

# **Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель»**

*Андреева Е.В.<sup>2</sup>, Бобачев А.А.<sup>1</sup>, Варенцов Ив.М.<sup>3</sup>, Верещагина М.П.<sup>1</sup>,  
Куликов В.А.<sup>1</sup>, Яковлев А.Г.<sup>2</sup>, Яковлев Д.В.<sup>2</sup>.*

<sup>1</sup> *Московский Государственный Университет, Геологический факультет*

<sup>2</sup> *ООО «Северо-Запад»*

<sup>3</sup> *ЦГЭМИ ИФЗ РАН*

## **Введение**

Месторождения медно-никелевых руд представляют весьма разнообразный и сложный геолого-геофизический объект. Они характеризуются разнообразным составом руд, существенной зависимостью их физических свойств от происхождения и концентрации, резко различными формами и условиями залегания рудных тел, наличием аномалиеобразующих тел другой природы, неоднородностью вмещающих пород и целым рядом прочих существенных факторов. Во многих районах наблюдается резко меняющаяся мощность наносов и пересеченный рельеф.

В сложной геофизической обстановке получить удовлетворительное решение поисковой задачи каким-либо одним методом, как правило, оказывается невозможным. Задача рационального комплексирования заключается в подборе методов, обладающих специфической чувствительностью к тем или иным свойствам среды, важным для решения поставленной задачи, хорошо дополняющих друг друга, обеспечивающих в итоге надежную геологическую интерпретацию комплекса геофизических съемок и приемлемую стоимость работ. Необходим строгий отбор геофизических методов в условиях решаемой геологической задачи и их максимально эффективная реализация. Неоправданное нагромождение недостаточно отработанных методов также вредно, как и пренебрежение их комплексированием.

При поисках и разведке медно-никелевых руд, как правило, используются методы магниторазведки, гравиразведки, электроразведки (ВП и МПП), малоглубинной сейсморазведки и скважинной геофизики [Mining geophysics, 1966; Бродовой, 1984, 1990; Межу, 2002]. На региональном этапе поисковых работ чрезвычайно эффективно использовать комплексные аэрогеофизические наблюдения. В настоящей работе рассматривается комплекс наземных геофизических методов, который уже использовался ООО «Северо-Запад» при поисках сульфидного медно-никелевого оруденения на объектах ГМК «Норильский Никель».

Отличительные особенности комплекса являются:

- широкомасштабного применения магнитотеллурических (МТ) методов в самых современных модификациях для объемной характеристики геоэлектрической среды и эффективного выявления важнейших проводящих структур до глубин в первые км даже при наличии проводящих/непроводящих экранов и резких приповерхностных неоднородностей;

- использования метода зондирования на постоянном токе в современной модификации электротомографии, обеспечивающей повышенную детальность изучения разреза;

- детального и тонкого приложения метода вызванной поляризации (ВП) в многоканальной модификации ИНФАЗ-ВП в широком диапазоне частот с целью выявления объектов аномальной поляризуемости, их детализации и классификации;

- проведения геомагнитной съемки в двухуровневой модификации с измерением полного вектора аномального магнитного поля и его вертикального градиента.

Ниже будут рассмотрены принципиальные методические, аппаратные, технологические и интерпретационные аспекты перечисленных методов, а затем продемонстрированы результаты их совместного применения на двух разведочных площадях: Цагинской на Кольском полуострове и Черногорской в Норильском регионе.

## **1. Магнитотеллурический метод**

Принципиальные возможности метода магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и современные тенденции повышения его эффективности в сложно построенных регионах и областях с высоким уровнем промышленных шумов обсуждаются в работе [Варенцов, 2006]. В рудной геофизике в зависимости от эффективного электрического сопротивления вмещающей среды и требуемой глубинности исследования, этот метод применяется как в стандартной широкополосной модификации, так и в более высокочастотном аудио-МТ (АМТ) варианте. Метод МТЗ широко используется в геофизике на протяжении более сорока лет. В то же время, его высокочастотная модификация – метод АМТЗ - появилась и утвердилась в рудной геофизике относительно недавно.

Магнитотеллурический метод отличается от других методов электроразведки высокой глубинностью, небольшой стоимостью работ и портативностью используемой аппаратуры. Это обусловлено тем, что в методе МТЗ используется естественное электромагнитное (ЭМ) поле и, следовательно, не требуется применения громоздких

генераторных установок. В настоящее время метод МТЗ, по сравнению с другими электроразведочными методами, имеет наиболее разработанный аппарат анализа и интерпретации данных, в том числе и для сложно построенных трехмерно-неоднородных сред. Недостатком метода МТЗ является чувствительность к техногенным ЭМ помехам. Эта проблема во-многом решается с использованием современной аппаратуры и методики обработки данных на основе проведения синхронных наблюдений как в полевых (на площади работ), так и в удаленных (базовых) точках, расположенных на достаточном расстоянии от доминирующих на исследуемой площади источников промышленных помех.

Метод АМТЗ имеет ряд преимуществ по сравнению с классическим МТЗ. Прежде всего, резко сокращается время проведения измерений ЭМ полей на точке наблюдения. Если классическое МТЗ предполагает длительность регистрации ЭМ поля порядка суток (не менее 6-7 часов), то в случае АМТЗ время наблюдения составляет 20-30 минут. Этим обеспечивается высокая производительность - до 10-15 точек в день на одну станцию и возможность оперативного проведения детальных площадных исследований.

Повышенная точность регистрации вертикальной магнитной составляющей поля позволяет определять значения типпера и векторов индукции с абсолютной погрешностью в первые сотые доли единицы. Анализ поведения индукционных векторов способствует существенному повышению качества интерпретации МТ-данных [Варенцов, 2006], не требуя при этом существенных дополнительных затрат.

### **1.1. Методика АМТЗ**

Метод АМТЗ предполагает регистрацию ЭМ поля в диапазоне частот от 10 КГц до первых Гц. К сожалению, существует область низкой интенсивности в его спектре поля в диапазоне частот 1-4 КГц. Наблюдения в этом частотном диапазоне можно восполнить, регистрируя поля удаленных искусственных источников – как контролируемых, так и неконтролируемых.

В настоящее время большая часть работ методом АМТЗ выполняется с использованием станций MTU-5A производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics» (рис. 1). Как правило, во время проведения полевых работ на одном участке используется несколько измерительных модулей MTU-5A. Регистрация в полевых точках проводится синхронно с регистрацией на базовой точке, что позволяет повысить точность получаемых при обработке магнитотеллурических передаточных функций - при

синхронной обработке подавляются шумы, некоррелируемые между рядовой и базовой точками [Варенцов, 2006].

В каждой точке производится регистрация пяти компонент ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) МТ поля. Компоненты электрического поля измеряются с помощью пятиэлектродной крестообразной установки, состоящей из электрических диполей длиной 30-40 м. Центральный электрод используется для подавления аппаратурных шумов. В качестве заземлений можно использовать как специальные неполяризующиеся, так и латунные электроды (что, кстати, невозможно при низкочастотных наблюдениях в классическом МТЗ). Компоненты магнитного поля измеряются с помощью индукционных датчиков. Датчики электрического и магнитного полей в отсутствие ярких двумерных структур ориентируются по магнитному меридиану и перпендикулярно ему (азимуты  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , соответственно). В случае, когда по априорным данным известно, что исследуемый участок характеризуется двумерной тектоникой, датчики поля ориентируются вдоль и поперек основных направлений простирания геологических структур. Ветровые помехи устраняются путем прикапывания электрических диполей и размещения индукционных датчиков в канавах.

## **1.2. Станция MTU-5A**

Эффективным и универсальным инструментом для проведения работ методом МТЗ/АМТЗ является пятиканальная станция MTU-5A производства фирмы “Феникс” (Канада). В станции используется 24-разрядный АЦП, что позволяет существенно сократить аналоговую часть измерителя. Станция управляется встроенным специализированным компьютером на базе процессора Intel386, выполненным в стандарте PC110. Имеется оперативная память (16 КБ), ПЗУ (5 МБ) и съемная флэш-карта (96 МБ). В ПЗУ записана операционная система, управляющая программа, данные калибровки датчиков поля. Станция не имеет клавиатуры и дисплея. Оператор управляет станцией при помощи компьютера, создавая стартовую таблицу с настройками работы и записывая ее на флэш-карту станции. Регистрация проводится в автономном режиме без участия оператора. После ее окончания данные через считывающее устройство для флэш-карт переносятся в компьютер для дальнейшей обработки и интерпретации. Вес измерительного модуля составляет 7 кг.

Станция MTU-5A одновременно ведет запись на трех частотах дискретизации: 150, 2400 и 24000 Гц в режиме АМТЗ и на частотах 15, 150 и 2400 Гц в режиме МТЗ. Регистрация с наименьшей из частот дискретизации ведется непрерывно, в то время как более высокие частоты дискретизации используются для оцифровки отдельных

фрагментов регистрируемого сигнала. Для каждой записи поля определяется дата измерения и время, а также координаты точки наблюдения. Точное время и координаты определяются станцией с помощью встроенной GPS-системы.

### **1.3. Обработка и интерпретация данных АМТЗ/МТЗ**

Для обработки данных, полученных со станцией MTU-5A, используется фирменное программное обеспечение, основанное на корреляционном методе. В нем рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразование, в результате чего получаются спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса.

Помимо записей, сделанных в текущей (рядовой) точке наблюдения, в обработку вовлекаются записи двух компонент поля (обычно горизонтальных магнитных), выполненные на удаленной (базовой) точке. Обработка направлена на подавление некоррелируемой между этими точками составляющей данных, которая в основном обусловлена влиянием помех. Таким образом, при синхронных наблюдениях с удаленной базой помехозащищенность определения компонент тензора импеданса и других передаточных функций существенно повышается.

Интерпретация данных включает следующие основные этапы [Бердичевский и др., 1997; Новожиновский, Пушкарев, 2001; Варенцов, 2006]: подавление влияния приповерхностных неоднородностей; анализ данных с целью определения размерности интерпретационной модели; решение обратной задачи методом подбора в классе одномерных и/или двумерных геоэлектрических моделей; трехмерное моделирование с целью оценки достоверности выполненной интерпретации.

## **2. Методы сопротивлений и вызванной поляризации**

Метод вызванной поляризации является одним из основных методов рудной геофизики [Комаров, 1980]. Работы методом ВП одновременно предполагают и получение информации об удельном сопротивлении среды. Таким образом, можно говорить о комплексе метода вызванной поляризации и метода сопротивлений.

Для изучения поляризуемости горных пород компанией «Северо-Запад» используется методика измерений ВП в частотной области. Наиболее эффективными являются фазовые измерения вызванной поляризации по технологии ИНФАЗ-ВП. Использование этой технологии позволяет уйти от синхронизации измерительного и генераторного устройств. Использование методики ИНФАЗ существенно повышает

помехоустойчивость метода ВП, а использование различных частот позволяет разделить аномалии ВП по их частотным характеристикам [Куликов, 1985].

По результатам больших объемов лабораторных наблюдений на образцах [Куликов, 1985] была получена экспериментальная связь фазы ВП с кажущейся поляризуемостью, полученной в импульсном режиме на задержке 0.5 с:

$$\eta_k (\%) = - 2.5 \varphi_{ВП} (\text{градусы}).$$

На практике, фазовый угол вызванной поляризации рассчитывают с помощью дифференциального фазового параметра, определяемого по значениям фазовых углов двух гармоник (как правило, первой и третьей) сигнала типа “меандр”, создаваемого генераторной установкой.

Существенной проблемой при измерениях ВП является разделение поляризационных и индукционных эффектов. Так, при измерениях во временной области при выключении тока в течение некоторого времени происходит становление ЭМ поля в среде. Аналогично, в частотной области значения амплитуд и фаз сигнала на разных сравнительно высоких частотах могут различаться за счет ЭМ индукции. Таким образом, на определенных временах задержки (либо на определенных частотах) наблюдается суперпозиция поляризационных и индукционных эффектов. Замечательной особенностью дифференциального фазового параметра является то, что при его расчете существенно ослабляется составляющая, связанная с электромагнитной индукцией [Электроразведка, 2005; Куликов, 1985].

## **2.1. Технология работ в методах сопротивлений и вызванной поляризации**

Для изучения распределения сопротивления и поляризуемости пород по площади применяются стандартные установки срединного градиента (СГ) или ведется электропрофилирование на нескольких разносах, а для привязки выделенных аномалий проводимости и поляризуемости по глубине используется методика электротомографии. Длины питающих и приемных линий, величина используемого тока в линии АВ выбираются исходя из параметров разреза и требуемой глубинности исследований.

В методе СГ для регистрации сигнала раскладывается измерительная коса из восьми линий MN, подключаемая к 8-канальному измерителю ИМВП (рис. 2). На одной площади возможно группирование нескольких измерителей, что позволяет повышать производительность полевых работ и снижать удельные затраты. В питающую линию АВ подается многочастотный сигнал в виде разнополярных прямоугольных импульсов (“сви́п”). Длительность “сви́па” составляет 3-5 минут. За это время происходит

регистрация сигнала одновременно на всех приемных линиях во всем диапазоне частот. Последующая обработка сигнала осуществляется с помощью программы “CS” и включает в себя борьбу с низкочастотным трендом, подавление индукционной помехи, подавление промышленных помех, использование робастного накопления и, наконец, расчет амплитуд нечетных гармоник сигнала и дифференциально-фазовых параметров. Важно подчеркнуть, что по окончании работ с данной аппаратурой зарегистрированные временные ряды сохраняются, обеспечивая, как и в МТ методах, возможность углубленной переобработки данных.

При проведении работ методом электропрофилирования, в качестве измерителя используется аппаратура «МЭРИ-24» (рис. 3). Измерения ведутся последовательно на нескольких частотах. Обработка сигнала осуществляется непосредственно в измерителе.

На этапе детального исследования обнаруженных аномалий ВП применение метода СГ является нецелесообразным, так как его данных недостаточно для проведения надежной количественной интерпретации и получения информации о форме и глубине залегания искомых объектов. Кроме того, наблюдаемое значение кажущейся поляризуемости зависит не только от поляризующихся объектов и их взаимовлияния, но и от вмещающей среды, что существенно затрудняет интерпретацию аномалий ВП.

Необходимо совместно решать двумерные обратные задачи как для метода сопротивлений, так и для метода вызванной поляризации. В рамках решения такой комплексной проблемы применяется специальная электротомографическая методика наблюдений и интерпретации [Бобачев и др., 1996; Dahlin, 2001; Griffiths, Barker, 1993; Loke, Barker, 1996]. Основная идея электротомографии - многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же фиксированных на профиле электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений по сравнению с обычным методом ВЭЗ. При работах методом электротомографии шаг по разносам равен шагу по профилю. Использование различных положений питающих электродов позволяет создавать электрическое поле различной поляризации. Тем самым обеспечивается “подсвечивание” исследуемого объекта с различных сторон, что существенно повышает устойчивость 2D интерпретации.

Стандартно при работах методом электротомографии используется многоэлектродная аппаратура с единой системой электродов, коммутируемых по необходимости как в качестве приемных, так и питающих. Но для исследования глубин больше 100 м требуется использование больших токов и, соответственно, осоздание

хороших условий заземления для питающих электродов. Поэтому методика электротомографии адаптирована нами с целью уменьшения количества питающих линий при сохранении возможности 2D интерпретации. Адаптированная методика наблюдений близка методу срединного градиента - при фиксированной линии АВ проводится большой объем измерений электрического поля. В отличие от метода СГ, измерения проводятся не только в средней части линии АВ, а почти по всей ее длине и с внешней стороны (рис. 4). Кроме того, питающий диполь движется по профилю с шагом порядка одной пятой своей длины, что позволяет проводить измерения над одним и тем же объектом для различных положений источников первичного поля.

Интерпретация данных электротомографии проводится в два этапа. На первом этапе выполняется инверсия полевых данных с помощью программы “Res2dinv” [Geotomo Software, Малайзия]. В настоящее время эта программа является мировым стандартом для 2D инверсии данных электротомографии. Для регуляризации алгоритма инверсии она использует модели с плавным изменением удельного сопротивления и поляризуемости (Loke, Barker, 1996). Это позволяет оперативно и без учета априорной информации провести удовлетворительную предварительную интерпретацию данных электротомографии. На втором этапе, для проверки результатов автоматической инверсии выполняется ручной подбор 2D модели с использованием программы моделирования “ie2dp” [Геологический факультет МГУ].

## **2.2. Аппаратура методов сопротивления и вызванной поляризации**

### ***Одноканальный измеритель МЭРИ-24***

Измеритель «МЭРИ-24» (многофункциональный электроразведочный измеритель) (рис. 3) предназначен для регистрации электрического и электромагнитного полей при выполнении полевых геофизических работ. Он позволяет проводить работы методами сопротивлений, вызванной поляризации (ВП), естественного поля (ЕП), частотного зондирования (ЧЗ).

Измеритель «МЭРИ-24» состоит из двух основных узлов: усилителя постоянного тока с АЦП и формирователем сигнала калибровки, а также устройства управления. Устройство управления построено на базе цифрового сигнального процессора ADSP2191 М BST-140 фирмы “Analog Devices”. Рабочие частоты лежат в диапазоне 0.153 – 625 Гц. Диапазон входного сигнала составляет от -2 до 2 В, минимальный измеряемый сигнал -1 мкВ. Входное сопротивление превышает 5 МОм. Аналого-цифровой преобразователь выполнен на базе 24-разрядного дельта-сигма АЦП ADS 1271. Измеритель имеет

энергонезависимую память объемом 16 МВ для хранения программ, исходных данных и результатов обработки, автономные часы реального времени с календарем, стандартный интерфейс USB для связи с внешним компьютером. Измеритель снабжен графическим жидкокристаллическим индикатором (ЖКИ) на 320x240 точек и клавиатурой. Вес прибора с аккумуляторами составляет 2 кг. Рабочий диапазон температур – от – 20 °С до + 60 °С.

Параметры процесса измерений определяются выбором того или иного набора настроек прибора. Предусмотрены стандартные наборы настроек, оптимальные для производства геофизических работ тем или иным методом (выбор метода осуществляется с помощью главного меню). Допускается также индивидуальное изменение любых настроек.

Обработка сигнала происходит непосредственно в измерителе - на выходе оператор имеет значения амплитуд нескольких гармоник измеряемого сигнала и дифференциальные фазовые параметры, рассчитанные между различными гармониками.

### ***Многоканальный измеритель ИМВП-8***

Измеритель ИМВП-8 (рис. 2) предназначен для регистрации электрического сигнала и может применяться при проведении работ электроразведочными методами как в частотной, так и во временной области. Измеритель имеет 8 независимых, гальванически изолированных измерительных каналов. Обеспечена надежная изоляция каналов как друг от друга, так и от источника питания и компьютера. Напряжение пробоя изоляции - 500 В.

Измеритель должен использоваться в паре с персональным компьютером (PC). Связь с PC осуществляется по интерфейсу USB. Основные характеристики измерителя ИМВП приводятся в следующей таблице:

Количество независимых измерительных каналов	8
Разрядность АЦП	24 разряда
Тип датчиков	электрические диполи MN
Входное сопротивление	не менее 5 МОм
Рабочая полоса частот	от 0,001 до 200 Гц
Частота следования отсчётов АЦП	2500 Гц
Максимальное напряжение входного сигнала каждого канала	±2,5 В
Уровень собственных шумов	не более 2 мкВ
Интерфейс для связи с компьютером	USB 1.1
Питание регистратора от внешнего источника	12,6В±2В
Рабочий диапазон температур	от -10°С до 50°С, без конденсации
Масса регистратора	1,2 кг

Габариты	200x100x25 мм
----------	---------------

### **Генератор АСТРА-100**

Электроразведочный генератор “АСТРА-100” (рис. 5) используется для возбуждения ЭМ поля при проведении геофизических работ методами постоянного тока, вызванной поляризации, частотного зондирования (в том числе импедансного) и другими методами. В качестве внешнего источника питания используются аккумуляторы напряжением 12 В.

Основные характеристики генератора приведены в таблице.

Максимальная выходная мощность	100 Вт
Максимальное выходное напряжение	400 В
Значения выходного тока	1.0 – 1000 мА
Форма выходного тока	«меандр» (прямоугольные разнополярные импульсы без паузы)
Рабочие частоты:	0.076 – 2500 Гц
КПД	До 80 %
Погрешность стабилизации на активной нагрузке	0.5 %
Длительность фронта на активной нагрузке	2 микросекунды
Диапазон рабочих температур	от - 20 °С до + 50 °С
Напряжение питания	~ 12 В (минимум 9.5 В, максимум 15.5 В)
Вес (без аккумулятора)	~ 2 кг
Габариты	200 x 173 x 113 мм
Текстовый ЖКИ	4 строки x 16 символов

В случае, если мощности генератора АСТРА недостаточно для создания в линии АВ необходимого уровня выходного тока, используются более мощные электроразведочные генераторы: УГЭ-50 (мощность генератора 100 кВт, максимальный ток 100 А при напряжении в линии 1000 В); UCS-02М производства ООО “Фирма КруКо” (мощность генератора 35 кВт, максимальный ток 70 А при напряжении 650 В); Т-3 производства канадской фирмы “Phoenix Geophysics” (мощность 3 кВт, максимальный ток 5А при напряжении в линии 400 В).

## **3. Магниторазведка**

### **3.1. Методика магнитной съемки**

Наземные магниторазведочные работы проводятся магнитометром – градиентометром POS-2, позволяющим измерять как модуль вектора индукции магнитного поля, так и его вертикальный градиент. Высота основного датчика над поверхностью Земли - 2.0 м, дополнительного – 0.5 м, соответственно, база вычисления градиента составляет 1.5 м.

Измерение вертикального градиента аномального магнитного поля при проведении наземных магниторазведочных работ оказывает существенную помощь при разделении приповерхностных и глубинных аномальных источников.

Учет вариаций осуществляется с помощью магнитовариационной станции. В качестве МВС использовался магнитометр POS – 1, позволяющий проводить измерения магнитного поля в автоматическом режиме.

Стандартные графы обработки результатов измерения магнитного поля обычно включают следующие этапы: введение поправок за вариации магнитного поля, выделение аномальной составляющей путем вычитания нормального поля, расчет точности съемки, построение карт изолиний (графиков, карт графиков) с учетом точности съемки, а также процедуры сглаживания, осреднения и трансформации данных.

### **3.2. Магнитометрическая аппаратура**

Магнитометр POS-1 и магнитометр–градиентометр POS-2 разработаны лабораторией квантовой магнитометрии Уральского государственного технического университета. Это прецизионные магнитометры нового поколения, основанные на принципе динамической поляризации ядер (эффекте Оверхаузера).

Структурно эти инструменты состоят из двух основных блоков: процессорного датчика модуля индукции магнитного поля (POS-1 или POS-2) и накопителя данных DLPOS. Датчик магнитометра предназначен для измерения модуля индукции магнитного поля Земли в диапазоне 20000-100000 нТл. Основой датчика служит оверхаузеровский ядерно-прецессионный преобразователь на стабильном рабочем веществе (время жизни порядка 5-10 лет). По сравнению с протонными преобразователями данный тип преобразователя обладает меньшим энергопотреблением, большими чувствительностью и градиентоустойчивостью.

Высокие технические и эксплуатационные параметры датчика в комплекте с различными внешними блоками управления обеспечивают широкие возможности его применения, например, в качестве: полевого магнитометра (или градиентометра в варианте POS-2) для геологоразведочных работ; вариационной станции, обсерваторского магнитометра, эталонного магнитометра мер слабого магнитного поля, магнитного канала многофункциональных геофизических систем.

В качестве блока регистрации с магнитометрами POS – 1, POS – 2 используется накопитель данных DLPOS, который позволяет проводить измерения в режиме вариационной станции, площадной съемки и съемки модуля градиента геомагнитного поля. Так же

предусмотрен режим тестовых измерений для определения работоспособности магнитометров и оценки магнитной обстановки перед проведением работ. Все результаты измерений записываются в энергонезависимую память накопителя и доступны для считывания в персональный компьютер при помощи программного обеспечения, поставляемого с прибором. GPS версия накопителя данных DLPOS позволяет подключать внешний навигатор GPS для координатной привязки измерений.

#### **4. Результаты комплексных геофизических работ на объектах ГМК “Норильский Никель”**

Рассмотрим возможности представленного геофизического комплекса по результатам работ на двух разведочных площадях: Цагинской на Кольском полуострове и Черногорской в Норильском регионе.

В подавляющем большинстве случаев сульфидная минерализация проявляется по электроразведочным данным в виде зон повышенной электрической проводимости и поляризуемости. Но выделение сульфидов часто осложняется присутствием в непосредственной близости от поисковых объектов пород или минералов, обладающих аналогичными, а порой и гораздо более интенсивными электрическими и поляризационными свойствами. На Цагинской площади такой помехой являются зоны титаномагнетитового оруденения, в Норильском рудном районе - графитизированные породы Тунгусской серии. Поэтому, основной задачей электроразведки в таких геологических условиях является выделение зон сульфидной минерализации на фоне хорошо поляризующихся и проводящих пород, не являющихся объектом поиска.

##### **4.1. Геофизические исследования на Цагинской площади в Мурманской области**

Целью работ 2004 г. на Цагинской площади было выявление и перспективная оценка объектов, представляющих промышленный интерес, для постановки детальных поисковых работ. Непосредственной задачей геофизических исследований было: выявление и прослеживание по дифференциации физических свойств крутопадающих контактов и локальных неоднородностей в структуре Цагинского массива, перекрытого рыхлыми отложениями; изучение положения пологозалегающих геоэлектрических горизонтов (глубинностью 300-1000 м), выявление в составе горизонтов потенциально продуктивных основных пород локальных неоднородностей, перспективных на обнаружение сульфидной минерализации с составлением рекомендаций по заложению поисковых скважин.

Основные рудные объекты сосредоточены в центральной части Цагинского массива. Они представляют собой зоны высокой концентрации титаномагнетита с небольшими вкраплениями сульфидов. Рекогносцировочные площадные работы методом СГ и наземной магниторазведки, проведенные в центральной части массива показали, что наличие титаномагнетита в породе вызывает ярко выраженные положительные аномалии в магнитном поле (тысячи, первые десятки тысяч нТл), в поле вызванной поляризации (кажущаяся поляризуемость относительно вмещающих пород увеличивается с 2% до 20%) и в электрической проводимости (рис. 6).

Для ряда аномальных объектов, присутствие титаномагнетитового оруденения подтверждено малоглубинным бурением. По результатам лабораторных исследований керны магнитная восприимчивость пород в местах скопления титаномагнетитовых руд составила 0.2-0.5 ед. СИ, поляризуемость - 20–25%, удельное электрическое сопротивление - 15–20 Ом·м, что свидетельствует о высоком процентном содержании ферромагнитных и электропроводящих минералов в породе. При построении магнитной модели зоны оруденения были аппроксимированы узкими телами, преимущественно вертикального и субвертикального залегания. Характер аномалий магнитного поля определяется, в основном, положением верхних кромок этих тел, которые в большинстве случаев фиксируются в непосредственной близости от кровли коренных пород.

Ряд аномальных зон был выявлен за пределами центральной части Цагинского массива. Они характеризуются повышенной проводимостью, поляризуемостью и отсутствием интенсивных аномалий в магнитном поле. По результатам многочастотных измерений ИНФАЗ-ВП, частотные характеристики вызванной поляризации, полученные над этими зонами и в областях интенсивного титаномагнетитового оруденения, как правило, существенно различаются. На рис. 7 приведены графики кажущейся поляризуемости и разницы значений  $\eta_k$  на частотах 0.3 Гц и 1.22 Гц для одного из профилей. Практически весь профиль характеризуется положительными значениями параметра  $\eta_k^{0.3-1.22}$ , исключение составляют начальные пикеты профиля (0-100), располагающиеся западнее границы Цагинского массива. Эти аномальные зоны, расположенных вне Цагинского массива в полосе развития архейских пород кислого состава, возможно связана с сульфидной минерализацией.

На геоэлектрических разрезах, построенных по результатам интерпретации данных АМТЗ, все без исключения аномально магнитные тела проявляются в виде зон пониженных сопротивлений, отражая высокую проводимость магнетитовых и

титаномагнетитовых руд. Область пониженных значений удельного сопротивления пород превышает объем включаемых рудных тел в несколько раз. Форма этой области и закономерности изменения в ее пределах удельного сопротивления пород от границ к центру в общих чертах определяются направленностью и интенсивностью их гидротермально-метасоматических преобразований. Наибольшей проводимостью отличаются непосредственно окологрудные зоны. По данным АМТЗ выявлен, однако, и ряд проводящих объектов, не коррелирующихся пространственно с аномалиями магнитного поля, что может быть признаком развития сульфидного оруденения, либо графитизации пород.

Одновременный подбор кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости по результатам СГ-ВП позволил дополнить геофизическую модель, полученную по профилям магнитометрических исследований, электрическими и поляризационными свойствами (рис. 8).

Сопротивление рудовмещающих пород, составляющее 5000-15000 Ом·м, с появлением измененных пород, несущих рудную минерализацию, заметно понижается. В процессе исследований установлено, что участки пород с повышенной концентрацией электроннопроводящих сульфидных минералов характеризуются сопротивлениями в сотни Ом·м, а хорошо проводящие титаномагнетитовые руды - первые десятки Ом·м.

Интрузивные породы, слагающие Цагинский массив, характеризуются повышенными значениями поляризуемости ( $\eta=2.5\%$ ) при более низкой поляризуемости вмещающих гранитов архейского возраста ( $\eta=1.8\%$ ). Поляризуемость титаномагнетитовых руд достигает 8-9%. Высокие значения поляризуемости были зафиксированы также в ряде зон за пределами центральной части массива, что позволяет прогнозировать выявление здесь новых горизонтов развития сульфидной и титановомагнетитовой минерализации.

При высоком сопротивлении вмещающих пород, характерных для Цагинской площади, глубинность метода АМТЗ возрастает до первых десятков км. Поэтому выполненные наблюдения представляют значительный интерес для глубинного зондирования земной коры, особенно в форме пространственно осредненных МТ откликов, характеризующих закономерности ее субгоризонтальной структуры. Эти результаты, однако, выходят за рамки данной статьи.

## 4.2. Геофизические исследования на Черногорском месторождении сульфидных руд в Норильском районе

В 2005 г. были выполнены опытно-методические работы методами ВП и АМТЗ на Черногорском месторождении сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд в Норильском рудном районе. Изучение вызванной поляризации велось методом срединного градиента (ВП-СГ) с питающей линией длиной от 2 до 3 км и приемными линиями длиной 100 м, а также серией точечных зондирований ВП в поле фиксированных питающих электродов. Опытно-методические работы АМТЗ осуществлялись в синхронном режиме с использованием удаленной базовой точки.

При интерпретации данных АМТЗ по двум профилям, пересекающим Черногорскую интрузию, выполнялись как 1D инверсия, так и 2D инверсия с использованием программы Mackie [Rodi, Mackie, 2001]. Итоговые геоэлектрические разрезы по одному из профилей представлены на рис. 9. Черногорская интрузия выделяется на фоне вмещающих пород высоким уровнем сопротивлений. Аномалии проводимости, наблюдаемые по краям интрузии во вмещающих породах, связаны с графитизированными породами Тунгусской серии. Еще одна аномалия проводимости фиксируется непосредственно под центральной частью массива. Для объяснения природы этой аномалии результатов АМТЗ недостаточно. Она может быть связана как с проводящими осадочными породами Тунгусской серии, так и с сульфидными рудами в нижней части дифференцированной интрузии. Для уточнения природы аномалии были проведены работы методом ВП.

Измерения вызванной поляризации проводились многоканальной станцией ИМВП. Для создания тока в питающей линии использовались генераторы «АСТРА» (мощность 100 Вт) и UCS-02М (мощность 35 кВт). В питающую линию подавался «свип» со следующим набором частот: 0.15, 0.3, 0.6, 1.22 Гц. Отметим, что благодаря высокой точности наблюдений и хорошей стабилизации выходного сигнала в генераторе «АСТРА», результаты, полученные с различными генераторами, несмотря на существенную разницу в их электрической мощности, практически не отличаются. Это позволяет рекомендовать при решении подобных задач методом ВП использование портативных генераторов, что существенно облегчает проведение работ.

На рис. 10 приведены карты кажущейся поляризуемости, построенные для частот 1.22 и 0.15 Гц. Наиболее интенсивные аномалии ВП, наблюдаемые за пределами Черногорской интрузии, связаны с графитизированными породами Тунгусской серии. Менее интенсивная аномалия ВП изометричной формы фиксируется в центральной части площади в пределах продуктивной интрузии.

В процессе наблюдений установлено, что при понижении частоты уровень кажущейся поляризуемости над аномалиями, связанными с вмещающими графитизированными породами Тунгусской серии, практически не меняется, тогда как значения  $\eta_k$  для центральной аномалии Черногорской площади увеличиваются почти вдвое (рис. 10, 11). Такое существенное различие в частотных характеристиках процессов вызванной поляризации подтверждает наши предположения о том, что аномалия поляризуемости, наблюдаемая в центральной части Черногорской площади, связана не с графитизированными осадочными породами, которые могли бы погружаться под интрузию, а обусловлена, вероятнее всего, сульфидной минерализацией в составе самой интрузии.

По результатам 2D интерпретации данных электротомографии осуществлена глубинная привязка аномалий поляризуемости, полученных методом ВП-СГ (рис. 12). Нижняя часть интрузивного массива, содержащая сульфидную медно-никелевую минерализацию, характеризуется сопротивлениями 1000 Ом·м и поляризуемостью 5%. Мощность аномальной зоны составляет 40-50 метров при ширине 600 метров. Положение и размеры выявленной аномальной зоны ВП вполне адекватны области низкого сопротивления (первых сотен Ом·м), прослеживаемой в низах интрузии по данным АМТЗ (рис. 9). В данном случае точность построений АМТЗ представляется более высокой, однако, метод ВП имеет решающее значение при установлении природы аномалий низкого сопротивления.

### **Заключение**

Рассмотренный комплекс геофизических методов использовался в 2004-2005 г. на ряде объектов ОАО "ГМК "Норильский Никель". Представленные материалы отражают лишь первые шаги его внедрения, свидетельствующие в целом о высокой эффективности данного комплекса геофизических методов.

Возможности отдельных методов комплекс существенно развиваются. В частности, идет внедрение и опробование магнитовариационных модификаций МТЗ, совершенствуются методики многоканальных многочастотных наблюдений в методе ВП и глубинной привязки выявленных аномалий методом электротомографии. Наряду с этим, по результатам выполненных работ накапливается опыт адаптации возможностей данного комплекса к тем или иным особенностям решаемых геологических задач.

## Литература

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М: Диалог-МГУ. 1997.
2. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред // Разведочная геофизика. Вып. 2. М.: Геоинформмарк. 1996. 50с.
3. Бродовой В.В. Геофизические исследования в рудных провинциях. М.: Недра. 1984.
4. Бродовой В.В. и др. Геофизические методы разведки рудных месторождений. М.: Недра. 1990.
5. Варенцов Ив.М. Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Настоящее издание. С. хх-хх.
6. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. Л.: Недра. 1980.
7. Куликов А.В. Методические рекомендации по применению аппаратуры для низкочастотной фазовой электроразведки. М: ВНИИГеофизика. 1985.
8. Новожинский К., Пушкарев П.Ю. Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных. // Физика Земли. 2001. № 6. с.72-85
9. Электроразведка. Учебное пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей (Ред. В.К. Хмелевской, И.Н. Модин, А.Г. Яковлев). Гл. 4,13. Прил. № 5,6. М.:МГУ. 2005.
10. Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques // Computers & Geosciences. 2001. V. 27. P. 1019–1029.
11. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // J. Appl. Geophysics. 1993. V. 29. P. 211–226.
12. Loke M.H., Barker R.D.. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. 1996. V. 44. P. 131-152.
13. Meju M.A. Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges // Surv. Geophys. 2002. V. 23. P. 133–205.
14. Mining geophysics. V.1. Case histories. Tulsa: SEG. 1966. 492 p.
15. Rodi W., Mackie R.L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66. P. 174-187.



Рис. 1. Электроразведочная станция МТУ-5А.



Рис. 2. Измеритель многоканальный вызванной поляризации ИМВП-8.



Рис. 3. Многофункциональный электроразведочный измеритель «МЭРИ-24».

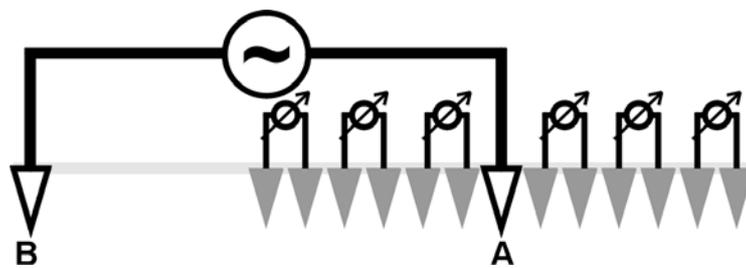


Рис. 4. Расстановка приемных и питающих электродов при сплошных электрических зондированиях (метод электротомографии)



Рис. 5. Генератор тока «АСТРА-100».

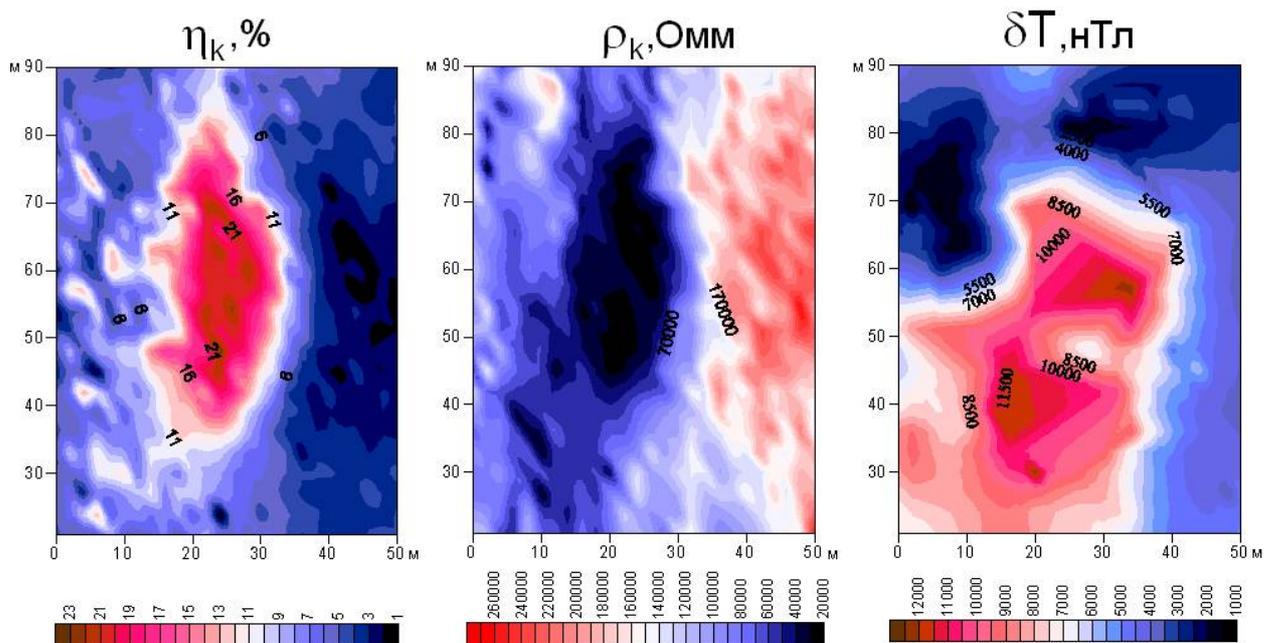


Рис. 6. Результаты площадных измерений над локальной аномалией в центральной части Цагинского массива.

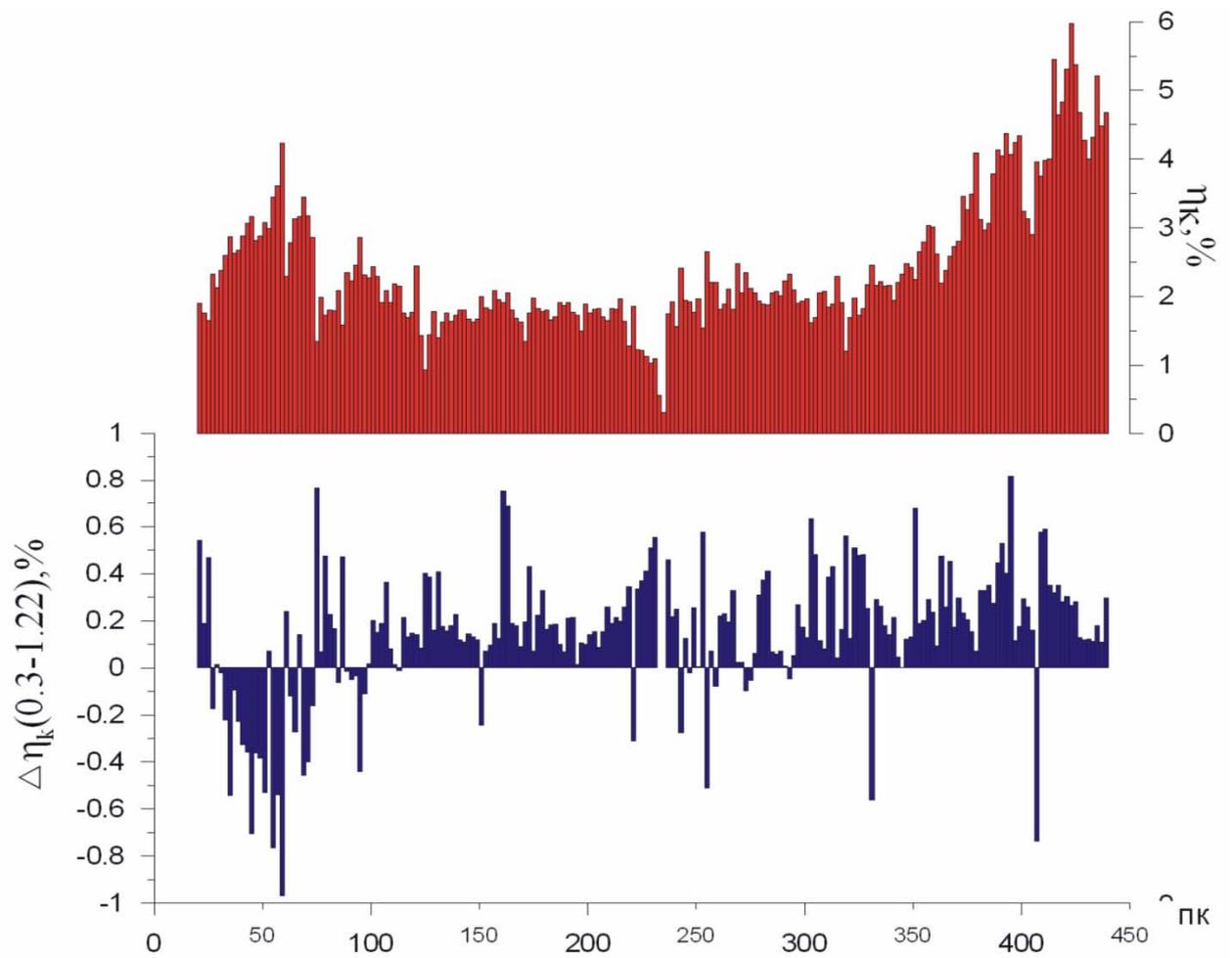


Рис. 7. График  $\eta_k$  на частоте 0.3 Гц и график разности значений  $\eta_k$  на частотах 0.3 и 1.22 Гц

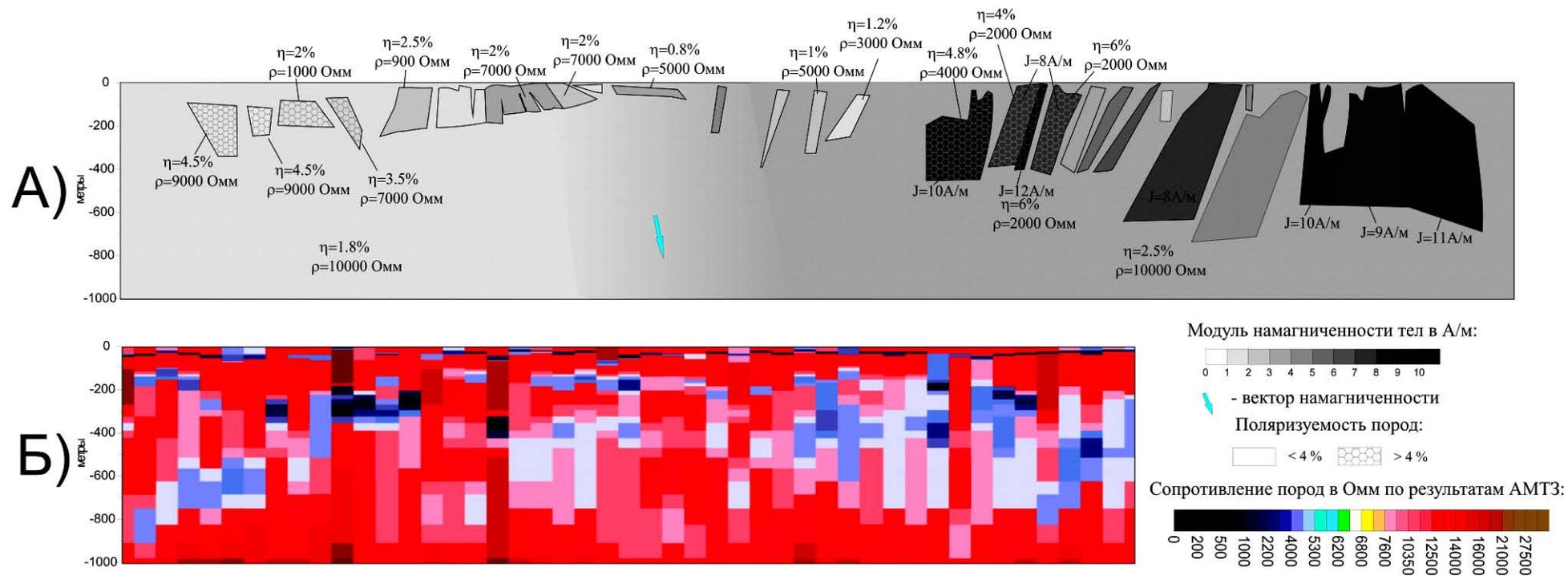


Рис. 8. Геофизическая модель, построенная по результатам комплексной интерпретации данных магниторазведки, СГ-ВП (А) и АМТЗ (Б).

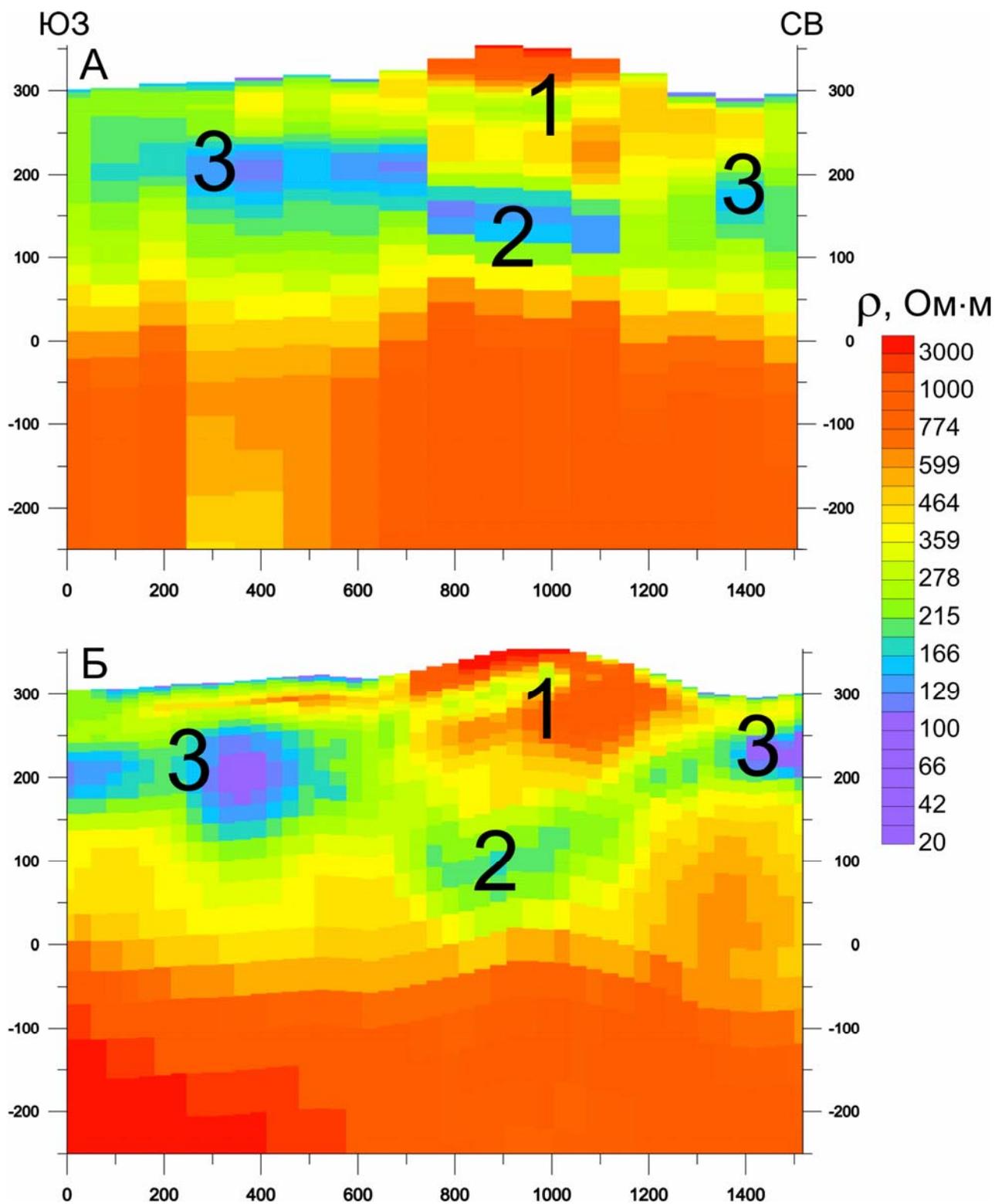
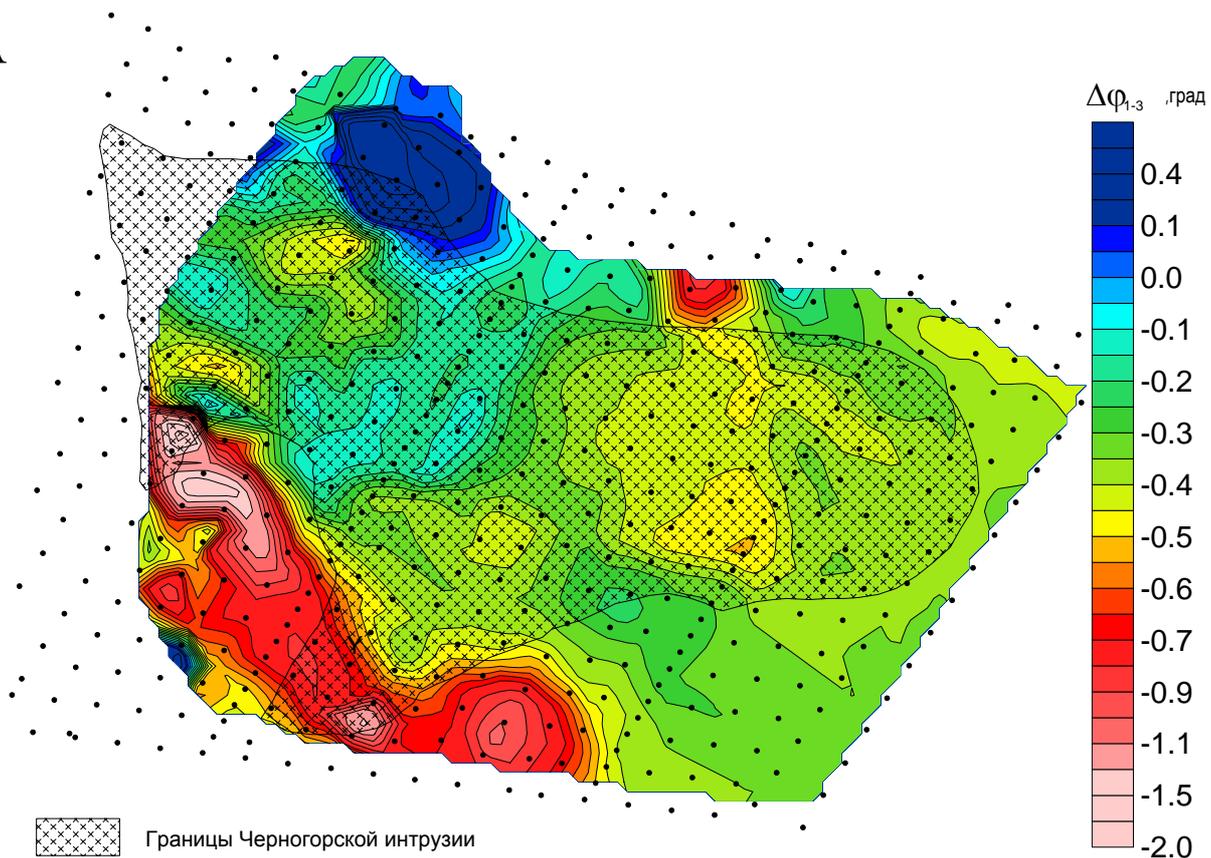


Рис. 9. Геоэлектрические разрезы по результатам 1D инверсии (А) и 2D инверсии (Б) данных АМТЗ в районе Черногорской интрузии (1 – высокоомная часть интрузии, 2 – проводящее основание интрузии, 3 - графитизированные породы Тунгусской серии).

А



Б

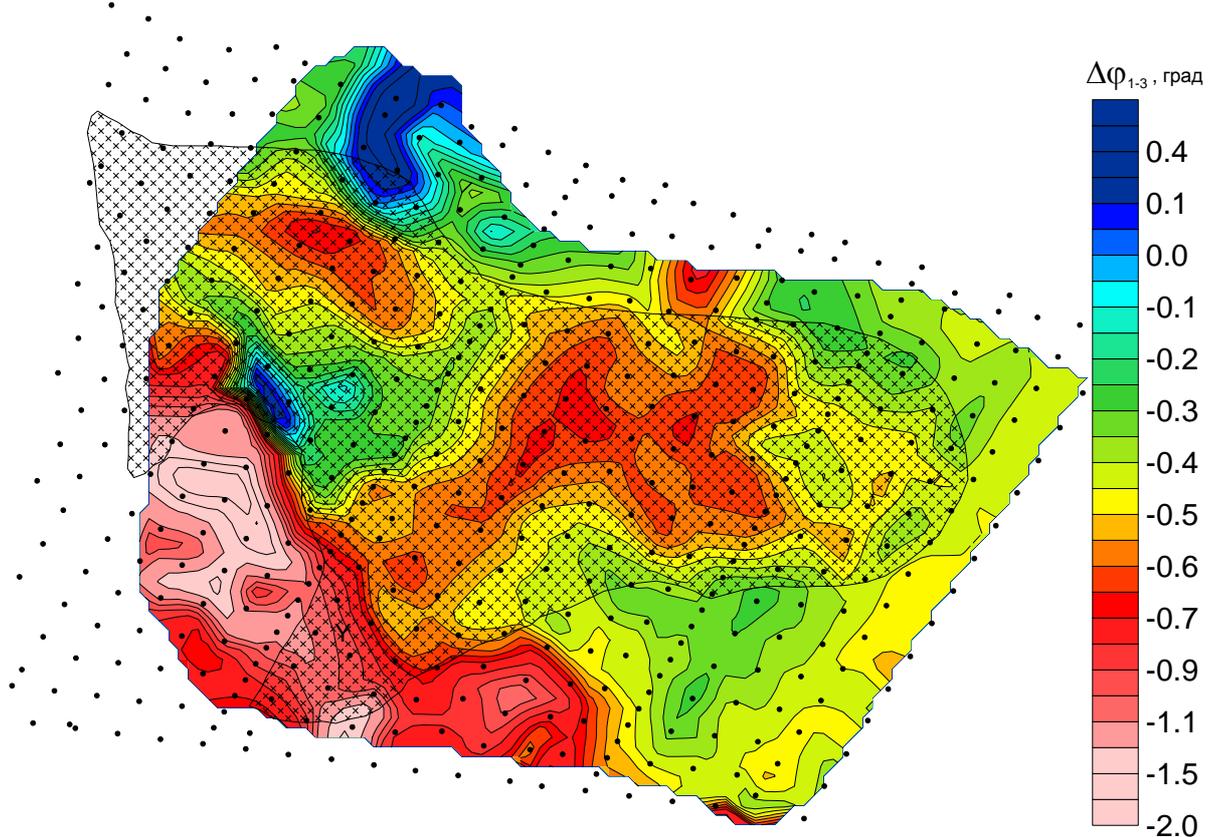


Рис. 10. Карты  $\Delta\varphi_{1-3}$  района Черногорской интрузии на частотах 1.22 Гц (А) и 0.15 Гц (Б)

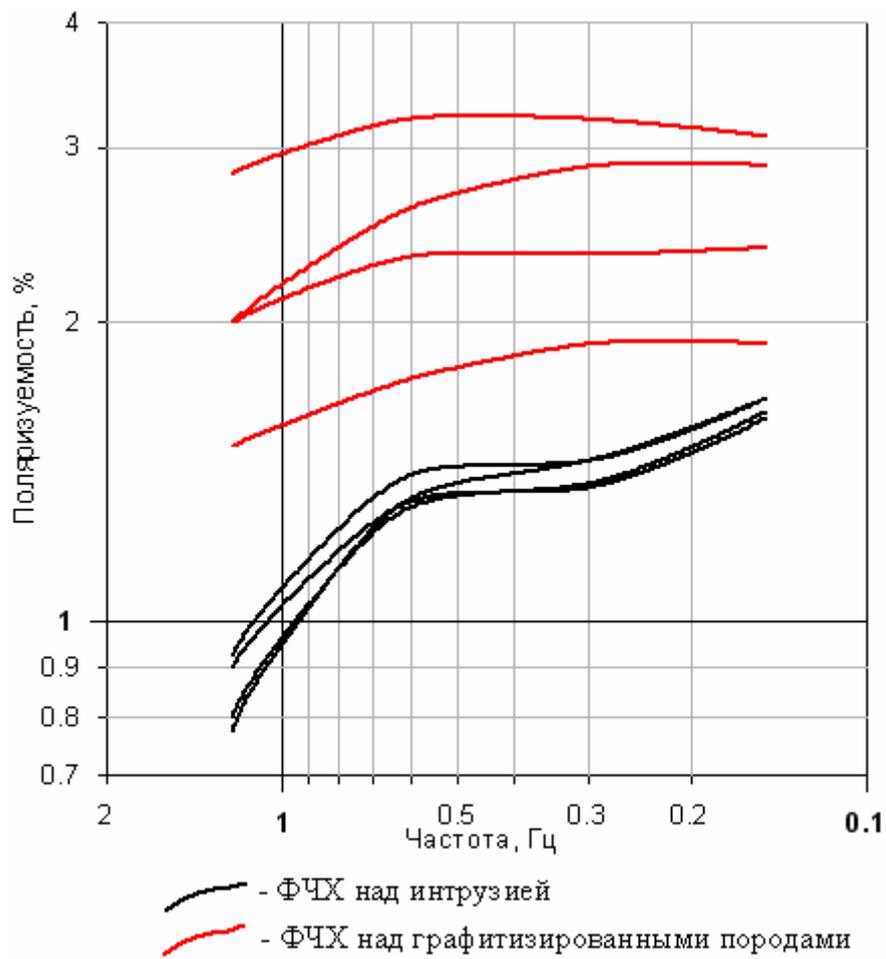


Рис. 11. Частотные характеристики дифференциального фазового параметра над Черногорской интрузией и за ее пределами

