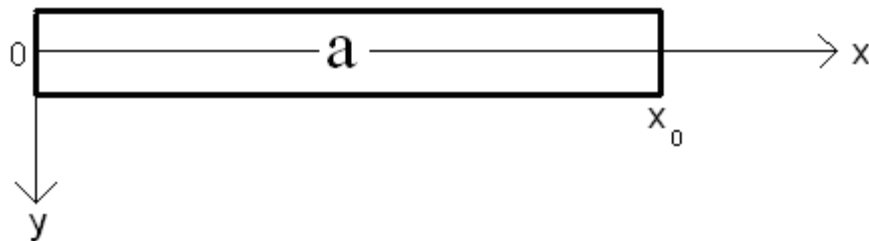


Рис. 4

Для расчетов профильных кривых воспользуемся интегральным уравнением Weidelt(a)

$$E_i(\vec{r}) + i\omega\mu \int_V \sigma_a E_j(\vec{r}') G_{ji}(\vec{r} - \vec{r}') dv = E_{ni}(\vec{r}), \quad (1)$$

1)

где интегрирование ведется по объему аномального объекта, E_i - i -компонента электрического поля, $\sigma_a = \sigma_1 - \sigma_n$, E_{ni} -компонента первичного электрического поля; функция Грина G_{ji} удовлетворяет уравнению

$$(\delta_{ij}(\Delta - k_n^2) - \nabla_i \nabla_j) G_{pj}(\vec{r} - \vec{r}') = \delta_{pj} \delta(\vec{r} - \vec{r}'), \quad k_n^2 = -i\omega\mu\sigma_n. \quad (1)$$

2)

Для рассматриваемой модели среды решение уравнения (1. 2) можно записать в виде

$$G_{pi}(\vec{r} - \vec{r}') = -\left(\delta_{pi} + \frac{1}{k_n^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_p}\right) \frac{\exp(-k_n R)}{4\pi R} \quad (1.)$$

3),

где $R = ((x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2)^{0.5}$.

При решении уравнения (1. 1) весь объем интегрирования обычно разбивают на отдельные ячейки, внутри которых величина индуцированного электрического поля предполагается приближенно однородной. Таким образом, уравнение (1. 1) можно записать следующим образом:

$$E_i(\vec{r}) + i\omega\mu\sigma_a \sum_N E_j^{(N)} \int_{V_N} G_{ji}(\vec{r} - \vec{r}') dv_N = E_{ni}(\vec{r}) \quad (1.)$$

4)

В этом уравнении интегрирование ведется по объему ячейки с индексом «N». Первичное электрическое поле в правой части уравнения (1. 4) находится из решения уравнения

$$\Delta E_{n\phi} - E_{n\phi}/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_n E_{n\phi} = -i\omega\mu I_0 \delta(\rho - R_0) \delta(z + h_0), \quad (1.)$$

5)

здесь $(-h_0)$ -вертикальная координата источника.

Для получения профильных кривых сначала рассмотрим простейшую модель аномального объекта в виде прямоугольного параллелепипеда, основанием которого является основание элементарной ячейки со сторонами Δ_y и Δ_z , длина такого параллелепипеда равна $(N\Delta_x)$. Численные расчеты величины $\int_{V_N} G_{ji}(\vec{r} - \vec{r}') dv_N = C_{ji}(N)$ показывают, что для рассматриваемой

модели аномального объекта ненулевыми значениями обладают только величины $C_{xx}(N)$, $C_{yy}(N)$, $C_{zz}(N)$. Поскольку в двухпетлевой установке вертикальная компонента первичного электрического поля E_{nz} равна нулю, то уравнение для E_z не содержит источника и, следовательно, величина $C_{zz}(N)$ равна нулю. Таким образом, уравнения для компонент индуцированного электрического поля можно записать в виде

$$E_x(m)(1 + i\omega\mu\sigma_a C_{xx}(m)) + i\omega\mu\sigma_a \sum_{N \neq m} E_x(N) C_{xx}(N) = E_{nx}(m), \quad (1. 6)$$

$$E_y(m)(1 + i\omega\mu\sigma_a C_{yy}(m)) + i\omega\mu\sigma_a \sum_{N \neq m} E_y(N) C_{yy}(N) = E_{ny}(m).$$

В приведенной системе уравнений (1. 6) «m» является номером ячейки, для которой написаны уравнения (1. 6). Величины $C_{xx}(m)$, $C_{yy}(m)$ описывают индукционные процессы внутри ячейки «m», величины $C_{xx}(N)$, $C_{yy}(N)$ характеризуют индукционное влияние ячеек «N» на ячейку «m»; компоненты электрического поля $E_{nx}(m)$ и $E_{ny}(m)$ определяются путем проектирования вектора первичного электрического поля на соответствующие оси координат.

После определения с помощью уравнений (1. 6) величины электрического поля можно перейти к вычислению измеряемого значения вертикальной компоненты магнитного поля. Координатами точки измерения в данном случае являются $x = x_i$, $y = y_i$, $z = 0$. Для определения вторичной

составляющей вертикальной компоненты магнитного поля воспользуемся уравнением Максвелла $B_{az}=(\partial E_{ay}/\partial x-\partial E_{ax}/\partial y)/i\omega$, где

$$E_{ax}(\vec{r}) = -i\omega\mu\sigma_a \sum_N (E_x^{(N)} \int_{v_N} G_{xx}(\vec{r} - \vec{r}') dv_N),$$

$$E_{ay}(\vec{r}) = -i\omega\mu\sigma_a \sum_N (E_y^{(N)} \int_{v_N} G_{yy}(\vec{r} - \vec{r}') dv_N).$$

В результате имеем следующую формулу для величины вертикальной компоненты вторичного магнитного поля:

$$B_{az} = \mu\sigma_a (\sum_N (E_y^{(N)} \int_{v_N} (\partial G_{yy}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial x') dv_N) - \sum_N (E_x^{(N)} \int_{v_N} (\partial G_{xx}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial y') dv_N)).$$

Для получения величины измеряемого сигнала следует просуммировать первичную и вторичную составляющие вертикальной компоненты магнитного поля, т.е. $B_z = B_{zn} + B_{az}$.

На рис. 5 показаны кривые, полученные при профилировании на различных расстояниях от оси объекта. Нарушение монотонности профильных кривых вблизи границы объекта можно объяснить тем, что в этом случае большая часть объекта находится в поле внутренней петли, а на вмещающую среду воздействуют поля внешней и внутренней петель, имеющие противоположные направления.

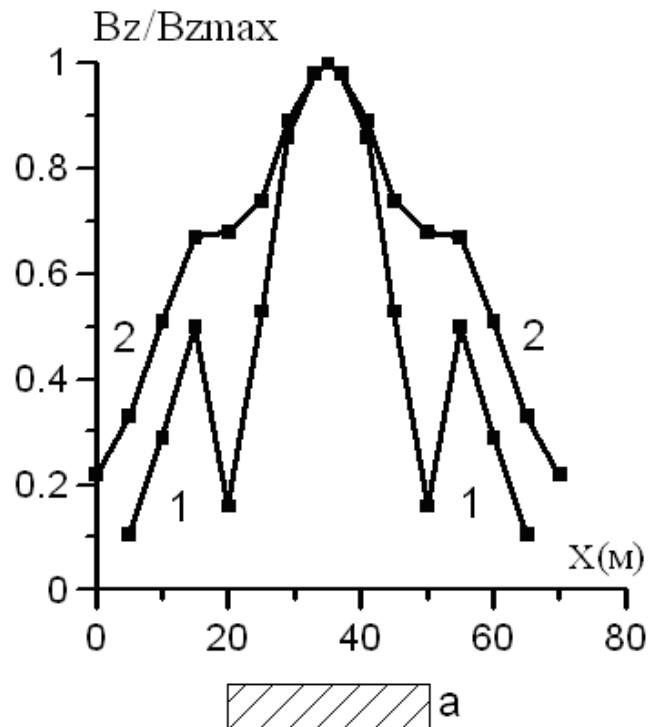


Рис. 5. Профильные кривые над аномальным объектом «а» с размерами 5 м*5 м*30 м, $h=10$ м, $\sigma_n=0.001$ сим/м, $\sigma_a=1$ сим/м, $f=300$ Hz, $R_1=10$ м, $R_2=20$ м (кривая 2: $y_i=0$ м, кривая 1: $y_i=5$ м).

В том случае, когда профиль проходит в стороне от аномального объекта на расстояниях, превышающих размеры объекта, полезную информацию можно получить по измерениям горизонтальных компонент магнитного поля $B_x = -(\partial E_y / \partial z) / i\omega$, $B_y = (\partial E_x / \partial z) / i\omega$, которые вычисляются по формулам

$$B_x = \mu\sigma_a \sum_N E_y(N) \int_{v_N} (\partial G_{yy}(\vec{r} - \vec{r}') / dz') dv_N,$$

$$B_y = -\mu\sigma_a \sum_N E_x(N) \int_{v_N} (\partial G_{xx}(\vec{r} - \vec{r}') / dz') dv_N.$$

Результаты расчетов зависимости горизонтального вектора вторичного магнитного поля по профилю, проложенному в стороне от аномального объекта, показаны на рис. 6. Нетрудно видеть, что по результатам измерений на двух пикетах можно определить положение проекции центра аномального объекта на поверхность земли.

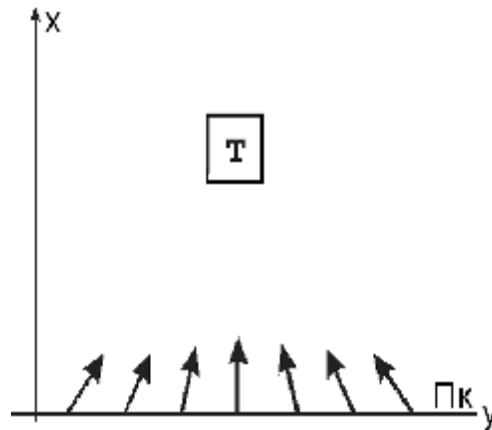


Рис. 6. Профильная зависимость горизонтальной компоненты аномального магнитного поля

Рассмотрим более общий случай, когда в качестве исследуемого объекта используется тонкая аномально проводящая полоса, расположенная в горизонтальной плоскости, причем профилирование производится через середину полосы, т.е. вдоль оси «х». Схема профилирования показана на рис. 7.

При разбиении тонкой пластины на элементарные ячейки можно ограничиться только одним горизонтальным слоем, поэтому в данном приближении объект становится двумерным.

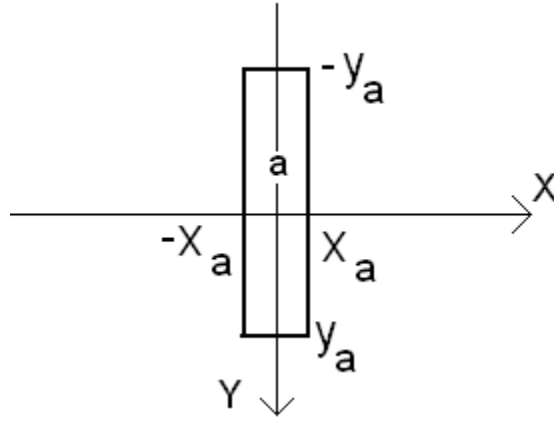


Рис. 7. Схема профилирования над тонкой аномальной полосой

Учитывая двумерность задачи, систему уравнений для компонент индуцированного электрического поля можно записать в виде

$$E_x(N_0) + i\omega\mu\sigma_a \sum_N (E_x(N)C_{xx}(N) + E_y(N)C_{yx}(N)) = E_{nx}(N_0), \quad (1.7)$$

$$E_y(N_0) + i\omega\mu\sigma_a \sum_N (E_x(N)C_{yx}(N) + E_y(N)C_{yy}(N)) = E_{ny}(N_0).$$

Здесь $N_0(x_0, y_0, h)$ обозначает ячейку, для которой определяются компоненты индуцированного электрического поля; координаты этой ячейки есть $x_0 = \Delta_x(m_x - 1.5)$, $y_0 = -y_a + \Delta_y(2m_y - 1)/2$, h -вертикальная координата полосы; m_x , m_y - порядковый номер ячейки вдоль осей «x» и «y» соответственно.

Компоненты первичного электрического поля определяются по формулам $E_{nx}(N_0) = E_{n\phi}(x_i - x_0)/\rho$, $E_{ny}(N_0) = E_{n\phi}y_0/\rho$, $\rho = ((x_i - x_0)^2 + y_0^2)^{0.5}$, x_i -координата точки измерения, $E_{n\phi}$ определяется путем решения уравнения (1.5).

Как и в одномерной задаче, будем определять величину B_{az} с помощью уравнения Максвелла, в результате получаем следующее выражение

$$B_{az} = \mu\sigma_a \left(\sum_N (E_x(N) \int_{v_N} (\partial G_{xy}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial x') dv_N) + \sum_N (E_y(N) \int_{v_N} (\partial G_{yy}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial x') dv_N) - \sum_N (E_x(N) \int_{v_N} (\partial G_{xx}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial y') dv_N) - \sum_N (E_y(N) \int_{v_N} (\partial G_{yx}(\vec{r} - \vec{r}')/\partial y') dv_N) \right).$$

Для получения измеряемого значения вертикальной компоненты магнитной индукции к рассчитанной величине B_{az} следует добавить значение нормального магнитного поля. Характерная профильная кривая приведена на рис. 8.

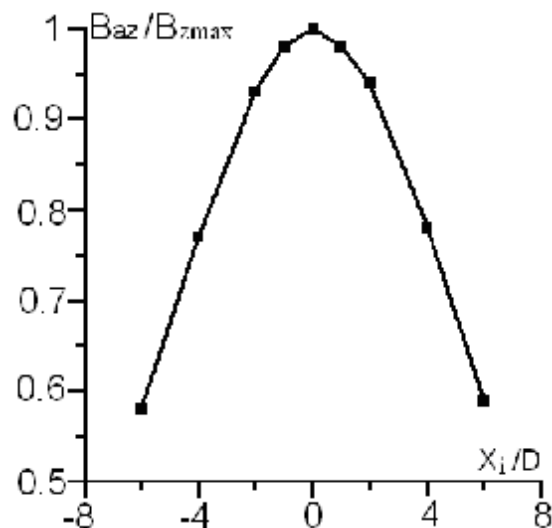


Рис. 8. Зависимость относительной величины B_{az}/B_{zmax} при профилировании над аномальным объектом, B_{az} -модуль вертикальной компоненты магнитного поля, B_{zmax} -максимальное значение модуля магнитного поля на профиле, D -поперечный размер аномального тела.

1. 5. Двухпетлевое частотное зондирование над аномальным объектом

Для упрощения задачи возьмем в качестве модели аномального объекта цилиндр, ось которого совпадает с осью установки. Расположение цилиндра в среде схематично показано на рис. 9.

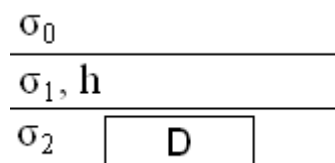


Рис. 9. Схема расположения объекта в среде (D - диаметрального сечение цилиндра)

В такой постановке задача становится азимутально-симметричной, что существенно упрощает решение.

Запишем систему уравнений Максвелла в цилиндрической системе координат при условии $\partial/\partial\varphi=0$.

$$(1/\rho)\partial(\rho E_\varphi)/\partial\rho=i\omega B_z, \quad -\partial E_\varphi/\partial z=i\omega B_\rho, \quad (1.8)$$

$$\partial B_\rho/\partial z - \partial B_z/\partial\rho = \mu(\sigma E_\varphi + j_{\varphi cm}), \quad j_{\varphi cm}=I_0\delta(\rho-R_a)\delta(z+h_0).$$

$$\partial E_\rho/\partial z - \partial E_z/\partial\rho=i\omega B_\varphi, \quad -\partial B_\varphi/\partial z=\mu\sigma E_\rho, \quad (1/\rho)\partial(\rho B_\varphi)/\partial\rho=\mu\sigma E_z. \quad (1.9)$$

Здесь E_φ, B_φ -азимутальные компоненты электрического и магнитного полей, E_ρ, B_ρ и E_z, B_z соответственно радиальные и вертикальные компоненты этих полей, $j_{\varphi cm}$ -плотность тока в источнике, σ и μ -электропроводность и

магнитная проницаемость среды, ω -круговая частота изменения электромагнитного поля, R_α -радиус петли.

Как видно, уравнения Максвелла распадаются в азимутально симметричном случае на две независимые системы уравнений (1. 8) и (1. 9), из которых только одна (1. 8) содержит источник. Таким образом, в рассматриваемой задаче ненулевыми значениями обладают только следующие компоненты электрического и магнитного полей: E_φ, B_z, B_ρ .

Используя систему уравнений (1. 8), нетрудно получить уравнение для азимутальной компоненты электрического поля E_φ :

$$\Delta E_\varphi - E_\varphi/\rho^2 = -i\omega\mu(\sigma E_\varphi + j_{\varphi cm}).$$

Представим E_φ и σ в виде $E_\varphi = E_n + E_a$, $\sigma = \sigma_n + \sigma_a$, где индекс "n" относится к нормальным значениям, а индекс "a" - к аномальным (под σ_n подразумевается электропроводность слоистой среды в отсутствие аномального объекта). Учитывая, что уравнение для нормального электрического поля имеет вид:

$$\Delta E_{n\varphi} - E_{n\varphi}/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_n E_{n\varphi} = -i\omega\mu I_0 \delta(\rho - R_\alpha) \delta(z + h_0), \quad (1. 10)$$

для аномального электрического поля получаем следующее уравнение:

$$\Delta E_a + E_a/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_n E_a = -i\omega\mu\sigma_a (E_a + E_n).$$

Для дальнейших расчетов введем функцию Грина $G(\vec{r} - \vec{r}')$, которая удовлетворяет уравнению $\Delta G - G/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_n G = \delta(z - z')\delta(\rho - \rho')/(2\pi\rho)$, где $\delta(z - z')$ и $\delta(\rho - \rho')$ являются дельта-функциями Дирака.

Учитывая, что при рассматриваемой геометрии задачи величины E_a , $\partial E_a/\partial n$, G , $\partial G/\partial n$ непрерывны на границе аномального объекта ($\partial E_a/\partial n$, $\partial G/\partial n$ - нормальные производные на границе), можно получить интегральное уравнение
$$E_a = -i\omega\mu\sigma_a \int_v G(\vec{r} - \vec{r}') (E_a + E_n) dv,$$

При практических расчетах удобно перейти от уравнения для E_a к уравнению для полного значения электрического поля E_φ , которое имеет вид

$$E_\varphi + i\omega\mu\sigma_a \int_v G(\vec{r} - \vec{r}') E_\varphi(r') dv = E_n. \quad (1. 11)$$

11)

Для нахождения функции Грина необходимо решить систему уравнений

$$\begin{aligned} L_0 G^{(0)}(\vec{r} - \vec{r}') &= 0, \quad L_1 G^{(1)}(\vec{r} - \vec{r}') = 0, \\ L_2 G^{(2)}(\vec{r} - \vec{r}') &= \delta(z - z')\delta(\rho - \rho')/(2\pi\rho), \end{aligned} \quad (1. 12)$$

где оператор L_α имеет вид $L_\alpha = \Delta - 1/\rho^2 + i\omega\mu\sigma_\alpha$, индекс α пробегает значения 0, 1, 2. При решении системы уравнений (1. 12) используется условие непрерывности на границах разреза величин G и $\partial G/\partial n$.

Для решения уравнения (1. 11), где $G(\vec{r} - \vec{r}') = G^{(2)}(\vec{r} - \vec{r}')$, нужно знать нормальное электрическое поле $E_n^{(2)}$ в нижнем слое вмещающего пространства. Величину $E_n^{(2)}$ можно получить, решая уравнение (1. 10) для

рассматриваемой двухслойной среды с учетом условий на границах (непрерывность $E_{n\phi}$ и $\partial E_{n\phi}/\partial z$).

Значения индуцированного в аномальном объекте электрического поля, определенные в результате решения уравнения (1. 11), позволяют определить значение аномального магнитного поля в точке измерения. Для получения алгоритма расчета магнитного поля вне аномального тела подействуем на уравнение (1. 27) оператором $L = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \rho$ и, используя уравнение $(1/\rho)\partial(\rho E_\phi)/\partial \rho = i\omega B_z$, в результате получаем, $B_{az} = -\mu\sigma_a \int_V LG(\vec{r} - \vec{r}')E_\phi(r')dv$,

здесь в подынтегральном выражении необходимо использовать для функции Грина выражение $G(\vec{r} - \vec{r}') = G^{(0)}(\vec{r} - \vec{r}')$ и значения $E_\phi(\vec{r}')$, полученные при решении уравнения (1. 11). Следует заметить, что оператор L действует на переменную ρ , которая содержится только в функции Грина.

Для получения измеряемой величины к рассчитанному значению аномального магнитного поля следует добавить значение нормального магнитного поля, определенного для рассматриваемого разреза.

На рис. 10-11 приведены кривые частотной зависимости кажущихся сопротивлений, построенных на основе реальной части (ρ_ω^r) и модуля (ρ_ω^m) вертикальной компоненты магнитного поля B_z .

На рис. 10 представлены частотные зависимости ρ_ω^r и ρ_ω^m при глубине залегания объекта 200 м, видно, что объект хорошо выделяется по кривой ρ_ω^r , в то же время на кривой ρ_ω^m объект практически не виден. При увеличении глубины до 300 м (рис. 11) в точке измерения ослабевает влияние аномального объекта и начинает сказываться влияние наносов, хотя и имеется небольшой минимум на частоте 156 Гц.

Суммируя полученные результаты можно сделать вывод, что частотное зондирование двухпетлевой установкой позволяет выявлять аномальные объекты на глубинах, соизмеримых с размерами установки. Для сравнения заметим, что для выявления таких же объектов с помощью дипольной установки требуются разности, превышающие глубину залегания аномального тела.

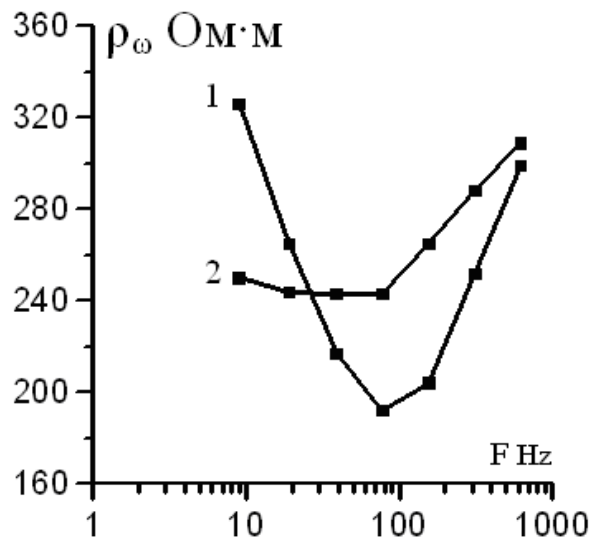


Рис. 10. Частотные зависимости ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^m ; размеры петель $R_1=100$ м, $R_2=200$ м; модель: плоский диск с параметрами $d=10$ м, $R_d=100$ м, $z_a=200$ м, $\sigma_a=6.283$ сим/м в двухслойной среде ($\sigma_1=0.02$ сим/м, $\sigma_2=0.001$ сим/м, $h_1=10$ м).
Кривая 1- ρ_{ω}^r , кривая 2- ρ_{ω}^m .

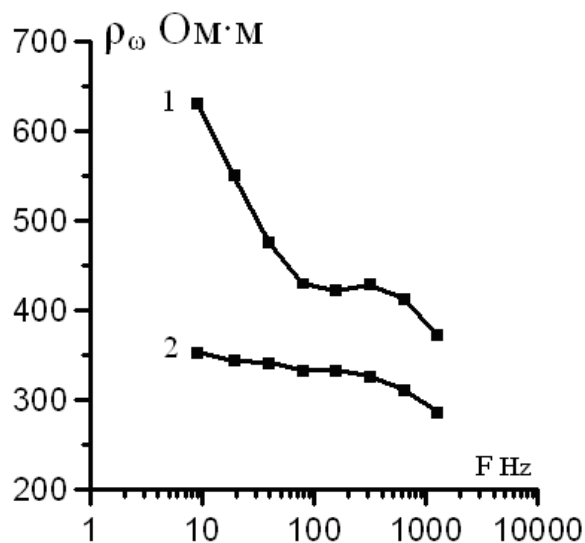


Рис. 11. Частотные зависимости ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^m ; размеры петель $R_1=100$ м, $R_2=200$ м; модель: плоский диск с параметрами $d=10$ м, $R_d=100$ м, $z_a=300$ м, $\sigma_a=6.283$ сим/м в двухслойной среде ($\sigma_1=0.02$ сим/м, $\sigma_2=0.001$ сим/м, $h_1=10$ м).
Кривая 1- ρ_{ω}^r , кривая 2- ρ_{ω}^m .

1. 6. Результаты частотного зондирования на Чусовском месторождении и на Бобровской аномалии

Для экспериментальной проверки возможностей двухпетлевой установки было выбрано Чусовское месторождение, рядом с которым проходит ЛЭП. Измерения производились в двух точках, которые отстояли от ЛЭП соответственно на 150 м и 45 м. Первичное магнитное поле возбуждалось с помощью двух соосных квадратных рамок размерами

100 м×100 м и 51 м×51 м, ток в которых составлял 15 А (на низких частотах) и падал до 1 А на высоких частотах. В эксперименте использовались два комплекта аппаратуры НЧ311 и МЧ311, разработанные А. И. Человечковым в Институте геофизики УрО РАН. Первый комплект имел диапазон частот 4.88 Hz÷5 кHz, второй 300 Hz÷320 кHz. При измерениях на низких частотах отношение сигнал/шум было не хуже 9, на высоких частотах это отношение было много больше. Схема Чусовского месторождения показана на рис. 12. Пк1 находился над вершиной объекта. Пк2 был смещен примерно на 100 м в сторону падения рудного тела. Цифры у кружков на рис. 12 показывают положение буровых скважин.

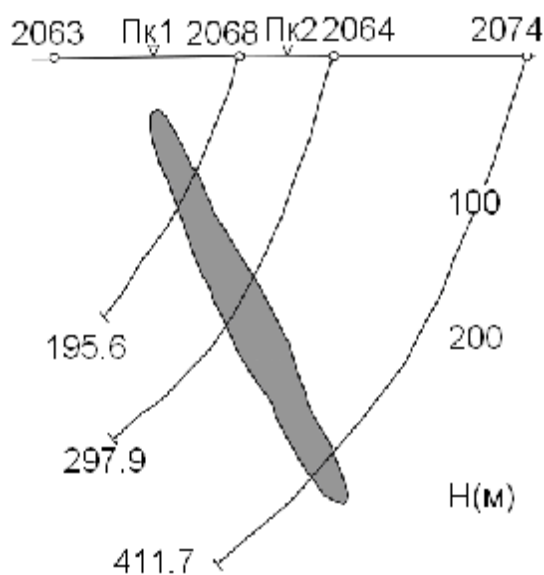


Рис. 12. Схема Чусовского месторождения

По результатам измерений строились кривые частотной зависимости кажущегося сопротивления, которое определялось по отношению B_z/B_s , где B_z -измеряемое вторичное магнитное поле, B_s - значение магнитной индукции при согласном включении рамок, когда магнитные моменты каждой рамки имеют одинаковое направление. Полученное экспериментальное значение величины B_z/B_s далее сравнивалось с расчетным значением этого отношения в случае проводящего полупространства для различных значений величины электропроводности.

На рис. 13 приведены частотные кривые для ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^i , построенные по измерениям на Пк1. На высоких частотах кривые для ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^i ведут себя примерно одинаково, однако ниже частоты 1250 Hz значения ρ_{ω}^r становятся заметно меньше значений ρ_{ω}^i . Уменьшение значений ρ_{ω}^r на низких частотах связано с появлением отклика вторичного магнитного поля, вызванного влиянием рудного тела.

Измерения на Пк 2 (рис. 14) дают похожие частотные зависимости, но частота, после которой кривая ρ_{ω}^r начинает падать, оказывается существенно меньше (312 Hz), что объясняется, очевидно, большей глубиной рудного тела

на Пк 2. Различное поведение кривых ρ_{ω}^r и ρ_{ω}^i свидетельствует о большей чувствительности кажущегося сопротивления, определенного по реальной части аномального магнитного поля, к изменению сопротивления разреза.

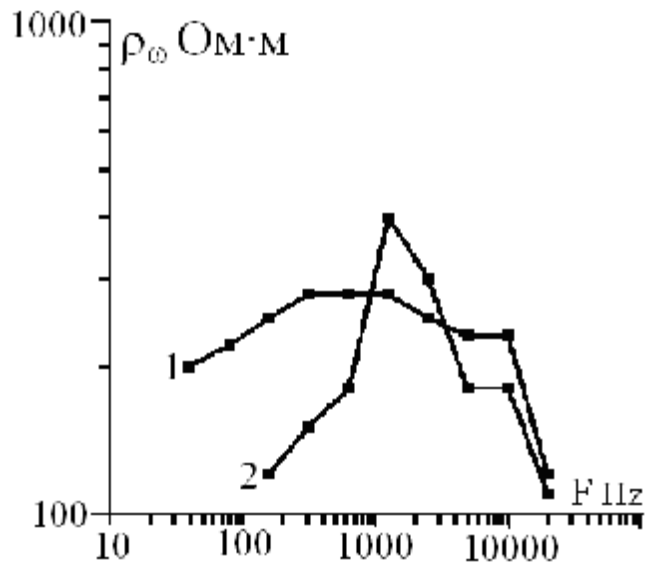


Рис.13. Частотная зависимость кажущихся сопротивлений ρ_{ω}^r (кривая 2) и ρ_{ω}^i (кривая 1) на пикете 1 Чусовского месторождения

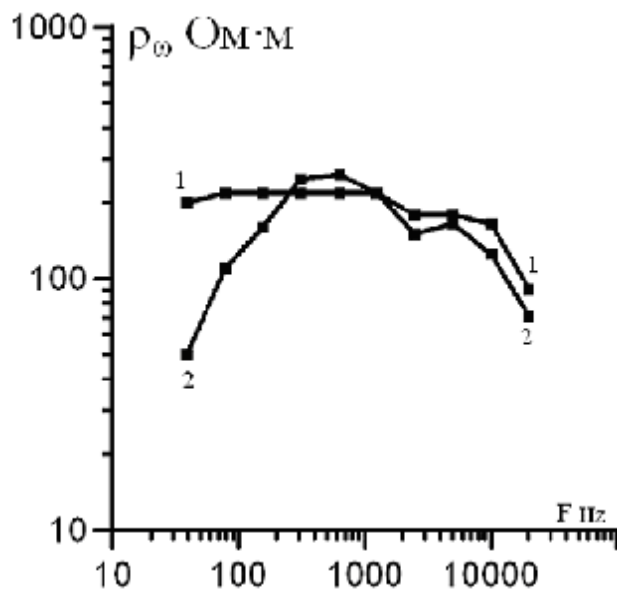


Рис. 14. Частотная зависимость кажущихся сопротивлений ρ_{ω}^r (кривая 2) и ρ_{ω}^i (кривая 1) на пикете 2 Чусовского месторождения

Из рис. 14 следует, что частотная зависимость, построенная по мнимой части аномального магнитного поля, практически не “чувствует” рудного тела, находящегося на глубине порядка 200 м.

По результатам индукционных зондирований обычно строят частотную зависимость кажущегося сопротивления, определяемого по модулю измеряемого магнитного поля. Учитывая, что на низких частотах (меньше 1000 гц) реальная составляющая измеряемого магнитного поля много меньше мнимой, выводы относительно низкой чувствительности кривой ρ_{ω}^i могут быть отнесены также к кривым ρ_{ω}^m , построенным по модулю магнитного поля.

Глава 2. (Исследование методических вопросов применения дифференциальной индукционной установки в электроразведке)

2. 1 Описание установки

В предыдущей главе рассматривался метод уменьшения в измеряемом сигнале доли первичного магнитного поля по сравнению с аномальной составляющей. Однако в электроразведке известен дифференциальный метод, который позволяет полностью исключить не только первичное, но и нормальное поле из измеряемого сигнала. На постоянном токе этот метод, в частности, может быть реализован с помощью известной установки МАН. На переменном токе дифференциальный метод изучен значительно меньше. Известны лишь работы Светова Б. С., Родионова А. Н. , Сапужака Я. С., в которых дифференциальная индукционная методика изучалась применительно к МПП. В работах Рыхлинского Н. И. дифференциальная методика применялась при зондировании методом становления поля.

В данной работе изучается дифференциальная установка с одним датчиком и двумя вертикальными противоположно направленными магнитными моментами. Такая конструкция установки позволяет сосредоточить почти все возбуждаемое магнитное поле между генераторными петлями, вне генераторных петель поле достаточно быстро затухает в пространстве.

Отличительным признаком дифференциальной установки является координатная зависимость (по переменной x на рис. 15) вертикальной составляющей первичного магнитного поля, аналогичная представленной на рис. 16. Для этой зависимости характерно положение датчика в точке с нулевым значением первичного поля.

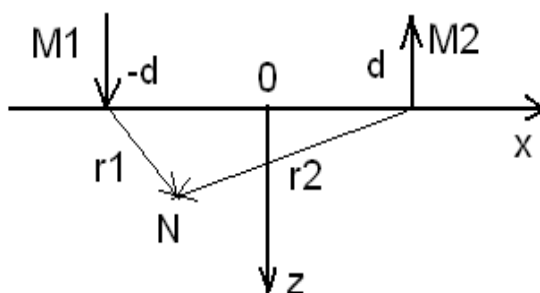


Рис. 15. Схема дифференциальной установки

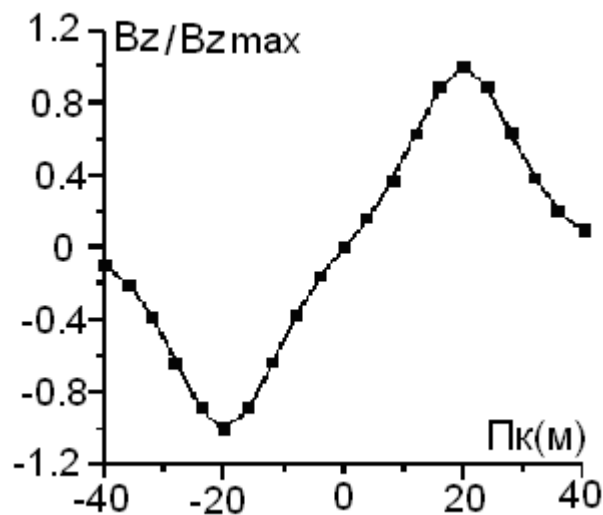


Рис. 16. Координатная зависимость вертикальной составляющей первичного магнитного поля дифференциальной установки

По обе стороны от датчика первичное поле в каждый момент времени имеет разные знаки, поэтому вторичное поле будет также отличаться знаком. В датчике эти поля алгебраически суммируются, поэтому при наличии градиента сопротивления в точке измерения приемник покажет ненулевые значения.

2. 2 Профилирование с помощью дифференциальной установки

Особенность дифференциальной установки состоит в том, что с ее помощью можно изучать изменение сопротивления разреза по профилю.

На рис. 17 показана расчетная кривая профилирования над прямоугольным параллелепипедом, где представлена зависимость модуля измеряемого сигнала от положения датчика относительно середины тела. Как и следовало ожидать, кривая имеет максимум, когда датчик находится над кромкой аномального объекта. Когда датчик расположен в центре (т.е. симметрично относительно границ), измеряемый сигнал всегда равен нулю. При расчете профильных кривых, приведенных на рис. 17, использовалась та же методика, что и при расчете профильных кривых, полученных с помощью двухпетлевой установки.

На рис. 17 приведены профильные кривые, полученные при профилировании над осью прямоугольного параллелепипеда ($y_i=0$) и в стороне от него ($y_i=3$ м).

Упомянутые выше свойства дифференциальных профильных кривых позволяют с успехом использовать дифференциальное профилирование для определения положения вертикальных границ аномального объекта.

На рис. 18 приведена дифференциальная профильная кривая, полученная на Мишеляжском профиле (ПО “Маяк”), на которой хорошо видны границы аномальной зоны. Как правило, сравнение результатов вертикального зондирования, сделанного вблизи границы аномального объекта, с соответствующей дифференциальной профильной кривой,

позволяет сделать вывод, что дифференциальное профилирование более надежно фиксирует границу неоднородной зоны. Это объясняется тем, что интерпретация данных вертикального зондирования производится в предположении горизонтальной однородности среды, в то время как кривая дифференциального профилирования построена по экспериментальным данным.

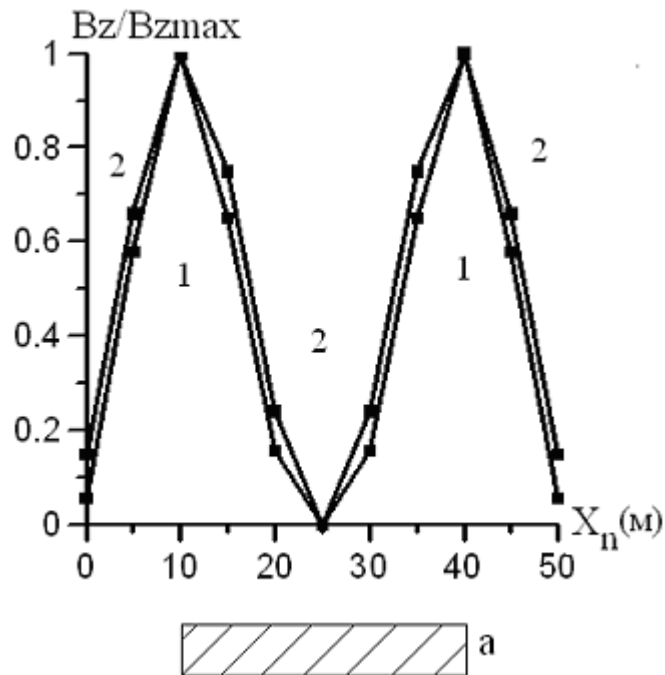


Рис. 17. Профильные кривые над проводящим аномальным объектом «а», имеющим форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $5\text{м} \times 5\text{м} \times 30\text{м}$, $h=10\text{ м}$, $\sigma_n=0.02\text{ сим/м}$, $\sigma_a=0.02\text{ сим/м}$, $f=10000\text{ Hz}$, $d=15\text{ м}$ (кривая 1: $y_i=0\text{ м}$, кривая 2: $y_i=3\text{ м}$)

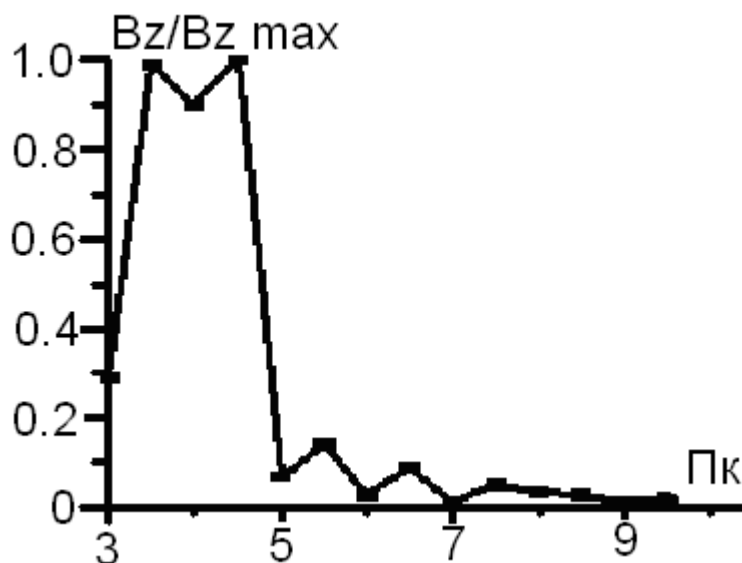


Рис. 18. Результаты дифференциального профилирования
(Мишелякский профиль, $d=20\text{м}$, $F=40\text{ kHz}$, шаг измерений 20 м)

При профилировании с использованием установок вертикального зондирования аномальный объект обнаруживается только тогда, когда профиль пройдет непосредственно над искомым объектом. Чтобы не пропустить возможную аномалию, приходится исследуемую территорию покрывать частой сетью профилей. Применение при профилировании дифференциальной установки позволяет существенно уменьшить количество профилей, необходимое для обнаружения аномального объекта. На рис. 19 схематически представлены результаты решения задачи, в которой точка измерения находится в стороне от тела, а источники последовательно перемещаются по окружности с центром в точке измерения. Как видно из рис. 19, максимальное значение аномального поля принимает тогда, когда источники находятся на прямой, проходящей через центр аномального объекта.

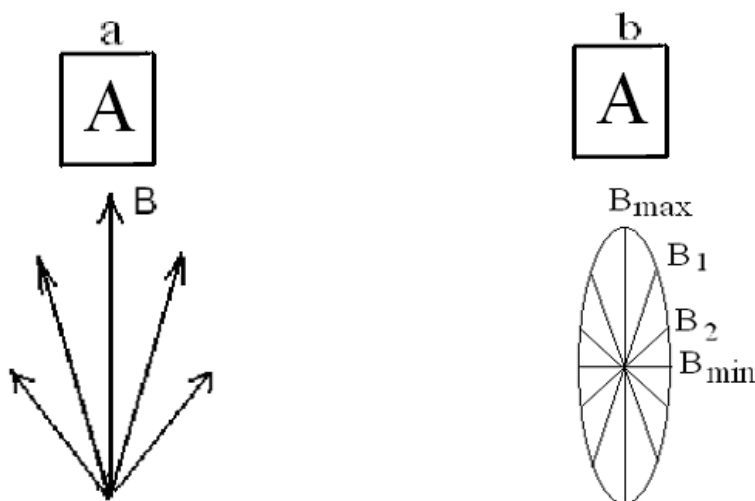


Рис. 19. Азимутальная зависимость аномального поля при измерениях в стороне от аномального объекта («а» при измерениях с определением реальной и мнимой частей аномального магнитного поля, «б» при модульных измерениях)

2.3 Вертикальное дистанционное зондирование с помощью дифференциальной установки

Помимо профилирования дифференциальная установка может быть использована для зондирования, т.е. измерения производятся в одной точке, но с различными разносами. Естественно проводить зондирование над краем аномального тела, где сигнал максимален и где заведомо неприменимы методы, основанные на предположении горизонтальной однородности среды. На рис. 20 показаны кривые зондирования с помощью дифференциальной установки при различных расстояниях от точки измерения до поверхности аномального объекта. Наиболее информативными на этих кривых являются точки, где кривые достигают максимума. В этом случае значение глубины

залегания слабо зависит от величины аномальной электропроводности. Физическое обоснование рассматриваемого метода имеет сходные черты с методом ВЭЗ. При малых разносах большая часть силовых линий проходит над аномальным объектом. По мере увеличения разноса силовые линии аномального поля проникают в аномальный объект, в результате чего сигнал растет. При дальнейшем увеличении разноса, когда он начинает превышать размеры объекта, сигнал начинает уменьшаться, т.к. уменьшается отличие средней электропроводности сред, возбуждаемых источниками М1 и М2. Следует также заметить, что этот метод не должен использоваться в тех случаях, когда глубина тела превышает его поперечные размеры.

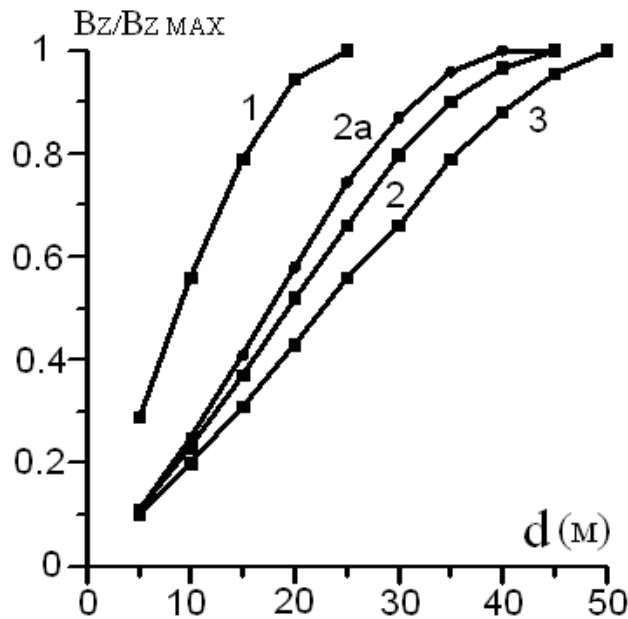


Рис. 20. Кривые дистанционного вертикального зондирования над краем аномального объекта ($f=10$ кгц, размеры аномального объекта $50 \text{ м} \times 20 \text{ м} \times 10 \text{ м}$; $\sigma_n=0$, $\sigma_a=0.1$ сим/м, 1- $z_0=10$ м, 2- $z_0=20$ м, 3- $z_0=30$ м, 2a- $z_0=20$ м, $\sigma_a=1$. сим/м, z_0 -расстояние до верхней кромки аномального объекта)

Глава 3. («Квадрупольная» установка для вертикального индукционного зондирования)

Предлагаемая установка состоит из двух магнитных «квадруполей», имеющих общий центр в точке «О», где находится датчик измерительного прибора. Термин «квадруполь» в данном случае является условным, так как в электродинамике квадруполем называют два равных по величине и противоположно направленных магнитных момента, расстояние между которыми бесконечно мало. Магнитные моменты располагаются на одной линии симметрично относительно центра установки на расстояниях d_1 и d_2 , как показано на рис. 16. В дальнейшем эта установка будет именоваться как «квадрупольная» установка (КУ).

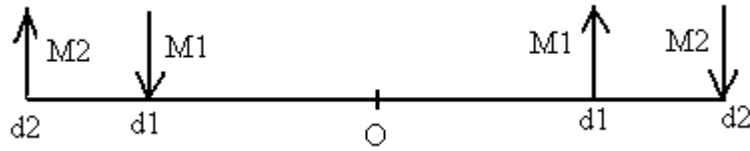


Рис. 21. Схема «квадрупольной» установки

При измерении горизонтальной компоненты магнитного поля КУ может быть использована для вертикального зондирования среды. Самым ценным качеством КУ является возможность компенсировать в точке измерения магнитное поле, возбуждаемое верхними слоями. Наиболее просто это можно проиллюстрировать на низких частотах. Рассмотрим низкочастотное приближение для горизонтальной компоненты магнитного поля, измеряемого в центре установки (для конкретности возьмем трехслойный разрез). Если параметры установки удовлетворяют соотношению $\frac{M1}{d1} = \frac{M2}{d2}$, то выражение для горизонтальной компоненты имеет следующий вид

$$B_r = -\frac{i\omega\mu^2 M1}{8\pi d1} \left\{ \sigma_1 \left(\frac{2h_0}{((2h_0)^2 + d1^2)^{0.5}} - \frac{2h_0}{((2h_0)^2 + d2^2)^{0.5}} \right) + \right. \\ (\sigma_2 - \sigma_1) \left(\frac{2h_1}{((2h_1)^2 + d1^2)^{0.5}} - \frac{2h_1}{((2h_1)^2 + d2^2)^{0.5}} \right) + \\ \left. (\sigma_3 - \sigma_2) \left(\frac{2h_{12}}{((2h_{12})^2 + d1^2)^{0.5}} - \frac{2h_{12}}{((2h_{12})^2 + d2^2)^{0.5}} \right) \right\},$$

здесь h_0 - вертикальная координата датчика и источника, h_1, h_2 -мощности первого и второго слоя, $h_{12} = h_1 + h_2$. На практике отношение $2h_0/d1 < 0.01$, в результате чего влияние верхнего слоя разреза на результаты измерений оказывается ослабленным более чем в сто раз. Таким образом, рассматриваемую индукционную установку можно эффективно использовать в ситуациях, когда верхний слой разреза обладает пониженным сопротивлением. В этом случае уменьшение в измеряемом сигнале вторичного магнитного поля, генерируемого в верхнем слое разреза, приводит к относительному увеличению доли сигнала, генерируемого изучаемым объектом, т.е. чувствительность КУ оказывается выше по сравнению с установками, в которых отсутствует ослабление экранирующего влияния верхнего слоя. Ниже рассматривается пример использования КУ при частотном зондировании.

На рис. 17 приведена частотная зависимость (кривая 1) для разреза $\rho_1 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_1 = 40 \text{ м}$, $\rho_2 = 30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $h_2 = 50 \text{ м}$, $\rho_3 = 8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($d_1 = 40 \text{ м}$, $d_2 = 1.2 d_1$); кривая 2 построена для разреза, у которого $\rho_1 = \rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Особенность данного разреза состоит в том, что водоносный горизонт является более высокоомным по сравнению с сопротивлением верхнего слоя, однако возможность с помощью «квадрупольной» установки уменьшать влияние

верхнего слоя на измеряемый сигнал позволяет достаточно уверенно выделять этот слой.

Рассмотрим более сложный разрез, в котором экранирующий слой не является верхним слоем. На рис. 18 показана для подобного разреза частотная зависимость ρ_{ω}^r . Нетрудно видеть, что на приведенной кривой хорошо выделяются слои рассматриваемого разреза, обладающие пониженным сопротивлением: на частотах, меньших 5 кГц, имеется минимум сопротивления, соответствующий слою 4, а второй слой выделяется на частотах 6 кГц ÷ 160 кГц.

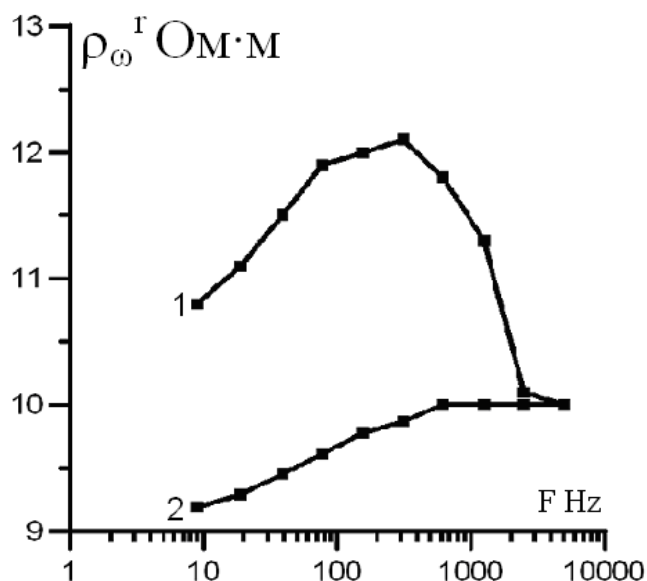


Рис. 22. Частотная зависимость кажущегося сопротивления разреза, характерного для востока Курганской области

Аналогичные расчеты, проделанные для этого разреза с применением дипольной и двухпетлевой установок, показывают, что с их помощью выделяется только верхний слой пониженного сопротивления.

При использовании «квадрупольной» и двухпетлевой установок всегда следует учитывать, что повышенная чувствительность этих установок реализуется только при параметрах поля $p=(\omega\mu\sigma L^2)^{0.5}$, меньших единицы (L -характерный размер установки).

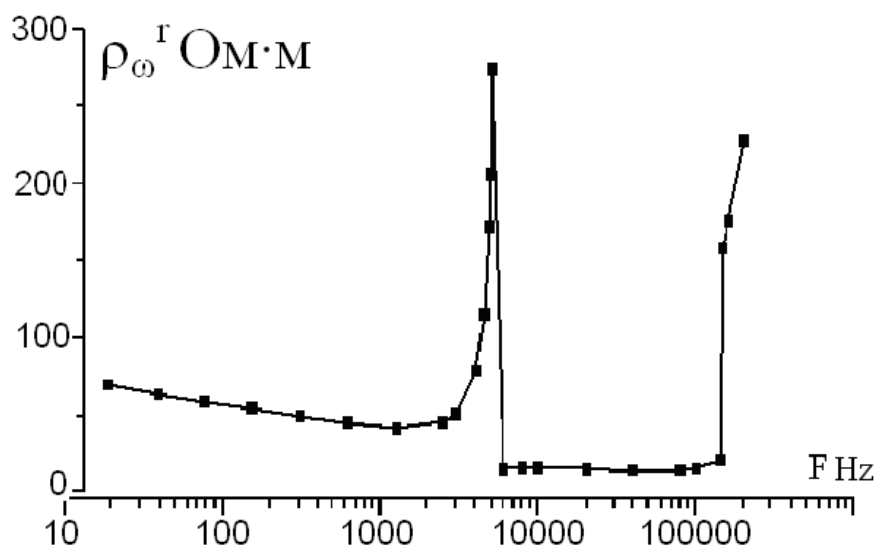


Рис. 23. Частотная зависимость ρ_{ω}^r для разреза с параметрами $\rho_1=100$ Ом·м, $h_1=1.8$ м, $\rho_2=10$ Ом·м, $h_2=9.8$ м, $\rho_3=200$ Ом·м, $h_3=30$ м, $\rho_4=20$ Ом·м, $h_4=10$ м, $\rho_5=500$ Ом·м, полученная с помощью «квадрупольной установки» ($d_1=41.6$ м)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В завершение работы целесообразно подчеркнуть основные результаты:

1) показана эффективность вертикальной фокусировки первичного или (для «квадрупольной» установки) нормального магнитного поля с последующим анализом частотной зависимости кажущегося сопротивления, определяемого по реальной части измеряемого магнитного поля;

2) с целью увеличения чувствительности измерений могут быть рекомендованы три измерительные установки: двухпетлевая, «квадрупольная» и дифференциальная. При изучении этих установок были получены следующие результаты:

а. Двухпетлевая установка:

разработан метод прецизионной компенсации первичного магнитного поля в точке измерений;

предложен метод определения параметров горизонтально слоистой среды; решена задача профилирования и частотного зондирования над аномальным объектом; исследованы профильные кривые, проходящие над объектом и в стороне от него; показано, что по измерениям горизонтальных компонент аномального магнитного поля на профиле, проходящем в стороне от аномального объекта, можно определить положение центра проекции искомого аномального объекта на поверхность Земли.

б. Дифференциальная индукционная установка:

при профилировании над аномальным объектом позволяет непосредственно по экспериментальным данным определить положение вертикальных границ аномального объекта; при профилировании в стороне от аномального объекта позволяет по измеренным в разных точках на профиле ориентациям

оси установки в момент максимума измеряемого магнитного поля определять положение центра проекции аномального объекта на дневную поверхность; позволяет проводить дистанционное зондирование в точке, где профильная кривая имеет экстремум, что дает возможность оценить расстояние до верхней кромки объекта.

с. «Квадрупольная» установка:

показано, что при определенных соотношениях магнитных моментов «квадруполей» и разносов можно существенно уменьшить экранирующее влияние верхних низкоомных слоев разреза.

Сведения о публикациях

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в следующих работах:

1) Улитин Р. В., Чистосердов Б. М., Федорова О. И. Геоэлектрическая дефектоскопия гидротехнических сооружений дифференциальными индукционными установками. // «Дефектоскопия», 2007 г., №7, с. 91-96.

2) Человечков А. И., Чистосердов Б. М., Байдилов С. В. Использование индукционной двухпетлевой установки при частотном зондировании аномальных объектов. // Геология и геофизика, 2008 г., т. 49, №8, с. 830-836.

3) Чистосердов Б. М. Патент № 2310214, класс G 01 V 3/8. Способ вертикального индукционного зондирования. БИ №31, 2007 г., 5 с.

4) Человечков А. И., Чистосердов Б. М. Патент № 2156987 (Россия). Способ индукционного вертикального зондирования. Патент G 01 V 3/08. Бюл. № 27, 2000 г., 8 с.

5) Чистосердов Б. М., Человечков А. И., Байдилов С. В. Патент № 2230341, класс G 01 V 3/8. Способ индукционного вертикального зондирования. БИ №16, 2004 г., 8 с.

6) Человечков А. И., Чистосердов Б. М. Патент № 2207595, G 01 V 3/8. Способ определения глубины залегания рудного тела. БИ № 18, 2001 г., 10 с.

7) Чистосердов Б. М. Использование двухпетлевого возбуждения поля при индукционном зондировании земли. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 26-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Екатеринбург, 1999 г.

8) Чистосердов Б. М. Особенности дистанционного зондирования с применением двух квадрупольей, Деп. в ВИНТИ, № 1396-В99. 9 с.

9) Чистосердов Б. М. Методика определения параметров разреза, содержащего тонкий проводящий слой. Теория и практика геоэлектрических исследований. Вып. 2. Екатеринбург. УрО РАН, 2000 г., с. 80-83.

10) Чистосердов Б. М. Использование индукционной дифференциальной установки для определения глубины залегания рудного тела. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 29-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. Екатеринбург, 2002 г., с. 91-93.

11) Чистосердов Б. М., Человечков А. И., Байдилов С. В. Способ индукционного вертикального зондирования. Вторые научные чтения Ю. П. Булашевича 25-27 июня 2003 г., с. 126.

12) Чистосердов Б. М. Метод определения параметров двух-и трехслойной горизонтально слоистой среды при индукционном вертикальном зондировании, Деп. в ВИНТИ, № 1174-B2003. 10 с.

13) Чистосердов Б. М. Использование фазочувствительных измерений при решении обратной задачи для горизонтально слоистых сред. Вторые научные чтения Ю.П.Булашевича 25-27 июня, Екатеринбург 2003 г., с. 127.

14) Чистосердов Б. М., Человечков А. И., Байдилов С. В. Способ индукционного вертикального зондирования, Уральский геофизический вестник № 6, 2004 г., с. 112-115.

15) Чистосердов Б. М. Использование фазочувствительных измерений при решении обратной задачи для горизонтально слоистых сред, Уральский геофизический вестник № 7, 2005 г., с. 74-78.

16) Чистосердов Б. М., Человечков А. И., Байдилов С. В. Индукционное вертикальное зондирование и профилирование с использованием двухпетлевой установки. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 32-й сессии Международного семинара им.Д. Г. Успенского. Пермь, 2005 г., с. 285-288.

17) Чистосердов Б. М. Частотное зондирование над аномальным объектом с использованием двухпетлевой установки. Деп. в ВИНТИ, № 316-B2005. 10 с.

18) Чистосердов Б. М. Частотное зондирование и профилирование над аномальным объектом с использованием двухпетлевой установки. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 33-й сессии Международного семинара им.Д. Г. Успенского. Екатеринбург, 2006 г., с. 417-421.

19) Чистосердов Б. М. Компенсационная установка для вертикального индукционного зондирования. Деп. в ВИНТИ, № 1151-B2006. 12. с.

20) Чистосердов Б. М. «Квадрупольная» установка для вертикального индукционного зондирования. Четвертые научные чтения Ю. П. Булашевича 02-06 июля, Екатеринбург 2007 г., с. 202.

21) Чистосердов Б. М. Исследование компенсационных установок при индукционном зондировании и профилировании аномальных объектов.// Деп. в ВИНТИ, № 565-B2008. 33 с.