

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи



**Куликов Виктор Александрович**

**ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ЭТАПАХ ПОИСКА И  
ОЦЕНКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные  
оппоненты:

**Поспеев Александр Валентинович**

доктор геолого-минералогических наук, профессор, старший научный сотрудник Института земной коры СО РАН, г. Иркутск;

**Тригубович Георгий Михайлович**

доктор технических наук, научный руководитель геофизических исследований Федерального государственного унитарного предприятия Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГиМС), г. Новосибирск;

**Белявский Виктор Владимирович**

доктор технических наук, главный научный сотрудник Центра геоэлектромагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), г. Троицк.

Ведущая организация: Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе

Защита состоится «7» октября 2015 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.501.001.64 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27, сектор «А», 8 этаж, к. 812) и на сайте МГУ имени М.В. Ломоносова: <http://istina.msu.ru/dissertations/8883823>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Никулин Борис Александрович

## Общая характеристика работы

### *Актуальность темы исследования.*

Появление и широкое внедрение в различные отрасли производства компьютерных технологий, систем спутниковой навигации, привело к появлению нового класса компактной высокоточной геофизической аппаратуры. Как следствие, произошло качественное усовершенствование имеющихся технологий и появление совершенно новых геофизических методик. Новые направления в наземной электроразведке связаны с развитием аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ), магнитовариационных методик (МВЗ, ГМТ), электротомографии (ЭТ), метода спектральной вызванной поляризации и др.

Использование мощных и скоростных компьютеров существенно сократило время обработки и интерпретации электроразведочных данных, и дало возможность перейти на качественно новый уровень 2D- и 3D-интерпретации результатов наблюдений.

В результате существенного обновления и модернизации электроразведочных методов, возникла необходимость в решении следующих задач:

- определение места новых электроразведочных технологий в геофизическом комплексе, применяемом на этапах поиска и разведки рудных месторождений;
- выбор наиболее оптимальных вариантов сочетания традиционных и современных рудных электроразведочных технологий;
- оценка эффективности и разрешающей способности новых электроразведочных технологий на основе математического и физического моделирования.

### *Степень разработанности проблемы.*

При поисках и разведке рудных месторождений, на определенных этапах геологоразведочных работ, используется широкий набор электроразведочных методов, имеющих разную физическую основу, различающихся по набору решаемых задач, глубинности исследований, разрешающей способности и т.д.

В своей диссертационной работе автор ограничивается рассмотрением отдельных направлений наземной рудной электроразведки, развитию которых он посвятил свою научную и практическую деятельность. К этим направлениям относятся: магнитотеллурические методы, частотные модификации метода вызванной поляризации (ВП), электротомография в наземном и межскважинном вариантах (ЭТ, МЭТ).

Высокочастотное направление в магнитотеллурике, названное аудиоманнитотеллурическим зондированием (АМТЗ), развивалось в СССР с

середины 80-х годов прошлого столетия, в Ленинграде. В 1992 г. в СПбГУ была создана серия портативных приборов семейства АКФ, позволяющих проводить измерения естественных электромагнитных полей в диапазоне 3-3200 Гц [Кочеров, 1993, 1996]. В конце девяностых годов прошлого столетия, в России, широкое распространение получили АМТ-станции производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics».

Результаты использования МТ-методов при решении рудных задач неоднократно публиковались в отечественных и иностранных специализированных периодических изданиях. Большой вклад в развитие этого направления внесли советские и российские геофизики: Бердичевский М.Н., Белявский В.В., Безрук И.А., Бурахович Т.К., Варенцов И.М., Вагин С.А., Варданянц И.Л., Дьяконова А.Г., Жамалетдинов А.А., Ингеров А.И., Ковтун А.А., Кулик С.Н., Кочеров А.Б., Мороз Ю.Ф., Поспеева Е.В., Рокитянский И.И., Сараев А.К., Спичак В.В., Фельдман И.С. и др. [Белявский, 2004, 2012; Бердичевский, 2010; Варенцов, 2013; Ермолин, 2011; Жамалетдинов, 1996; Ковтун, 1985; Кочеров, 1996; Манаков, 2005; Мороз, 1987; Поспеева, 2003, 2006; Фельдман, 2005].

Изучением временных (частотных) законов ВП и их практическим применением для поиска полезных ископаемых в разные годы занимались многие зарубежные, советские и российские геофизики: Borner F.D., Cole K.S., Cole R.H., Hallof P.G., Hohmann G.W., Lockner D.A., Madden T.R., Seigel H.O., Pelton W.H., Vanhala H., Wait J.R., Wong, J., Zonge K., Астраханцев Г.В., Агеев В.В., Бобровников Л.З., Геннадиник В.А., Даев Д.С., Дахнов В.Н., Каменецкий Ф.М., Карасев А.П., Кормильцев В.В., Комаров В.А., Куликов А.В., Моисеев В.С., Рокитянский И.И., Рыжов А.А., Рыхлинский Н.И., Рысс Ю.С., Светов Б.С., Семенов М.В., Титов К.В., Человечков А.И., Улитин Р.В., Файнберг Э.Б., Шаповалов О.Н., Шейнманн С.М., Эпов М.И. и многие др. [Агеев, 2006; Карасев, 1981, 2005; Комаров, 1980; Кормильцев, 1987, 1989; Куликов А., 1978; Каменецкий, 1996, 1984, 1992; Рыжов, 1976, 1987; Светов, 1996, 2007; Шаповалов, 1972; Эпов, 1999, 2004; Buchheim, 1956; Madden, 1967; Seigel, 1962, 1997; Titov, 2004].

В разработке аппаратуры, методики и теоретических аспектов фазово-частотных измерений вызванной поляризации (ИНФАЗ-ВП), в СССР, принимали участие несколько ведущих организаций геофизической отрасли: Институт геофизики Уральского научного центра АН СССР, ВНИИгеофизика, Московский

Геологоразведочный Институт, Казахский филиал Всесоюзного института разведочной геофизики КазВИРГ и др. [Куликов А., 1978].

Методики наземной и межскважинной электротомографии начали развиваться в нашей стране и за рубежом с конца восьмидесятых годов прошлого столетия. Результаты экспериментальных работ методом межскважинной электротомографии, вопросы методики и теории измерений периодически публикуются в различных зарубежных геофизических изданиях. Для обозначения метода, чаще всего, применяется сокращение Cross-hole ERT (Electrical Resistivity Tomography) или BRT (Borehole Resistivity Tomography) [Alumbaugh, 1996; Dahlin, 2000; Daily, 1991; Wilt, 1995].

### ***Цели и задачи работы.***

Целью настоящей работы является развитие и совершенствование эффективного комплекса электроразведочных технологий, применяемых на этапах поиска и оценки рудных месторождений, а также повышение достоверности и полноты геолого-геофизической информации, получаемой на основе интерпретации электроразведочных данных на рудных месторождениях различного генезиса.

К основным задачам исследований относятся:

1. Разработка общих принципов эффективного применения и комплексирования с другими разведочными методами традиционных и современных модификаций магнитотеллурических методов – АМТЗ, МВЗ, ГМТ – для решения прямых и косвенных рудных задач.
2. Оценка чувствительности различных передаточных магнитотеллурических и магнитовариационных операторов к присутствию в разрезе горизонтов проводящих сульфидных руд (на основе 3D-моделирования).
3. Разработка аппаратно-методического комплекса многоэлектродных наземных систем наблюдений методом электротомографии, специализированного для поиска и разведки месторождений рудных полезных ископаемых, с глубиной исследований 400-500 м.
4. Сравнение разрешающей способности различных многоэлектродных установок глубинной электротомографии на основе всестороннего анализа синтетических моделей, имитирующих рудные тела различного размера, физических свойств и характера залегания.
5. Практическая реализация площадных и глубинных исследований по методике фазово-частотных измерений вызванной поляризации (ИНФАЗ-ВП) для решения следующих задач:

- разделение аномалий вызванной поляризации от углеродистых, графитизированных пород и сульфидных руд;
  - выделение областей богатого оруденения в пределах медно-порфировых месторождений;
  - разделение скарновых тел разных формаций;
  - отбраковка аномалий вызванной поляризации, связанных с частичным промерзанием пород в криолитозоне.
6. Проведение петрофизических исследований частотных характеристик дифференциального фазового параметра на образцах руд различного типа для совершенствования геологической интерпретации результатов фазово-частотных измерений ВП.
  7. Разработка аппаратно-методического комплекса метода межскважинной электротомографии (МЭТ). Оценка чувствительности и разрешающей способности метода МЭТ на основе математического и физического моделирования.

***Научная новизна работы.***

1. Разработана методика синхронных МТ/МВ-зондирований с оцениванием параметров горизонтального магнитного поля для решения поисковых задач рудной геофизики. Выполнена оценка разрешающей способности предложенной методики исследований на основе 3D-моделирования.
2. Исследованы области применения магнитотеллурических методов в рудной геофизике, определены и классифицированы геологические задачи, решаемые с помощью МТ/МВ-методов на разных стадиях геологоразведочных работ. Успешное решение геологических задач с помощью МТ/МВ-методов продемонстрировано на экспериментальных результатах.
3. Разработана новая методика наземной электротомографии, с использованием несимметричных осевых установок, для решения рудных задач с глубиной изучения разреза 400-500 м. Методика успешно опробована на медно-порфировых, скарновых, полиметаллических месторождениях.
4. На основе методики ИНФАЗ-ВП, разработанной в 60-80 гг. прошлого столетия в СССР, предложена (новая, усовершенствованная) технология использования многочастотных измерений дифференциального фазового параметра ВП для решения важных геологических задач рудной геофизики: разделения аномалий ВП от углеродистых, графитизированных пород и сульфидных руд; выделения областей богатого оруденения в пределах медно-порфировых месторождений; разделения скарновых тел разных формаций и др.

5. Разработана новая методика межскважинной электротомографии (МЭТ). На основе математического и физического моделирования осуществлен выбор параметров установок МЭТ. Проведено успешное полевое опробование метода на месторождении Норильской рудной зоны.

### ***Практическая значимость работы.***

Практическая значимость работы заключается в создании эффективного электроразведочного комплекса для поиска и изучения глубокозалегающих рудных залежей различного типа. Разработаны методики полевых и петрофизических измерений, способы обработки и интерпретации полученных данных.

Внедрение магнитотеллурических методов в рудный геофизический комплекс повысило глубинность электроразведочных исследований и дало возможность выявления глубокозалегающих крупных месторождений. Использование специальных многоэлектродных методик зондирования позволило увеличить глубинность исследования методом вызванной поляризации в существенно неоднородных средах до сотен метров, первых километров.

Использование при решении рудных задач частотных характеристик дифференциального фазового параметра позволяет решить одну из наиболее важных и насущных задач рудной электроразведки – разделение аномалий ВП, связанных с углефицированными толщами и сульфидсодержащими породами.

Материал, полученный автором на поисковых участках различных рудных месторождений, свидетельствует о повышении геологической и экономической эффективности геофизических исследований. Использование представленных в работе электроразведочных технологий позволило подготовить основу для последующих стадий геологоразведочных работ – локализовать участки, перспективные на обнаружение рудных полезных ископаемых, определить точки заложения буровых скважин и, в ряде случаев, выявить конкретные рудные объекты.

### ***Методология и методы исследования.***

В процессе исследования автор основывался на методологических, теоретических и технических идеях разведочной электроразведки, которые изложены в научных работах видных отечественных геофизиков - М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, А.В. Куликова, Л.Л. Ваньяна, Б.С. Светова, А.Г. Яковлева, И.М. Варенцова, А.А. Бобачева и др.

Для проведения полевых измерений использовалась современная сертифицированная электроразведочная аппаратура российского и зарубежного производства: MTU-5 (Phoenix Geophysics Ltd, Канада), ЦИКЛ-7 (НПФ «Эльта-Гео», г. Новосибирск); Syscal Pro (IRIS Instruments, Франция); ВП-1000 (ЗАО НПЦ «Солитон», г. Москва); АСТРА, МЭРИ, ИМВП (ООО «Северо-Запад», г. Москва) и другие современные приборы.

Для обработки, анализа и интерпретации электроразведочных материалов использовалось передовое программное обеспечение, разработанное как в России, так и за ее пределами: SSMT-2000 (Phoenix Geophysics Ltd, Канада); Oasis montaj (Geosoft, Канада); Coscad 3D (МГГРУ, Петров А.В., Никитин А.А.); программа 2D+ инверсии МТ/МВ-данных (ЦГЭМИ РАН, Варенцов И.М.); Res2DInv (Geotomo, Малайзия), Zond2DRes, ZondCHT, ZondMT2D (Каминский А.Е.); EPI-KIT, QC-QA, MT-Corrector, MTS-Prof, MT-2D Tools, IPI2Win(MT), Octopus Pro (МГУ, ООО «Северо-запад»). Используемый автором программный комплекс позволяет получать первичные данные высокого качества и проводить 1D-, 2D-, 3D-интерпретацию полученных данных.

***Положения, выносимые на защиту.***

1. Разработанная методика синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, с оцениванием параметров импеданса, матрицы Визе-Паркинсона и горизонтального магнитного тензора, существенно повышает глубинность исследований в рудной геофизике и позволяет решать следующие геологические задачи: изучение глубинного строения рудной провинции, выявление и определение параметров тектонических нарушений, картирование интрузивных тел, оконтуривание зон гидротермально измененных пород, прямой поиск хорошо проводящих рудных тел.
2. Анализ частотных характеристик дифференциального фазового параметра вызванной поляризации и предложенные автором приемы их обработки позволяют решить одну из важнейших задач рудной геофизики: отделить аномалии ВП, связанные с различными ассоциациями сульфидных руд, от аномалий, создаваемых углефицированными и графитизированными, магнетитсодержащими породами, мерзлыми осадочными породами.
3. Предложенная автором методика глубинной электротомографии, в сочетании с многочастотными фазовыми измерениями вызванной поляризации, позволяет решать следующие новые геологические задачи на этапе поиска рудных месторождений: определение границ интрузивных образований, зон

сульфидной минерализации и областей окварцевания, определение границ водоносных горизонтов, определение мощности мерзлых пород и таликовых зон, картирование и изучение проводящих тектонических нарушений.

4. Для определения параметров проводящих и поляризующихся рудных тел в межскважинном и околоскважинном пространстве, на этапе разведки рудного месторождения, автором разработан универсальный комплекс измерений: «скважина – скважина», «скважина – земная поверхность»; его особенностью является использование в скважине одновременно не более трех электродов, что позволяет проводить измерения без специальных многожильных измерительных кос.

#### ***Степень достоверности и апробация результатов.***

Все представленные в работе результаты получены автором с помощью современного высокоточного сертифицированного геофизического оборудования. Теория построена на известных фактах и согласуется с опубликованными в литературе данными других исследователей. Полученные результаты не противоречат данным, представленным в независимых источниках по данной тематике.

Основные положения диссертационной работы докладывались на различных научных Международных и Республиканских конференциях, совещаниях и семинарах: «Ломоносовские чтения», «Инженерная и рудная геофизика», «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых», «Новые идеи в науках о Земле», «Нетрадиционные и несейсмические исследования», «Современное состояние наук о Земле», на Международных школах-семинарах по электромагнитным зондированиям, на Международных школах-семинарах по вызванной поляризации.

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ в реферируемых журналах, написано 8 отчетов по опытно-методическим и тематическим работам и около 60 геологических отчетов по результатам производственных работ.

#### ***Фактический материал и личный вклад автора.***

Основу диссертационной работы составляют результаты исследований автора, выполненные в период с 1996 по 2014 гг. на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова и в геофизической компании ООО «Северо-Запад».

Под руководством и при непосредственном участии автора, в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва), разрабатывалась и адаптировалась для решения

рудных задач методика интерпретации площадных аудиомагнитотеллурических и магнитовариационных данных, методика измерений и способы интерпретации глубинных модификаций электротомографии, межскважинных измерений, фазовых измерений вызванной поляризации.

На основе разработанных автором методик, компанией ООО «Северо-Запад» в период с 2002 по 2014 гг., были успешно проведены полевые работы, выполнена геолого-геофизическая интерпретация во многих рудных провинциях: в Норильском рудном районе; на Кольском полуострове; на участках Быстринского рудного поля; на Чукотке; на месторождении «Удокан»; на медно-порфировых месторождениях: «Песчанка» (Чукотка), «Ак-Суг» (Республика Тыва), «Бенкала» (республика Казахстан), «Гарадаг» (Айзербайджанская Республика), на золоторудных участках Уяндино-Сутуруохской зоны (Республика Саха); в Зырянском рудном районе (Казахстан) и многих др.

### ***Структура диссертации.***

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы – 235 страниц, в ней содержится 95 рисунков, 7 таблиц, список литературы состоит из 188 наименований.

### ***Благодарности.***

Автор глубоко признателен всем сотрудникам полевого отдела ООО «Северо-Запад», благодаря самоотверженному труду которых были получены геофизические материалы, использованные в работе: Андрееву В.С., Гребневу В.П., Бражникову Р.В., Егорову А.Л., Зальцману Р.В., Лепнухову В.А., Мизинову Л.Г., Медведевой Т.А., Верховцеву В.В., Пивоварову П.А. и многим другим.

Автор выражает особую признательность своим учителям, соавторам и коллегам: Бердичевскому М.Н., Яковлеву А.Г., Варенцову И.М., Александровой Е.Д., Пальшину Н.А., Модину И.Н., Шустову Н.Л., Пушкареву П.Ю., Бобачеву А.А., Стрелиговой И.Д., Яковлеву Д.В., Алексееву Д.А. и др., разработчикам аппаратуры и программного обеспечения.

Написание данной работы было бы невозможно без поддержки руководителя геологического департамента ОАО ГМК «Норильский никель» – Симонова О.Н., генерального директора ООО «Норильскгеология» Снисара С.Г., главного геолога ООО «Норильскгеология» – Ярыкалова С.П., сотрудников геологического и геофизического отделов заполярного филиала ОАО ГМК «Норильский никель» – Канунникова В.А., Радько В.А., Дудина О.Н. и др.

## Основное содержание работы

### Введение

Во введении изложены актуальность проблемы, цели и задачи исследований, обосновывается применение используемого подхода, сформулированы основные защищаемые положения и определена общая структура диссертации.

### Глава 1. Геологические задачи, решаемые с помощью электроразведочных методов на стадиях поиска и оценки рудных месторождений.

Первая глава посвящена описанию электрических свойств наиболее распространенных руд и рудных минералов, основных типов рудных месторождений, классификации геологических задач, решаемых современными электроразведочными технологиями на этапах поиска и оценки месторождений различного генезиса.

Априорная информация об *электрических свойствах горных пород* может использоваться на предварительном этапе интерпретации, например, при проведении численного 2D/3D-моделирования для оценки разрешающей способности метода и возможных искажений результатов. Зная петрофизические свойства вмещающих пород и руд, можно задать ограничение интервала ожидаемых значений УЭС и поляризуемости, что на порядок повышает достоверность формализованной инверсии электроразведочных данных.

Информацию об электрических свойствах горных пород и руд получают на основе петрофизических лабораторных измерений на образцах, либо по результатам электрического каротажа БКЗ разведочных скважин.

В таблице № 1 приводится характеристика электрических свойств некоторых руд. Таблица составлена на основе результатов, полученных под руководством автора в петрофизической лаборатории ООО «Северо-Запад» [Куликов, 2013] с учетом ранее изданных монографий [Дортамин, 1992; Кобранова, 1986; Добрынин, 1991].

Таблица № 1. УЭС и поляризуемость некоторых руд.

Наименование	УЭС (Ом·м)	Поляризуемость (%)
Сульфидные медно-никелевые руды:		
Сплошные*	$n \times 10^{-1}$	20-60
Богатые вкрапленные*	1-50	10-40
Бедные вкрапленные*	10-50	3-20
Медно-колчеданные сплошные руды	$n \times 10^{-2} - n \times 10^1$	20-60
Медно-колчеданные вкрапленные руды	$n \times 10^2$	8-50

Полиметаллические сплошные руды	$5 \cdot 10^2$	5-25
Полиметаллические вкрапленные руды	$n \cdot 10^2$	5-20
Окисленные медно-колчеданные руды	$n \cdot 10^3$	0.5-2
Скарновые сульфидные руды*	$10^2 - 10^3$	3-10
Титаномагнетитовые руды*	1-20	5-50
Кимберлитовые тела (Якутия)	$10^2 - n \cdot 10^3$	3-5
Хромитовые руды	$n \cdot 10^3$	0.2-2

\* - результаты, полученные в петрофизической лаборатории ООО «Северо-Запад»

В 1998 г распоряжением Министерства природных ресурсов Российской Федерации было утверждено новое «Временное положение о порядке проведения *геологоразведочных работ по этапам и стадиям* на твердые полезные ископаемые». В зависимости от целей, процесс геологического изучения недр разделен на пять стадий:

Стадия 1. Региональное геологическое изучение недр.

Стадия 2. Поисковые работы. Геологическое изучение территории поисков, выявление проявлений и месторождений полезных ископаемых, определение целесообразности их дальнейшего изучения.

Стадия 3. Оценка месторождений. Геологическое изучение и геолого-экономическая оценка проявлений и месторождений.

Стадия 4. Разведка месторождения.

Стадия 5. Эксплуатационная разведка.

Электроразведочные методы и технологии, которым посвящена данная работа, относятся, прежде всего, ко второй и третьей стадиям, на которых осуществляется поиск и оценка месторождений полезных ископаемых. Глубинные модификации магнитотеллурических и магнитовариационных методов активно используются также при региональном изучении глубинного геологического строения недр. Метод межскважинной электротомографии, которому посвящена последняя глава диссертации, можно применять, в том числе, на четвертой стадии разведки месторождения.

Апробация электроразведочных технологий, разработанных автором с соавторами, проводилась на *месторождениях различного типа и генезиса*: магматических ликвационных месторождениях сульфидных медно-никелевых руд, коренных месторождениях алмазов, медно-порфириновых месторождениях, скарновых месторождениях, полиметаллических колчеданных и свинцово-цинковых месторождениях Рудного Алтая, месторождениях медистых песчаников, кварцево-жильных месторождениях.

На основании собственного практического опыта, автором работы была выполнена классификация предложенных в работе новых электроразведочных технологий по характеру решаемых *геологических задач для рудных месторождений различного типа*, представленная в таблице № 2.

Таблица № 2. Геологические задачи, решаемые с помощью новых электроразведочных технологий на рудных месторождениях.

Типы месторождений	Общие геологические задачи, геологические задачи для данного типа месторождений
<b>Синхронные МТ/МВ-зондирования с оцениванием параметров ГМТ</b>	
<b>Все типы месторождений</b>	<p>Построение геоэлектрической и, на ее основе, геолого-геофизической модели вмещающего разреза до глубин 1-2 км. Восстановление морфологии интрузивных образований, в т.ч. рудовмещающих.</p> <p>Картирование и изучение в вертикальном разрезе проводящих тектонических нарушений, в т.ч. рудоконтролирующих.</p> <p>Для областей с повышенной минерализацией подземных вод – определение границ, значительных по мощности, водоносных горизонтов.</p> <p>Для районов вечной мерзлоты: определение мощности криолитозоны, при ее значительной мощности (не менее 100-200 м), определение границ таликовых зон в плане и в разрезе.</p>
Магматические ликвационные месторождения сульфидных медно-никелевых руд	Если глубина залегания горизонтов сплошных и вкрапленных сульфидных медно-никелевых руд не превышает 1000 м, при отсутствии верхнего высокоомного экрана, возможно их прямое выявление и изучение, в плане и в разрезе.
Коренные месторождения алмазов	<p>При значительной мощности перекрывающих осадочных образований (&gt; 100м) - определение глубины залегания кровли кристаллического фундамента.</p> <p>Картирование обводненных зон тектонической трещиноватости, с которыми часто связаны кимберлитовые тела.</p> <p>Прямое выделение кимберлитовых тел, при существенном контрасте их УЭС, относительно УЭС вмещающих пород.</p>
Медно-порфировые месторождения	<p>Изучение, в плане и в разрезе, зон окварцевания по аномалиям высокого сопротивления.</p> <p>Построение, в плане и в разрезе, зон сульфидизации (без разделения между богатыми сульфидами и областями пиритизации) по аномалиям повышенной проводимости.</p>
Скарновые месторождения	Изучение, в плане и в разрезе, скарновых тел различного состава, при наличии контраста по УЭС между скарновыми и вмещающими породами.

Полиметаллические колчеданные месторождения	Изучение, в плане и в разрезе, зон окварцевания по аномалиям высокого сопротивления. Построение, в плане и в разрезе, зон серицитизации, хлоритизации, каолинизации, которые могут проявляться, как области пониженных значений УЭС. Прямое оконтуривание, значительных по размерам, рудных тел с высоким содержанием сульфидов (5-10%).
<b>Электротомография (ЭТ) до глубин 300-500 м</b>	
Все типы месторождений	Построение геоэлектрической и поляризационной моделей и, на их основе, геолого-геофизической модели вмещающего разреза до глубин 300-500 м. Восстановление, в плане и в разрезе, морфологии интрузивных образований, в т.ч. рудовмещающих. Для областей с повышенной минерализацией подземных вод – определение границ водоносных горизонтов по аномалиям низких УЭС. Для районов вечной мерзлоты: определение мощности криолитозоны, определение границ таликовых зон в вертикальной плоскости. Картирование и изучение проводящих тектонических нарушений, в т.ч. рудоконтролирующих.
Медно-порфировые месторождения	Изучение, в плане и в разрезе, зон окварцевания по аномалиям высокого сопротивления. Построение, в плане и в разрезе, зон сульфидизации по аномалиям повышенной проводимости и поляризуемости. При благоприятных условиях (низкий уровень промышленных помех, хорошие условия заземления) возможно разделение областей, представленных богатыми сульфидами – халькопиритом, борнитом, молибденитом и зонами пиритизации - по результатам многочастотных фазовых измерений ВП.
Коренные месторождения алмазов	Построение глубинной модели кимберлитовых тел на основе поляризационной и геоэлектрической моделей. (По статистике, промышленные алмазоносные кимберлитовые трубки обладают устойчивым повышенным параметром ВП)
Медистые песчаники	Изучение, в плане и в разрезе, горизонтов медистых песчаников по повышенным значениям вызванной поляризации. В случае, когда меденосные горизонты располагаются среди пород, обогащенных оксидами железа, для их выделения необходимо использовать результаты многочастотных фазовых измерений ВП.
<b>Многочастотные фазовые измерения вызванной поляризации в площадном варианте (ВП-СГ, ВП-ЭП)</b>	

Все типы месторождений	<p>Уточнение границ между различными геологическими комплексами под рыхлыми осадочными отложениями.</p> <p>Картирование, в плане, тектонических нарушений, по линиям максимального горизонтального градиента полей кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости.</p> <p>Картирование областей углефицированных и графитизированных пород, по сочетанию: интенсивных аномалий низких кажущихся сопротивлений (<math>n \cdot 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}</math>), высоких значений кажущейся поляризуемости (<math>n \cdot 10\%</math>), больших значений временного параметра ВП (сотни мсек – первые секунды).</p> <p>Картирование областей гидротермально измененных пород.</p> <p>Картирование областей развития многолетнемерзлых пород по аномалиям вызванной поляризации на высоких частотах.</p>
Кварцево-жильные месторождения	<p>Трассирование кварцевых жил по осям линейных аномалий кажущегося сопротивления и кажущейся поляризуемости.</p> <p>Трассирование зон сульфидизации по линейным аномалиям кажущейся поляризуемости.</p>
Скарновые месторождения	<p>Разделение, в плане, скарнов различных формаций на основе многочастотных фазовых измерений ВП.</p>
Медно-порфировые месторождения	<p>Изучение, в плане, зон сульфидного оруденения по контрастным аномалиям низких значений кажущегося сопротивления и высоких значений кажущейся поляризуемости.</p> <p>Разделение рудных зон, представленных различными ассоциациями сульфидных минералов по частотным характеристикам ВП.</p>

## Глава 2. Применение магнитотеллурических методов в задачах рудной геофизики.

### *Современные модификации магнитотеллурического метода.*

**Импедансное магнитотеллурическое зондирование (МТЗ)** изучает линейную связь между горизонтальными компонентами электромагнитного (ЭМ) поля в одной точке, выражаемую оператором импеданса  $\hat{Z}$ . В неоднородных средах анализируются тензорные амплитудно-фазовые оценки данного оператора, содержащие, даже в случае точечного зондирования, многообразную информацию о строении среды [Бердичевский, 2009].

Существенной проблемой МТ-метода является сильное искажение этих амплитудных оценок приповерхностными гальваническими эффектами, приводящими к статическому сдвигу кривых кажущегося сопротивления во всем диапазоне периодов. Для преодоления статических искажений ведется приоритетное изучение фазовых компонент импеданса [Бердичевский, 2010; Варенцов, 2012; Ernst, 2008]. Важным новым элементом этой стратегии является

переход к анализу фазового тензора импеданса  $\widehat{\Phi}[\text{Re}\widehat{Z}]^{-1}\text{Im}\widehat{Z}$ , исключающего по построению статические искажения [Caldwell, 2004].

В квази- 2D-средах ведется отдельный, либо совместный анализ кажущихся сопротивлений и импедансных фаз для двух мод ЭМ-поля: E-поляризации (с электрическим полем вдоль простирания структур) и H-поляризации (с электрическим полем поперек простирания).

Традиционная схема **магнитовариационных зондирований** (МВ) основана на изучении линейной связи между вертикальной и горизонтальными компонентами переменного геомагнитного поля, выражаемой оператором типпера  $W_z$ . Для визуализации геоэлектрических аномалий строятся индукционные векторы. Действительные векторы в конвенции Визе направлены от ярких проводящих структур. МВ-оператор практически свободен от гальванических искажений [Бердичевский, 2003].

При стандартных пятикомпонентных измерениях ЭМ-поля, целесообразно, сначала, независимо анализировать данные типпера, а затем вести совместную интерпретацию МТ- и МВ-данных, тем самым лучше подавляя статические искажения и объединяя специфические факторы чувствительности обоих методов. Такая интерпретация весьма продуктивна при изучении сложнопостроенных квази- 2D-сред [Ваньян, 1998; Варенцов, 1996].

Дальнейшее развитие комплекса МТ/МВ-зондирований предполагает определение и анализ **синхронных передаточных операторов**, простейшими из которых являются горизонтальные - теллурический ( $\widehat{T}$ ) и магнитовариационный ( $\widehat{M}$ ) - связывающие, соответственно, горизонтальные компоненты электрического и магнитного поля, одновременно измеренные в двух точках – полевой и базисной.

Метод горизонтального МВ-зондирования, использующий оператор  $\widehat{M}$ , имеет большие перспективы [Варенцов, 2012; Varentsov, 2007]. Он устойчив к гальваническим искажениям и обладает важными преимуществами, по сравнению с МВ-методом на основе типпера  $W_z$ . В частности, амплитудные и фазовые компоненты горизонтального МВ-оператора дают, в плане, отчетливые локальные аномалии над объектами низкого сопротивления и обеспечивают их уверенное картирование, в то время, как амплитуды типпера в этих областях, особенно в их центральных зонах, малы, и оцениваются не устойчиво.

Профильные и площадные системы синхронной пятикомпонентной регистрации ЭМ-полей получили в последние годы широкое распространение при решении поисково-разведочных геофизических задач [Андреева, 2000; Vubnov,

2007]. Идет становление комплексной стратегии обработки и интерпретации МТ/МВ-данных, основанной на совместном построении и анализе оценок импеданса, типпера и горизонтального МВ-оператора.

### ***Специфика рудных МТ- технологий.***

В рудной геофизике, в зависимости от эффективного электрического сопротивления вмещающей среды и требуемой глубинности исследования, магнитотеллурический метод применяется, как в стандартной широкополосной модификации, так и в более высокочастотном АМТ-варианте (аудио-МТ).

Метод АМТЗ имеет ряд преимуществ по сравнению с МТЗ. Прежде всего, резко сокращается время проведения измерений 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.

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, работы методом АМТЗ выполняются с использованием специализированной цифровой аппаратуры. Как правило, во время проведения полевых работ на одном участке используется несколько измерительных модулей. 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 аппаратных шумов. В качестве заземлений можно использовать как специальные неполяризующиеся, так и латунные электроды. 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 (азимутам  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , соответственно). В случае, когда по априорным данным известно, что исследуемый участок характеризуется явной двумерной тектоникой, датчики поля ориентируются вдоль и поперек направлений простирания геологических структур.

**Процесс обработки** записей МТ-поля можно разделить на три этапа.

На первом этапе исключаются участки записи с сильными помехами, выходами за пределы динамического диапазона. Целью второго этапа обработки является разделение МТ-поля на гармонические составляющие, по которым, затем, находятся компоненты различных передаточных функций для набора частот. Третий этап заключается в интерактивной отбраковке данных и получении гладких кривых МТЗ, используемых затем в процедурах анализа и инверсии. Он позволяет максимально подавить влияние помех на результирующие кривые МТЗ, по которым будет проводиться интерпретация.

Важным этапом интерпретации сводных массивов МТ/МВ-откликов является анализ их инвариантных параметров для определения размерности и простирания изучаемых геоэлектрических структур. Этот анализ определяет возможности и границы использования средств 1D/2D-инверсии, конкретизируют проявление в данных 3D-эффектов, локализует яркие аномалии электропроводности и дает представления о структуре вмещающей среды.

Последним этапом интерпретации является решение обратных задач для моделей различной размерности. Одномерная инверсия импедансных данных применяется для определения структуры вмещающей среды на удалении от аномалий электропроводности и для быстрого получения начальных представлений о пространственной геоэлектрической структуре в пределах всей площади зондирований.

Двумерная инверсия данных в задачах рудной магнитотеллурики имеет специфику, связанную с трехмерностью и неизометричностью изучаемых рудных объектов. Во-первых, необходимо строить модели с детальным разрешением (особенно вертикальным) до первых десятков метров. Во-вторых, приходится решать достаточно сложные задачи выбора разрезов 3D-структур, в которых строятся 2D-модели и (или) взвешивания инвертируемых данных с учетом их 3D-искаженности.

При многопрофильной, или равномерной по площади, системе зондирований, на заключительной стадии интерпретации осуществляется построение и верификация 3D-моделей рудных зон на основе синтеза результатов

1D/2D-инверсий и априорных геолого-геофизических данных [Куликов, 2006, 2007]. Применение в рудных задачах методов 3D-инверсии МТ/МВ-данных находится на начальной стадии. Их детальность пока еще очень далека от детальности 2D-методов, но идет интенсивное методическое развитие и накопление практического опыта.

***Оценка эффективности МТ/МВ-операторов, при изучении месторождений НРЗ, на основе результатов 3D-моделирования.***

Трехмерное моделирование Талнахского и Масловского рудных узлов Норильской рудной зоны (НРЗ) проводилось для оценки возможности МТ-метода по изучению глубоких рудных горизонтов. Детальные геоэлектрические модели были построены на основе результатов бурения. Для оценки чувствительности различных компонент ЭМ-поля и МТ-операторов проводилось сравнение результатов, отвечающих реальной модели месторождения, содержащей рудоносную интрузию с рудным горизонтом, и модели, где эти аномальные объекты заменены вмещающим разрезом.

Расчет прямой 3D-задачи был осуществлен с помощью программы МТ3DFwd Mackie R.L. [Mackie, 1994]. Диапазон периодов, для которых проводились расчеты: 0.01-10 с. Удельные электрические сопротивления (УЭС) вмещающего разреза задавались на основе результатов петрофизических измерений, выполненных для коллекций горных пород НРЗ [Куликов, 2010]. Влияние рудного горизонта и интрузии анализировалось по кривым кажущегося сопротивления и фазы импеданса, векторам Визе, горизонтальным компонентам магнитного и электрического полей.

По совокупности всех результатов были построены схематичные карты, показывающие чувствительность МТ/МВ-параметров к наличию в разрезе рудных тел. Пример такой карты для Талнахского рудного узла (ТРУ) приведен на рисунке 1. Максимальная чувствительность магнитотеллурических операторов характерна для южного фланга Талнахской интрузии. Наличие рудного горизонта в северной части Талнахской и Хараелахской интрузий (за исключением восточной границы Талнахского крыла) практически не влияет на характер магнитотеллурического поля.

Кроме того, результаты моделирования показали, что при глубинах залегания рудоносных горизонтов 1000 м и более, применительно к геоэлектрическому разрезу НРЗ, решить задачу по дифференциации рудного горизонта, выделению в его пределах зон повышенной проводимости и мощности рудных тел, практически невозможно.

С другой стороны, экспериментальные данные МТЗ демонстрируют более высокую чувствительность, чем это представляется по результатам математического моделирования. Выявленное противоречие можно объяснить недоучтенной ролью глубинных разломов.

Практически и теоретически доказано, что разломные зоны оказывают большое влияние на результаты магнитотеллурических измерений [Бердичевский, 1994, 1995]. Это связано с тем, что тектонические нарушения, как правило, отличаются повышенной электрической проводимостью от вмещающих пород и способствуют перетеканию избыточных токов между различными проводящими горизонтами.

Большой опыт по изучению влияния проводящих разломных зон на магнитотеллурическое поле, на сегодняшний день, накоплен в глубинной магнитотеллурике. Проводящие разломы, пересекающие высокоомную литосферу, способствуют перетеканию избыточных токов между коровыми слоями и проводящим осадочным чехлом. Благодаря их влиянию, повышается чувствительность магнитотеллурических методов к глубинным неоднородностям геоэлектрического разреза.

Похожий механизм, обеспечивающий повышение разрешающей способности МТ-методов мы имеем и в районе Норильских месторождений. В условиях геоэлектрической модели НРЗ, в качестве высокоомного экрана, выступает горизонт эффузивных пород триасового возраста. Верхним проводником служат покровные четвертичные отложения, а нижним проводящим горизонтом выступают отложения Тунгусской серии или рудные горизонты.

Продолжая работы по оценке влияния глубинных разломов на магнитотеллурическое поле при решении рудных задач, автором был построен и посчитан ряд 3D-моделей, с добавлением субвертикальных проводящих каналов.

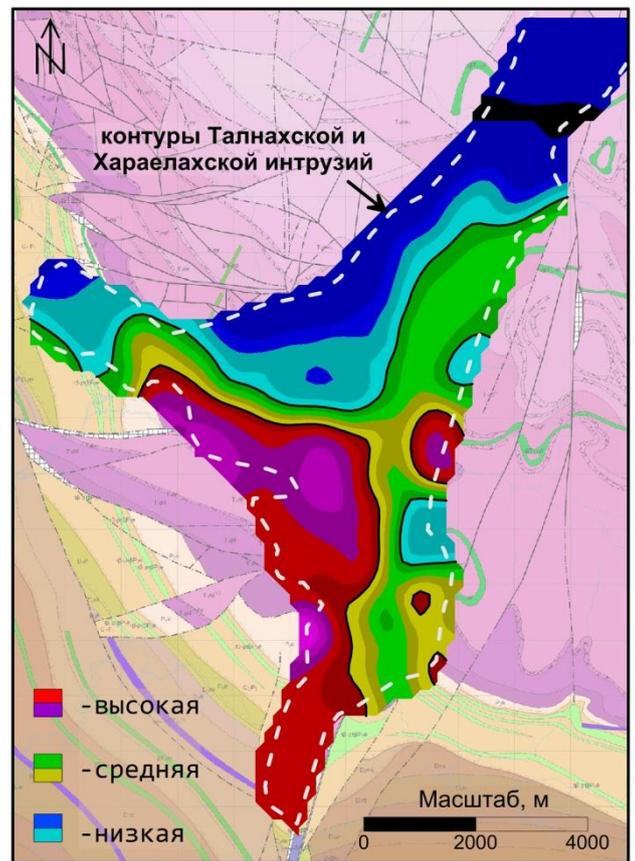


Рис. 1. Чувствительность магнитотеллурических параметров к рудным телам в пределах ТРУ.

Один из результатов приведен на рисунке 2. В качестве базовой модели был выбран характерный для Норильского района геоэлектрический разрез:

Слой 1. Сопротивление 50 Ом·м, мощность 50 м. (Четвертичные образования).

Слой 2. Сопротивление 10000 Ом·м, мощность 950 м. (Эффузивные породы Т<sub>1</sub>).

Слой 3. Сопротивление 10 Ом·м, мощность 200 м. (Тунгусская серия С<sub>2</sub>-Р<sub>2</sub>).

Слой 4. Сопротивление 1000 Ом·м. (Карбонатные породы девона – ордовика).

В пределах третьего, проводящего горизонта, расположены два квадрата с сопротивлением 0.1 Ом·м, имитирующие рудные тела и два квадрата с сопротивлением 5000 Ом·м, имитирующие интрузию. Во втором, высокоомном слое, в модель добавлены узкие (50 м) проводящие вертикальные каналы, имитирующие разломы (сопротивление 1 Ом·м).

На рисунке 2 приводится сопоставление результатов расчета прямой

трехмерной задачи для двух моделей – с разломами, и без них. Моделирование подтверждает, что при наличии разломов, аномалии становятся более контрастными, лучше локализуются границы проводящих и высокоомных тел.

В четвертом разделе второй главы приводятся примеры **решения прямых и косвенных геологических задач на рудных объектах** с использованием магнитотеллурических методик.

Для исследования региональных закономерностей в размещении месторождений полезных ископаемых, грамотного выбора геофизического комплекса и методики поисковых работ, необходимо хорошо знать **глубинное геологическое строение изучаемого региона**.

В сложнопостроенных неоднородных средах рудных провинций, возможности сейсморазведки бывают сильно ограничены. Решение обратной задачи по магнитному или гравитационному полю неоднозначно и требует

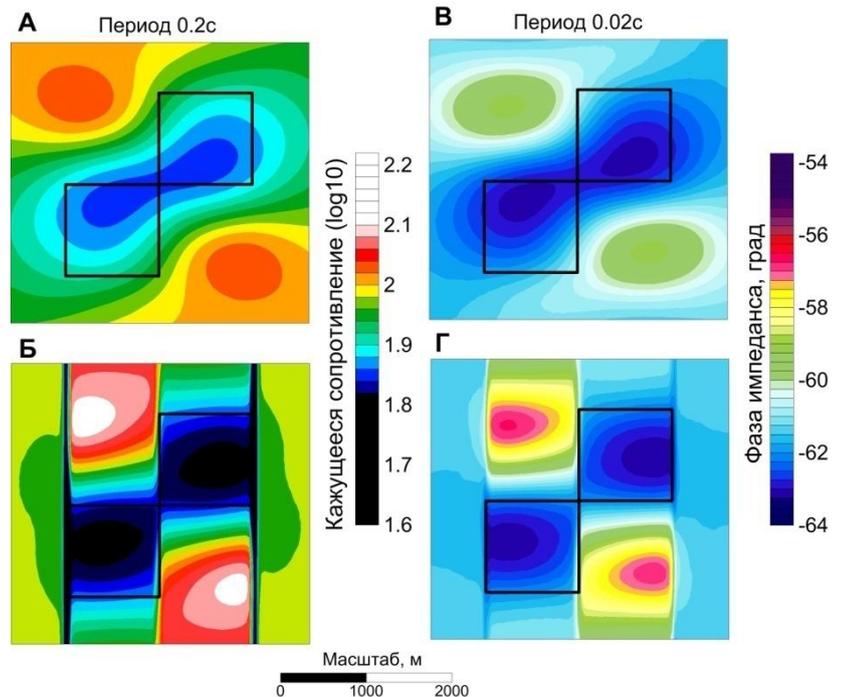


Рис. 2. Карты кажущегося сопротивления (А,Б) и фазы импеданса (В,Г) для модели без разломов (вверху) и с разломами (внизу).

существенной регуляризации с привлечением априорной информации. В случае дифференциации пород по сопротивлению, с помощью МТЗ, за счет явления скин-эффекта, мы можем восстановить геоэлектрическую модель региона до достаточно больших глубин. Используя полученную геоэлектрическую модель в качестве стартовой, можно более устойчиво проинтерпретировать данные магнитной и гравиметрической съемки.

Материалы о глубинном строении региона, в совокупности с информацией о приповерхностных структурно-фациальных условиях, могут помочь установить металлогеническую специализацию провинции и обосновать региональный прогноз размещения полезных ископаемых [Куликов, 2011].

Многие рудные месторождения имеют прямую или косвенную связь с **тектоническими нарушениями**. В некоторых случаях разломы являются основным рудоконтролирующим признаком. Например, все медно-никелевые месторождения Норильской рудной зоны приурочены к Норильско-Хараелахскому разлому. В некоторых ситуациях наличие разломных зон является одним из поисковых признаков зон оруденения.

Зоны тектонических нарушений, как правило, характеризуются более низкими сопротивлениями, чем вмещающие породы. Это связано с высокой трещиноватостью и обводненностью пород в зоне разлома. За счет повышенной проводимости можно уверенно выделять и изучать разломы с помощью магнитотеллурических методов, определять их ширину, положение верхней кромки, глубину простираения и углы падения.

Рудные месторождения эндогенного типа имеют тесную связь с **интрузивными образованиями**. Электрические свойства интрузивных образований изменяются в широких пределах и зависят от состава пород. Как правило, относительно вмещающих пород, интрузивные тела отличаются более высокими сопротивлениями. Если интрузия, или часть интрузии, содержит большое количество электропроводящих включений, то она может характеризоваться и пониженными электрическими сопротивлениями. В большинстве случаев, мы имеем благоприятные условия для изучения формы и свойств интрузивных тел электроразведочными методами.

На рисунке 3 приведен пример работ методом АМТЗ по изучению морфологии интрузивных тел в пределах Имандра-Варзугской синеклизы (Кольский п-ов).

Поисковый интерес на участке представляют интрузии габбро-верлитового комплекса, в которых установлена медно-никелевая минерализация. По

геологической позиции, размерам, характеру дифференциации, строению, метаморфизму, составу породообразующих и рудных минералов, эти интрузии близки к слабо оруденелым массивам Печенгского рудного поля [Чащин, 1998].

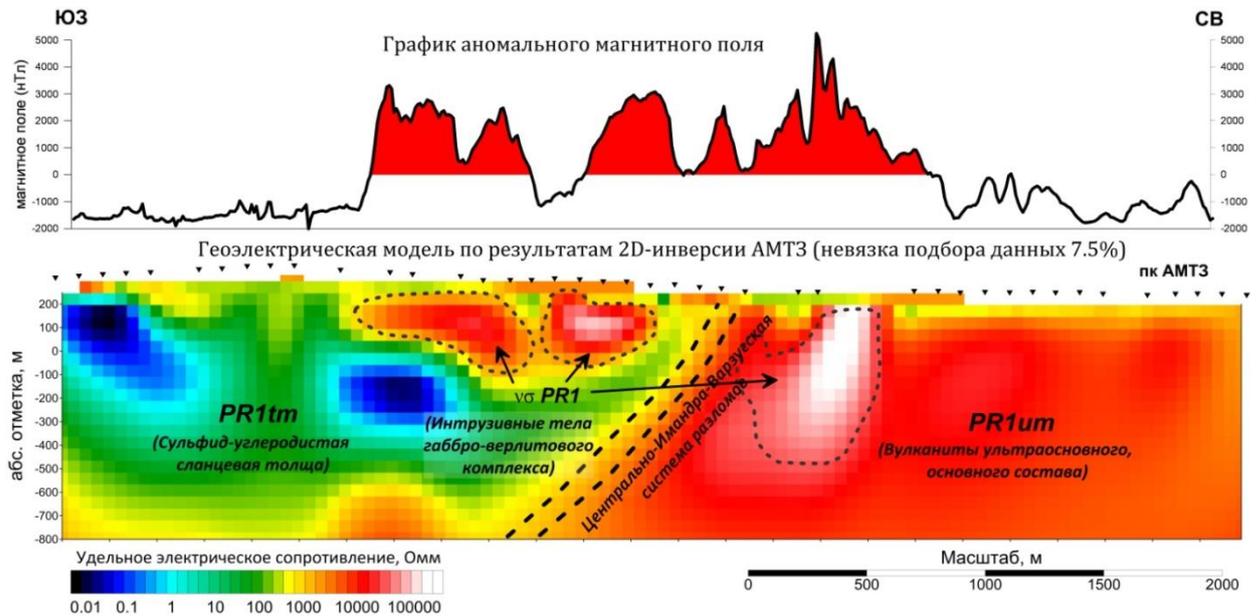


Рис. 3. График магнитного поля (вверху) и геоэлектрический разрез до глубины 1 км по результатам двумерной бимодальной инверсии АМТЗ (внизу).

На участке «Озерский» профиль АМТЗ, длиной 5 км, северо-восточного простирания, был ориентирован вкрест основным тектоническим структурам района.

Геоэлектрический разрез, полученный по результатам двумерной бимодальной инверсии магнитотеллурических данных, по уровню сопротивлений делится на две части: северную - высокоомную, и южную – низкоомную. Эта граница представляет собой северное крыло Имандро-Варзугской синклинали, и, разделяет отложения Умбинской свиты (на севере) и Томингской толщи (на юге). Сопротивление пород в пределах северной части составляет первые тысячи (до 10000) Ом·м, а в южной – опускается до десятых долей Ом·м.

Предполагаемый массив интрузий габбро-верлитового комплекса выделяется по результатам инверсии АМТЗ в виде трех отдельных тел повышенного сопротивления относительно вмещающих пород, в плане совпадающих с аномалиями магнитного поля (рис. 3). Судя по геоэлектрическому разрезу, цепочка высокоомных тел продолжается дальше на север, северо-восток.

В тех рудных областях, где коренные породы и месторождения перекрыты молодыми рыхлыми осадками, актуальными остаются задачи по **изучению состава пород складчатого основания**, выяснению структурно-тектонических условий площади, выделению рудовмещающих толщ, установлению гипсометрии

кровли фундамента. Если существуют геологические предпосылки приуроченности рудных месторождений, к тому или иному геологическому комплексу, то уточнение границ между ними становится важнейшей задачей на этапе поиска месторождений. С помощью МТЗ можно не только проследить геологические границы непосредственно под четвертичными образованиями, но и изучить их изменение с глубиной.

**Рудовмещающие метасоматиты**, как правило, характеризуются различного рода изменениями пород, которые отражаются в их физических свойствах.

Такие процессы, как серицитизация, хлоритизация, каолинизация, приводят к уменьшению магнитной восприимчивости, плотности и УЭС пород. Процессы окварцевания вызывают увеличение электрического сопротивления и понижение естественной радиоактивности пород и т. д.

На рисунке 4 приведены результаты двумерной бимодальной инверсии аудиоманнитотеллурических данных, полученных при проведении комплексных геофизических работ на медно-порфировом месторождении Баимской рудной зоны на Чукотке.

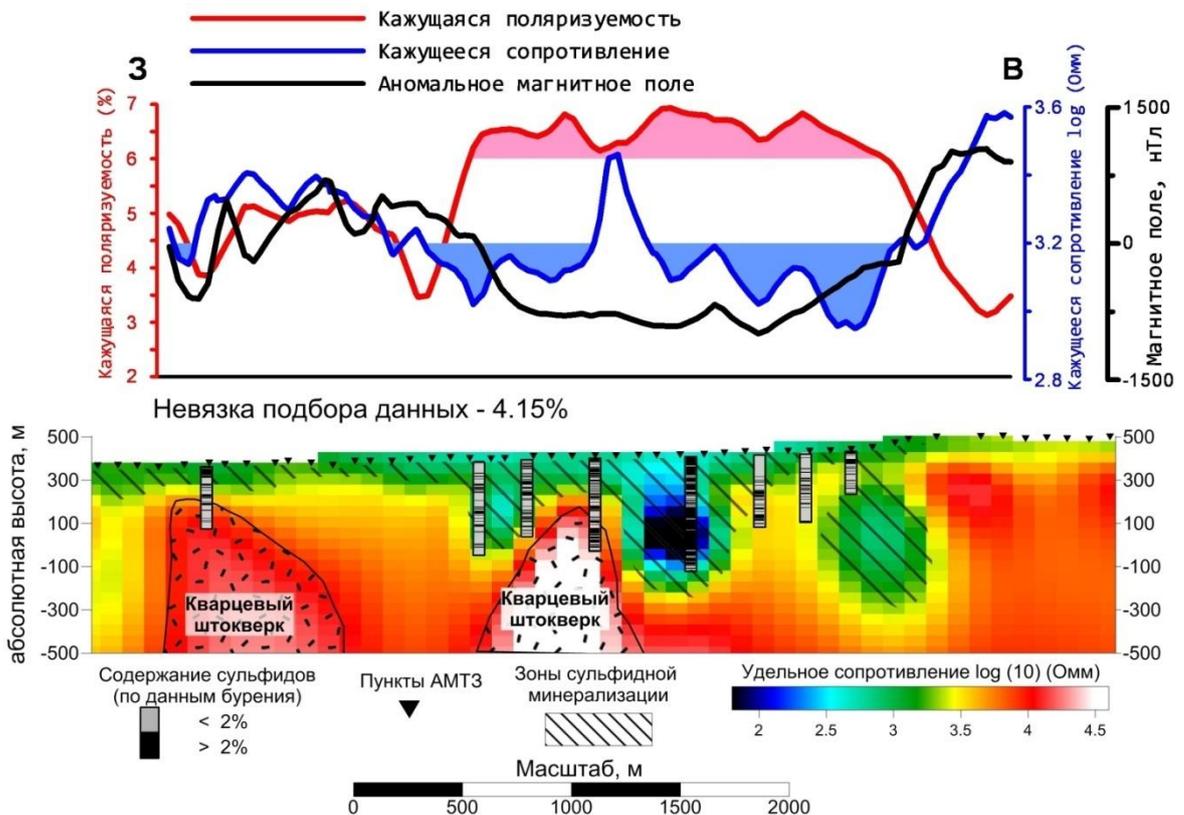


Рис. 4. Баимская рудная зона. Профиль АМТЗ через медно-порфировое месторождение. Вверху – графики кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ), кажущейся поляризуемости ( $\eta_k$ ) (по данным ВП-СТ) и аномального магнитного поля ( $\delta T$ ), внизу – геоэлектрическая модель по результатам двумерной инверсии АМТЗ.

Вмещающие верхнеюрские вулканогенно-терригенные отложения волжского яруса относятся к высокоомным породам (1000 Ом·м и более) и слабо дифференцированы по сопротивлению. Все существенные изменения УЭС в модели связаны с гидротермальными изменениями пород.

Области, характеризующиеся самыми высокими сопротивлениями (более  $10^4$  Ом·м) связаны с интенсивным окварцеванием пород [Бакшеев, 2010], области с низкими сопротивлениями (менее 200 Ом·м) отвечают зонам сульфидной минерализации. Это подтверждается результатами бурения. На геоэлектрические модели наложены результаты геохимических анализов керна. Черным цветом выделены интервалы, где суммарное содержание сульфидов в породе превышает 2%. В большинстве случаев эти интервалы совпадают с областями повышенной проводимости (рис. 4).

Пространственное расположение рудных областей или месторождений часто имеет **устойчивую связь с тектоническими зонами** или областями, характеризующимися аномальным глубинным строением.

На Украинском щите и Воронежской антеклизе, непосредственно над глубинными коровыми аномалиями электропроводности выявлены многочисленные рудные месторождения и рудопроявления.

Большинство исследователей связывает коровые аномалии электропроводности на Воронежской антеклизе с графитизированными породами. На сегодняшний день, не до конца понятна связь между присутствием в разрезе графита на глубинах 10-15 км, и железорудными и урановыми месторождениями в верхних частях кристаллического основания, однако пространственное соответствие очевидно. Таким образом, зная границы распространения коровых проводников, в комплексе с другими геофизическими результатами, можно оценивать перспективность рудоносности той или иной области. Магнитотеллурические методы были и остаются основным инструментом изучения глубинных проводников в коре.

С помощью магнитотеллурических методов возможно также **прямое выявление** и изучение **рудных зон** и залежей проводящих руд, определение их морфологии, элементов залегания. Производственный опыт автора показывает, что не только сплошные рудные образования, но и области вкрапленного оруденения выделяются по результатам МТ/МВ-зондирований.

В качестве примера прямого оконтуривания рудных тел с помощью МТ-методов ниже приведены результаты аудиомагнитотеллурических исследований, выполненных на скарновом месторождении сульфидных и магнетитовых руд в Забайкальском регионе. Месторождения локализуются на контакте интрузии кислого состава и, окружающих ее, карбонатных пород кембрийского возраста. Фоновые сопротивления вмещающих пород превышают  $10^3$  Ом·м, сопротивления в пределах развития скарнов понижаются до первых сотен и даже десятков Ом·м.

На рисунке 5а приведена геоэлектрическая модель до глубины 800 м, полученная по результатам двумерной бимодальной инверсии данных АМТЗ по одному из профилей. Выявленные области пониженного сопротивления отражают, преимущественно, границы развития скарнов, что было подтверждено последующими буровыми работами (рис. 5б).

Еще один пример прямого выделения рудных тел по данным АМТЗ на Черногорском месторождении сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд Норильской рудной зоны приведен на рисунке 6. АМТ-зондирования осуществлялись в синхронном МТ/МВ-режиме, с использованием удаленной базовой точки, вдоль нескольких профилей, ориентированных поперек простирания ультраосновной Черногорской интрузии.

Совместная 2D-инверсия импеданса и типпера по программе Варенцова И.М. велась в рамках технологии 2D+ [Варенцов, 2003, 2011], с учетом 3D-искаженности данных, осуществляемым путем увеличения погрешностей инвертируемых данных пропорционально факторам трехмерности. Для типпера инвертировались действительная и мнимая части. В качестве фазовых данных брались не фазы импеданса, а соответствующие компоненты его фазового тензора  $\hat{\Phi}$  [Caldwell, 2004]. Для

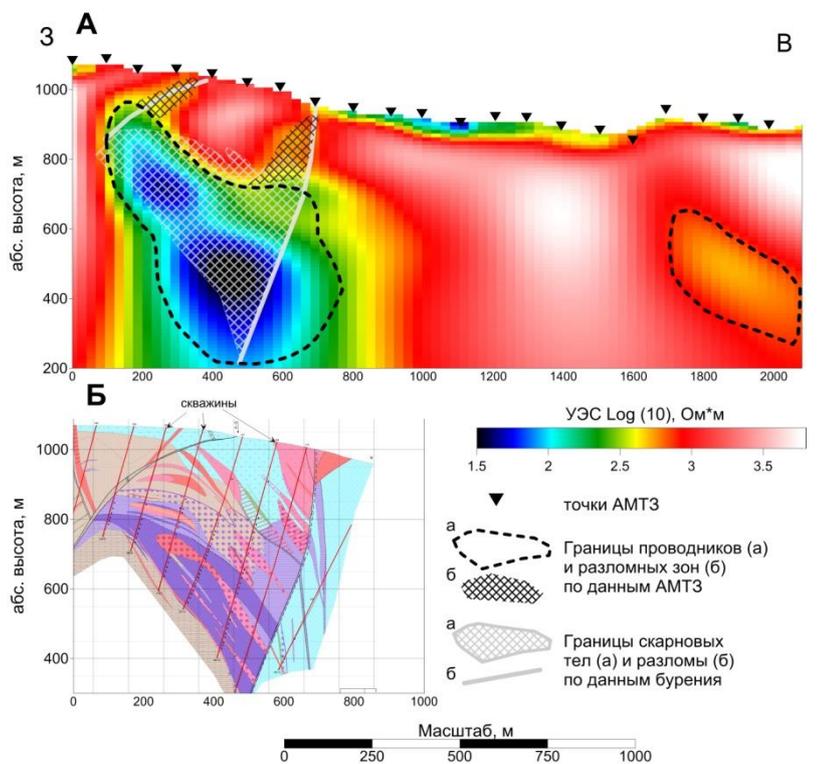


Рис. 5. Скарновое месторождение (Забайкалье).  
 А - Геоэлектрическая модель до глубины 800 м, по результатам двумерной бимодальной инверсии данных АМТЗ (невязка подбора – 4.8%).  
 Б - Геологический разрез по данным бурения.

подавления статических искажений, кажущиеся сопротивления включались в инверсию с весами, пониженными на порядок. Важным априорным параметром инверсии, определяющим структуру функционала-стабилизатора [Varentsov, 2007], являлся ожидаемый размер геоэлектрических структур, в пределах и ближней окрестности изучаемой интрузии.

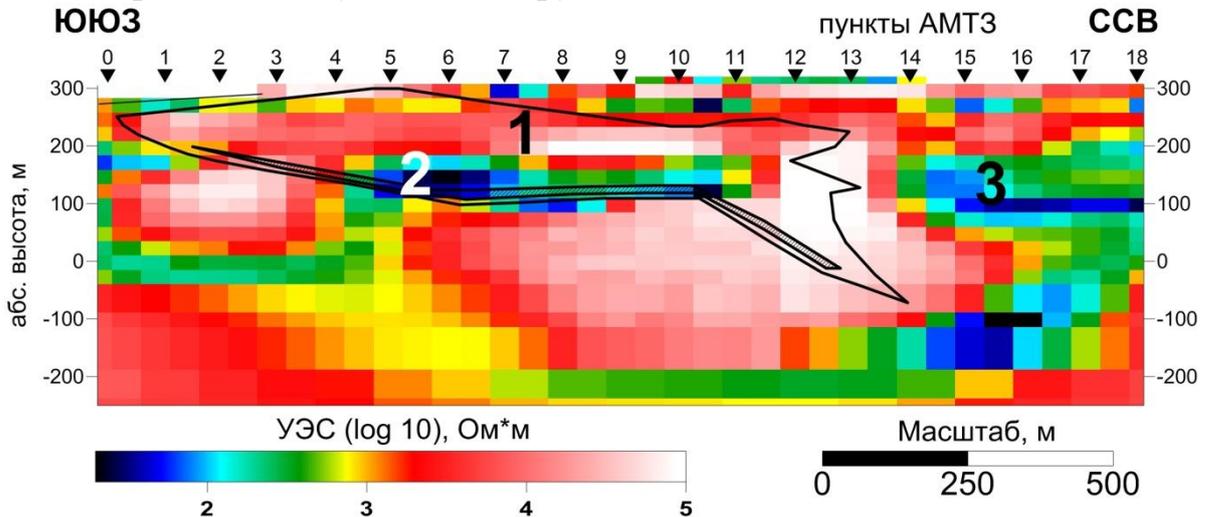


Рис. 6. Разрез УЭС по профилю АМТЗ по результатам 2D-инверсии бимодального импеданса и типпера; 1 – высокоомная часть интрузии, 2 – рудный горизонт, 3 – графитизированные породы Тунгусской серии.

Полученная модель отчетливо выделяет высокоомную интрузию, проводящие структуры за ее пределами и проводящую структуру, в основании интрузии, ассоциируемую с рудным телом. Результат совместной инверсии двух импедансных мод и типпера, наилучшим образом согласуется со структурой интрузии и рудного тела, определенной бурением, и демонстрирует реальное соотношение сопротивлений интрузии ( $10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) и рудного тела ( $n\cdot 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).

Абсолютные невязки наблюдаемых и модельных данных, в последней инверсии, достаточно малы - их медианы для импедансных фаз имеют величину менее  $2^\circ$ , а для компонент типпера (Re и Im) составляют 0.06 и 0.03, соответственно.

### **Выводы к главе 2.**

Перспективы технологий рудной магнитотеллурики связаны, в первую очередь, с глубоким внедрением синхронной методики МТ/МВ-зондирований и развитием методов интерпретации, с акцентами на совместный анализ многокомпонентных ансамблей данных, учета их трехмерности, вплоть до полной 3D-инверсии, а также тонкий учет априорных сведений.

Важную роль играет совершенствование регламента полевых работ, с целью повышения глубины оперативного контроля качества данных, до уровня анализа,

непосредственно на точке зондирования, предварительных оценок импеданса и типпера, а также их важнейших трансформант, включая простейшие 1D-модели среды.

Следующей важной задачей является отработка сценариев совместного применения магнитотеллурики с другими геофизическими методами, при поисках определенных видов месторождений в специфических условиях конкретных рудных провинций.

### **Глава 3. Использование частотных характеристик дифференциального фазового параметра для разбраковки аномалий вызванной поляризации.**

#### *Дифференциальный фазовый параметр.*

Изучение временных (частотных) характеристик процесса вызванной поляризации (ВП), для получения дополнительной информации о природе поляризующихся объектов, сегодня является одним из приоритетных направлений в электроразведке. Скорость и длительность процесса ВП является дополнительным, независимым параметром, который позволяет нам отделить аномалии ВП, связанные с различными ассоциациями сульфидных руд, от аномалий, создаваемых углефицированными и графитизированными, магнетитсодержащими породами, мерзлыми осадочными породами и т.д.

В 60-70 годах прошлого столетия в СССР была разработана методика фазово-частотных измерений вызванной поляризации (ИНФАЗ-ВП) с использованием дифференциального фазового параметра (ДФП).

Использование дифференциального фазового параметра (1) было предложено [Куликов А., 1978] для борьбы с явлениями электромагнитной индукции, которые, как и вызванная поляризация, могут приводить к значительным фазовым сдвигам сигнала.

$$ДФП = \frac{\varphi(\omega_1) \cdot \omega_2 - \varphi(\omega_2) \cdot \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \quad (1)$$

Применение ДФП основано на том, что в области малых параметров поля фаза индукции прямо пропорциональна частоте. Дифференциальный фазовый параметр построен таким образом, что он полностью подавляет линейную компоненту фазы, не меняя постоянной составляющей.

ДФП давно и успешно применяется на практике для обнаружения и изучения эффектов ВП. Если в токовой линии используется «меандр» - разнополярные прямоугольные импульсы, то ДФП можно рассчитать по фазам 1-ой и 3-ей гармоник измеренного сигнала:

$$\text{ДФП}(\omega, 3\omega) = \frac{3\varphi(\omega) - \varphi(3\omega)}{2} \quad (2)$$

Кроме того, ДФП определяется однозначно и устойчиво, поэтому его частотная характеристика (ЧХ) может быть использована для классификации пород, наравне со скоростью спада ВП во временной области.

Значения ДФП часто пересчитывают в кажущуюся поляризуемость ( $\eta_{\text{к}}^{\text{ДФП}}$ ), умножая на эмпирический коэффициент  $\kappa = -2.5$ . Это является скорее данью традиции, так как позволяет перевести полученные данные из размерности градусов фазы в более привычную, для методов ВП, размерность процентов поляризуемости [Куликов, 2013].

Наиболее простым и распространённым формализованным представлением зависимости сопротивления поляризующейся среды от частоты является, так называемая, обобщенная формула Cole-Cole [Cole, 1941]:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - \eta \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right] \quad (3)$$

Где  $\rho_0$  - сопротивление на постоянном токе,  $\eta$  - поляризуемость,  $\tau$  - постоянная времени и  $C$  – показатель степени. Эти постоянные зависят от целого набора литологических параметров среды, и их знание позволяет делать выводы о составе изучаемой породы, пористости, степени однородности и т.д.

Для наглядного сравнения на рисунке 7 приведены графики фазы ВП, описываемой моделью Cole-Cole, и соответствующие им графики ДФП, рассчитанные с помощью формулы (2).

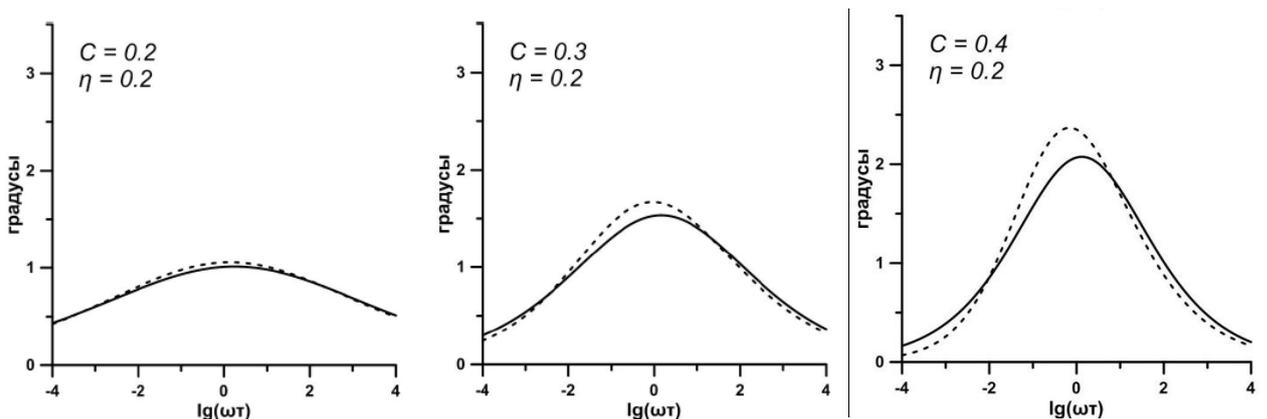


Рис. 7. Графики фазы ВП, описываемой моделью Cole-Cole (сплошная линия), и соответствующие им графики ДФП (пунктирная линия).

Из приведенного рисунка видно, что при малых значениях параметра  $C$  кривая фазы ВП практически совпадает с кривой ДФП. С ростом  $C$  растет кривизна графика фазы ВП, что приводит к большему расхождению последнего с соответствующим ему графиком ДФП. При этом кривая ДФП всегда получается

несколько более «контрастной» - с большим значением максимума и более крутыми склонами.

Таким образом, оператор ДФП может быть успешно применен, как при измерениях независимой от частоты фазы вызванной поляризации, так и для дифференциации пород, различающихся по стандартным параметрам спектрального ВП. При этом, в силу большей контрастности, кривая ДФП может оказаться даже более информативной, чем непосредственно кривая фазы ВП, что, с учетом высокой устойчивости получаемых данных и возможности подавления индукционной помехи, делает дифференциальный фазовый параметр мощным инструментом низкочастотной электроразведки [Зорин, 2014].

В качестве простого и надежного способа оценки временных характеристик вызванной поляризации можно использовать разность значений ДФП на двух частотах. Учитывая, что графики ЧХ ДФП практически симметричны, рабочие частоты можно подобрать таким образом, чтобы разница двух ДФП, рассчитанных на этих частотах, принимала отрицательное значение, над одной породой, и положительное, над другой. Полученный параметр будет характеризоваться практически линейной зависимостью с временным параметром  $\tau$  (рис. 8).

Этим свойством  $\Delta\varphi$  хорошо пользоваться, например, для разделения аномалий от углефицированных пород, характеризующихся большими значениями  $\tau$ , и сульфидных руд, обладающих, как правило, быстрым спадом вызванной поляризации [Куликов, 2011].

В случае, если необходимо выделить аномалии ВП, характеризующиеся определенным параметром постоянной времени, то возможно использование более сложных разностных алгоритмов. Например,

параметр  $2\Delta\varphi(\omega_2) - \Delta\varphi(\omega_1) - \Delta\varphi(\omega_3)$ , представляющий, по сути, полосовой фильтр,

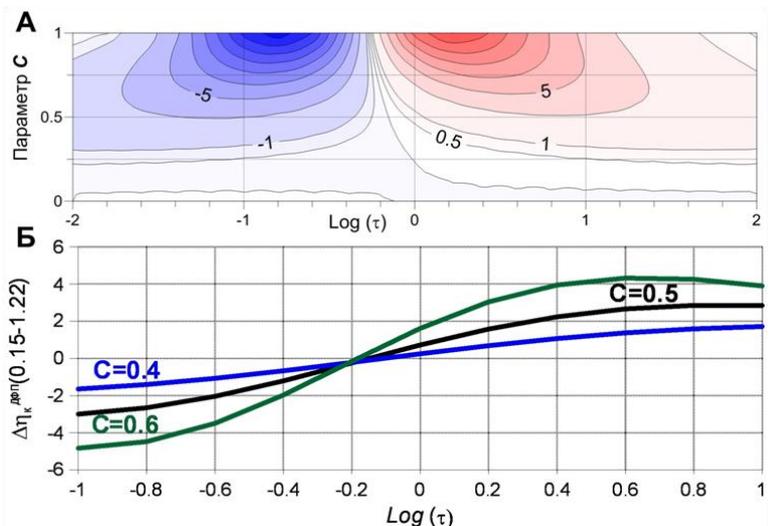


Рис. 8. А) Карта разности  $\Delta\eta_{\kappa}^{\text{ДФП}}$  на частотах 0.15 Гц и 1.22 Гц над однородным поляризуемым полупространством в зависимости от параметров  $\tau$  и  $C$  ( $\eta=20\%$ ).  
Б) Графики зависимости  $\Delta\eta_{\kappa}^{\text{ДФП}}$  от  $\tau$  при различных параметрах  $C$ .

может быть с успехом применен для выделения пород с определенным значением  $\tau$  из общей среды, со всеми неизвестными параметрами Cole-Cole.

Для обоснования интерпретации результатов многочастотных измерений фазовым методом вызванной поляризации, в компании ООО «Северо-Запад», под руководством автора, была создана лаборатория для измерения петрофизических свойств образцов горных пород, прежде всего, скальных пород рудных месторождений. Больше всего, внимание, при лабораторных измерениях, уделяется изучению частотных зависимостей ДФП. За время существования лаборатории комплексные петрофизические измерения были выполнены более чем на 1000 образцов керна из разных рудных месторождений.

### ***Примеры площадных работ методом ИНФАЗ-ВП.***

В четвертом разделе третьей главы приводятся примеры площадных работ методом ИНФАЗ-ВП на этапе поисковых и оценочных работ на рудных месторождениях.

#### **Выявление локальных рудоносных интрузий в областях развития углеродистых сланцев**

Работы проводились в пределах северо-восточного борта Имандра-Варзугской синеклизы (Кольский п-ов). Участок площадных электроразведочных работ находится в зоне контакта между высокоомными метавулканидами Умбинской свиты мела ( $K_1^3um$ ), на северо-востоке, и толщей проводящих сульфидно-углеродистых сланцев Соленоозерской свиты ( $K_2^1so$ ) на юго-западе (рис. 9). Поисковый интерес представляют интрузии габбро-верлитового комплекса с медно-никелевой минерализацией, локализованные, как правило, в проводящей Соленоозерской толще [Чащин, 1998].

Сульфидно-углеродистые сланцы создают в поле кажущейся поляризуемости ( $\eta_k^{ДФП}$ ) широкие линейные аномалии северо-западного простирания, совпадающие с простиранием основных тектонических структур (рис. 9а). Над вулканидами Умбинской свиты уровень  $\eta_k^{ДФП}$  понижается до 1-2%.

По результатам двухчастотных измерений (0.3 Гц и 1.22 Гц) была построена карта разности  $\Delta\eta_k^{ДФП}$ . В юго-западной части площади работ, в пределах Соленоозерской свиты, параметр  $\Delta\eta_k^{ДФП}$  характеризуется положительными значениями 0-0.5%. Северо-восточный фланг участка, где развиты эффузивные породы основного и ультраосновного состава, характеризуется слабоотрицательными значениями двухчастотного параметра. Причиной вызванной поляризации здесь является первичный магнетит, содержащийся в изверженных породах.

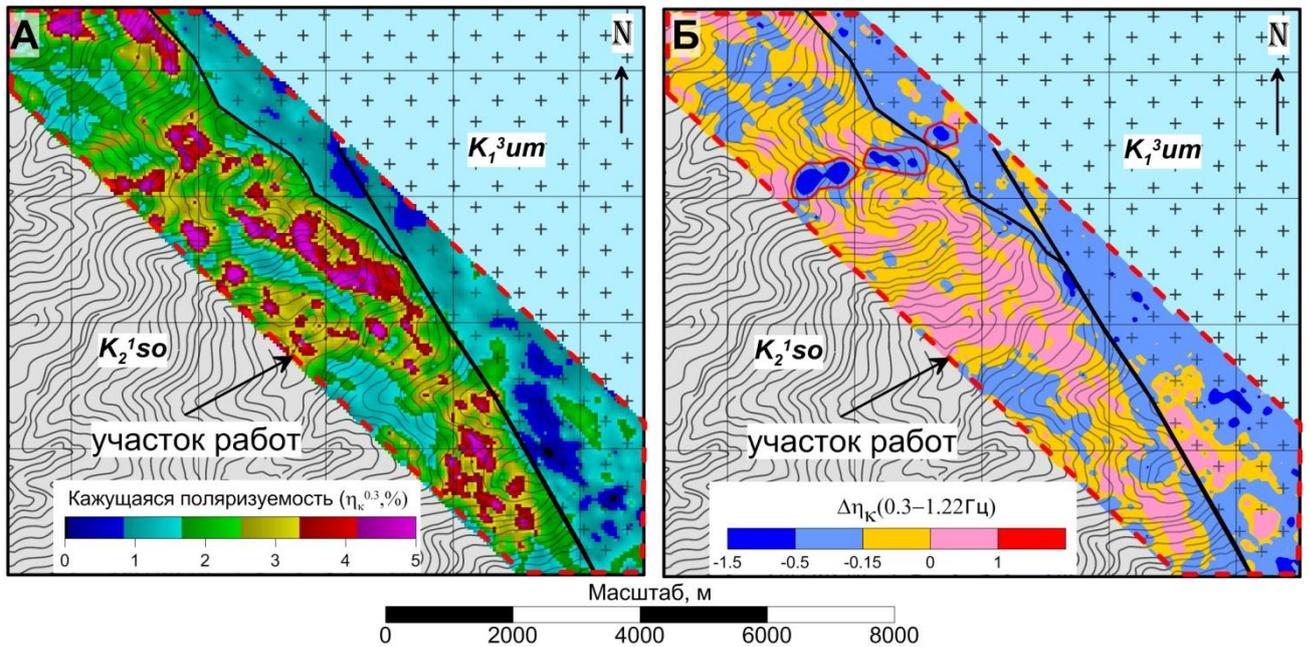


Рис. 9. Участок «Соленоозерский». А) Карта  $\eta_k^{D\Phi\Pi}$  (частота 0.3 Гц).  
 Б) Карта параметра  $\Delta\eta_k^{D\Phi\Pi}$  (0.3-1.22 Гц).

В центре участка, в пределах сульфидно-углеродистой толщи, была выделена локальная аномалия отрицательных значений параметра  $\Delta\eta_k^{D\Phi\Pi}$  (выделена на рисунке 9Б темно-синим цветом). Характерной особенностью этой аномалии является субширотное простирание, не совпадающее с простиранием основных тектонических структур. По результатам бурения здесь был вскрыт массив плагиоклазовых оливинсодержащих пироксенитов. Важной особенностью пироксенитов является большое количество магнетита и титаномагнетита. Количество рудного минерала достигает 20-30%. В редких случаях, встречается и медно-никелевая минерализация, представленная халькопиритом и пентландитом.

### **Электротомография с использованием методики ИНФАЗ-ВП.**

Пятый раздел третьей главы посвящен применению глубинной модификации электротомография с использованием методики ИНФАЗ-ВП при решении рудных задач.

В последние годы классические модификации метода сопротивлений (ВЭЗ, ДЭЗ) все чаще заменяются электротомографией (ЭТ) – комплексом, включающим в себя, как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных для неоднородных сред. Интерпретацию данных ЭТ проводят в рамках двумерных моделей с помощью специальных алгоритмов двумерной инверсии [Бобачев, 2006].

Для проведения работ методом электротомографии разработаны специальные многоэлектродные станции: Syscal-Pro (Iris Instruments, Франция);

АВЕМ (Terrameter, LUND Imaging System, Швеция); ОМЕГА-48 (Логис, Москва), СКАЛА-48 (ИНГГ, Новосибирск) и др. Электроды соединяются со станцией с помощью специальной электроразведочной косы и могут использоваться, как в качестве приемных, так и в качестве питающих. Многоканальные системы измерений обеспечивает высокую технологичность работ, но имеют ряд ограничений.

Максимальная глубинность исследований со стандартными станциями для электротомографии составляет 100-150 м. Это ограничение связано с максимальной длиной и весом измерительных кос. Кроме того, многожильные кабели имеют ограничения по значениям используемого тока. За счет того, что приемные и питающие линии совмещены, измерения кажущегося сопротивления и ВП возможны только во временной области.

Таким образом, если требуемая глубина исследования составляет более 100-150 м, многоэлектродные системы оказываются неэффективными и применяются другие методики полевых наблюдений.

Для решения рудных задач автором с соавторами были разработаны специальные несимметричные установки, где используется питающий диполь большой длины (200-800 м), и, приемные линии, изменяющиеся от 10-20 м на малых разносах, до 200-800 м на максимальных разносах. Шаг по профилю, в этом случае, составляет одну-две длины минимальной приемной линии. Такая установка позволяет исследовать, как малые, так и большие глубины, при одной длине питающего диполя. На малых разносах, такая установка соответствует трехэлектродной установке Шлюмберже - влияние дальнего питающего электрода незначительно, на больших разносах получается обычная дипольная осевая установка, на средних разносах - несимметричная четырехэлектродная установка.

Оценка разрешающей способности и чувствительности разработанных установок была выполнена на синтетических моделях, имитирующих рудные тела различного размера и характера залегания.

Далее в работе приведены **примеры полевых работ** по методике **глубинной электротомографии** на различных рудных объектах.

Первый пример относится к работам, выполненным в пределах Кингашского рудного узла, который расположен на северо-западном замыкании Восточного Саяна.

Среди вмещающих метаморфических образований Караганской серии установлены многочисленные, различные по размерам, массивы базит-ультрабазитов, относимые к Кингашскому габбро-верлит-дунитовому комплексу.

С массивами Кингашского комплекса генетически связано медно-никелевое оруденение.

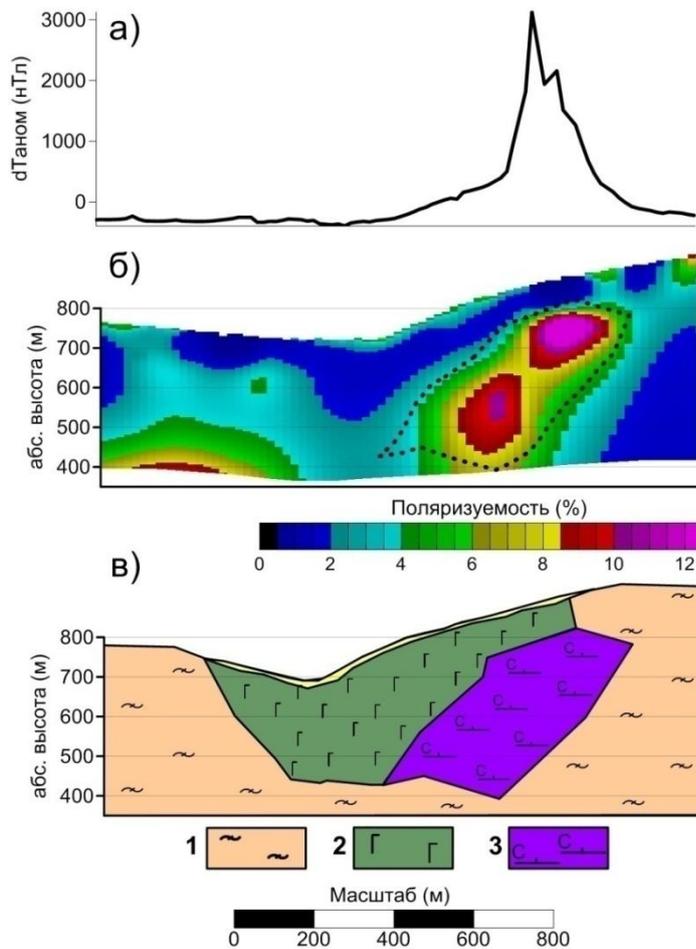


Рис. 10. Кингашский массив.  
 а) График аномального магнитного поля;  
 б) Поляризационная модель;  
 в) Схематический геологический разрез.  
 1- гнейсы, 2 – габбро, 3 – перидотиты  
 оруденелые и серпентинизированные.

ультрабазиитами по результатам бурения (рис. 10).

Уникальные результаты методом глубинной электротомографии были получены на месторождении **медистых песчаников Удокан** в Забайкальском крае.

Удоканское месторождение меди расположено в центральной части Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны. Основной структурной единицей месторождения является Намингинская брахисинклираль. Ядро складки сложено метаморфизованными терригенными образованиями Намингинской свиты, а крылья - кварцевыми песчаниками Сакуканской свиты. В плане, брахисинклираль

Двумерная инверсия данных электротомографии была выполнена с использованием программы ZondRes2D (Каминский). На итоговых глубинных разрезах, полученных вдоль профиля электротомографии, пересекающего Кингашский массив, на абсолютных отметках ниже 750 м, выделяется аномальное тело, отвечающее зоне сульфидной минерализации.

По уровню УЭС аномалия слабоконтрастная - сказывается большая глубина залегания объекта и влияние обводненных тектонических зон. Область аномальных значений поляризуемости ( $\eta > 10\%$ ) практически полностью повторяет контуры рудоносной части массива, представленной серпентинизированными

образует эллипс размером 10 км × 15 км. Максимальная амплитуда прогиба достигает 1500 м [Володин, 1982].

Кварцевые песчаники Сауканской свиты обогащены магнетитом и мартитом. Породы, содержащие медную минерализацию, слагают выдержанные горизонты в пределах верхней подсвиты. Мощность рудной пачки изменяется от 20 м до 330 м. Мощность надрудной пачки песчаников составляет 100-150 м.

Месторождение расположено в зоне развития многолетней мерзлоты. По долинам рек широко развиты таликовые зоны. Именно эти процессы отвечают за уровень УЭС пород. Аномалии ВП в районе месторождения могут быть связаны либо с горизонтами и прослоями песчаников, обогащенных магнетитом и мартитом, либо с сульфидной минерализацией в пределах меденосного горизонта.

Результаты предыдущих геофизических работ показали, что мартитовые песчаники характеризуются более высокими значениями ВП, чем меденосный горизонт. Кроме того, мощность горизонтов мартит-содержащих песчаников существенно превышает мощность рудного горизонта. Практически неполяризующимися являются отложения Намингинской свиты, представленные осадочными породами - алевролитами, аргиллитами и песчаниками.

Для получения глубинной модели месторождения были выполнены работы методом ЭТ по отдельным профилям, пересекающим Намингинскую синклираль с несимметричной осевой установкой. Так как глубина залегания песчаников в центральной части синклинали превышает 1000 м, размеры установки превысили 4000 м, при длине питающей линии 600 м.

На рисунке 11 представлена поляризационная модель, полученная по одному из профилей, пересекающих синклираль, до глубины 1 км. Под поляризационной моделью построен схематичный геологический разрез. Ядро Намингинской складки, представленное терригенными осадочными отложениями, выделяется на разрезе низкими значениями поляризуемости. Первый поляризующийся горизонт от поверхности и самая контрастная граница – кровля мармитовых песчаников надрудной пачки. Если учесть, что мощность надрудной пачки выдержана в пределах месторождения, то, по максимальному значению градиента поляризуемости, можно прогнозировать кровлю меденосного горизонта с точностью около 100 м.

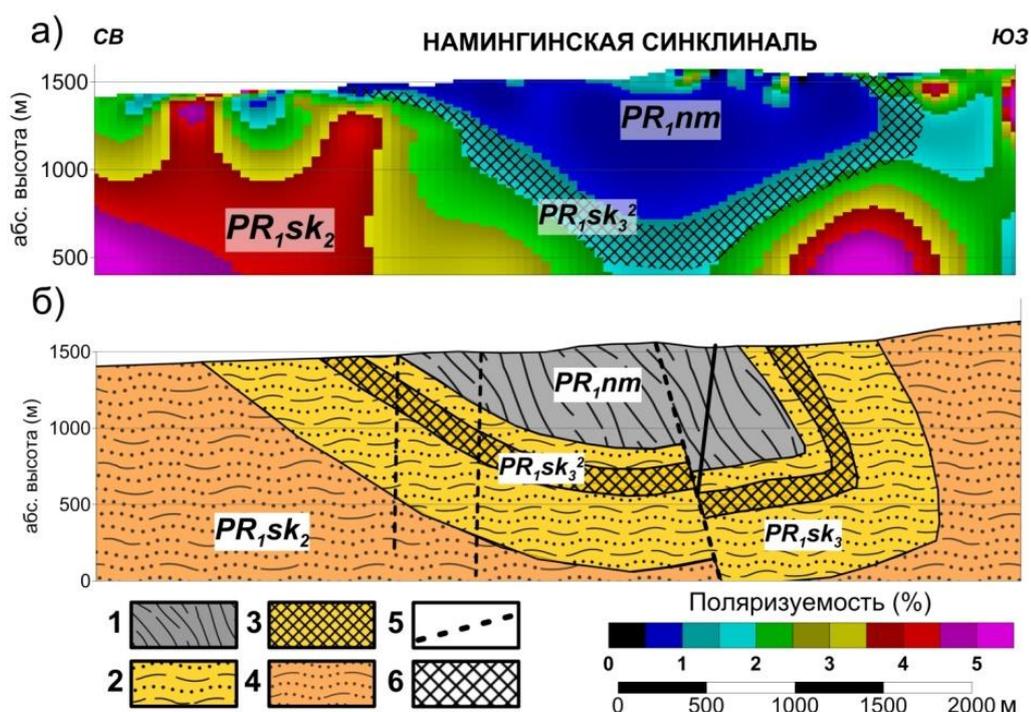


Рис. 11. Месторождение Удокан. а) Поляризационная модель до глубины 1 км по результатам электротомографии. б) Схематичный геологический разрез: 1 - Намингинская свита; 2 - верхняя подсвита Сакуканской свиты; 3 - рудная пачка (медистые песчаники), 4 - средняя подсвита Сакуканской свиты (магнетитсодержащие песчаники); 5 - разрывные нарушения; 6 – предполагаемые границы объединенной рудной и надрудной пачки пород по результатам ЭТ.

Полученные на месторождении Удокан результаты являются уникальными для электроразведки, так как, по результатам электротомографии, построены геоэлектрические и поляризационные модели крупного трехмерного объекта до глубин около 1000 м.

### Выводы к главе 3.

На практике, существует много способов оценки скоростных характеристик вызванной поляризации. При временном режиме измерений вычисляется приведенная скорость спада поля ВП, или время максимума производной переходной характеристики. При проведении измерений в частотной области можно определить, используя формулу Cole-Cole, постоянную времени ВП -  $\tau$ , или анализировать разность значений дифференциального фазового параметра (ДФП) на нескольких частотах. Информация, получаемая при этих разных способах измерений, по сути, равноценна. Мы имеем дополнительный параметр среды, который наравне с кажущимся сопротивлением и кажущейся поляризуемостью, можно использовать при последующем геологическом истолковании геофизических результатов.

Многочастотный анализ ДФП имеет ряд технических преимуществ перед другими методиками. Во-первых, фазовые измерения позволяют добиться более высокой точности результатов. Во-вторых, дифференциальный фазовый параметр существенно подавляет фазовые сдвиги, связанные с явлениями электромагнитной индукции, что особенно важно при работе на больших разносах.

Кроме того, минимум ЧХ ДФП, для наиболее распространенных поляризующихся пород – углефицированных сланцев, сульфидных руд и т.д., располагается, как правило, в пределах ограниченного диапазона средних частот, который используется при частотных измерениях вызванной поляризации (примерно 0.1 Гц - 5 Гц).

Дифференциальный фазовый параметр (ДФП) имеет простую связь с параметрами формулы Cole-Cole. Увеличение постоянной времени  $\tau$  приводит к смещению минимума ДФП в область низких частот, а его ширина зависит от значения степенного параметра  $C$ .

Для качественного разделения аномалий ВП можно использовать разность значений ДФП на двух частотах. При средних значениях параметра  $C$  равных от 0.4 до 0.6, корреляция, между этим параметром и постоянной времени  $\tau$ , будет близка к линейной.

Получая дополнительный параметр, в виде разности ДФП на нескольких частотах, можно, при определенных благоприятных условиях, разделять аномалии вызванной поляризации от углефицированных и магнетитсодержащих пород, различных ассоциаций сульфидных руд, аномалий, связанных с капиллярной каймой грунтовых вод и т.д.

Приведенные в работе результаты электротомографии на известных рудных месторождениях показывают, что используя современные методики, можно получать устойчивые геоэлектрические и поляризационные модели для сложнопостроенных сред. Используя большие установки, с разносами до 2000-3000 м, удастся добиться глубин исследования в несколько сотен метров. При использовании установок с разнесенными питающей и приемными линиями, можно работать на переменном токе, не опасаясь емкостных утечек и индукционных наводок с питающей линии на приемную.

На этом этапе, также можно проводить многочастотные измерения ДФП с последующим разделением поляризационного разреза по частотным характеристикам ВП. Это направление, объединяющее методики

электротомографии и ИНФАЗ-ВП, является сегодня приоритетным направлением развития.

#### **Глава 4. Межскважинная электротомография (МЭТ) на этапе разведки и освоения месторождения.**

В практике наземных геофизических работ широкое применение получили методы электрических зондирований с использованием многоэлектродных измерительных систем, которые можно объединить под общим названием - электротомография (ЭТ). Основные принципы ЭТ, различные методики измерений, изложены в публикациях и отдельных монографиях, вышедших как в России, так и за рубежом [Бобачев, 2006; Loke, 1999].

Практически одновременно, с наземными вариантами ЭТ, в практике геофизических работ стали применяться межскважинные измерения с использованием многоэлектродных приемных линий. За рубежом такая методика работ, чаще всего, обозначается как Borehole Resistivity Tomography (BRT).

Методика измерений методом МЭТ в большинстве случаев схожа. В обе скважины опускают косы, которые подключаются к электроразведочной станции с коммутирующим устройством. Кроме того, в схему наблюдений можно добавлять косы, расположенные на поверхности Земли (рис. 12). Используя коммутатор, проводят измерения, перебирая возможные положения приемных и питающих электродов. Проведение большого числа измерений, при различных положениях питающего электрода, позволяет применять автоматическую инверсию для определения распределения удельного сопротивления в межскважинном пространстве. Отметим, что при таком подходе нет ограничений по контрасту изучаемого объекта, и можно проводить исследования при неоднородном вмещающем разрезе.

Проведение МЭТ при изучении объектов, залегающих на больших глубинах с использованием многожильных линий, сопряжено со многими техническими трудностями. Автор с соавторами предложили методику межскважинных измерений, которая, с одной стороны, использует относительно небольшое число положений питающих и приемных электродов, а, с другой стороны, позволяет получить данные, пригодные для использования аппарата двумерной инверсии.

Измерительный комплекс включает в себя:

а) Межскважинные измерения. Один питающий электрод, или питающий диполь, расположен в скважине выше, ниже, или внутри, рудного тела. Приемные диполи располагаются во второй скважине, выше и ниже рудного тела (рис. 12а);

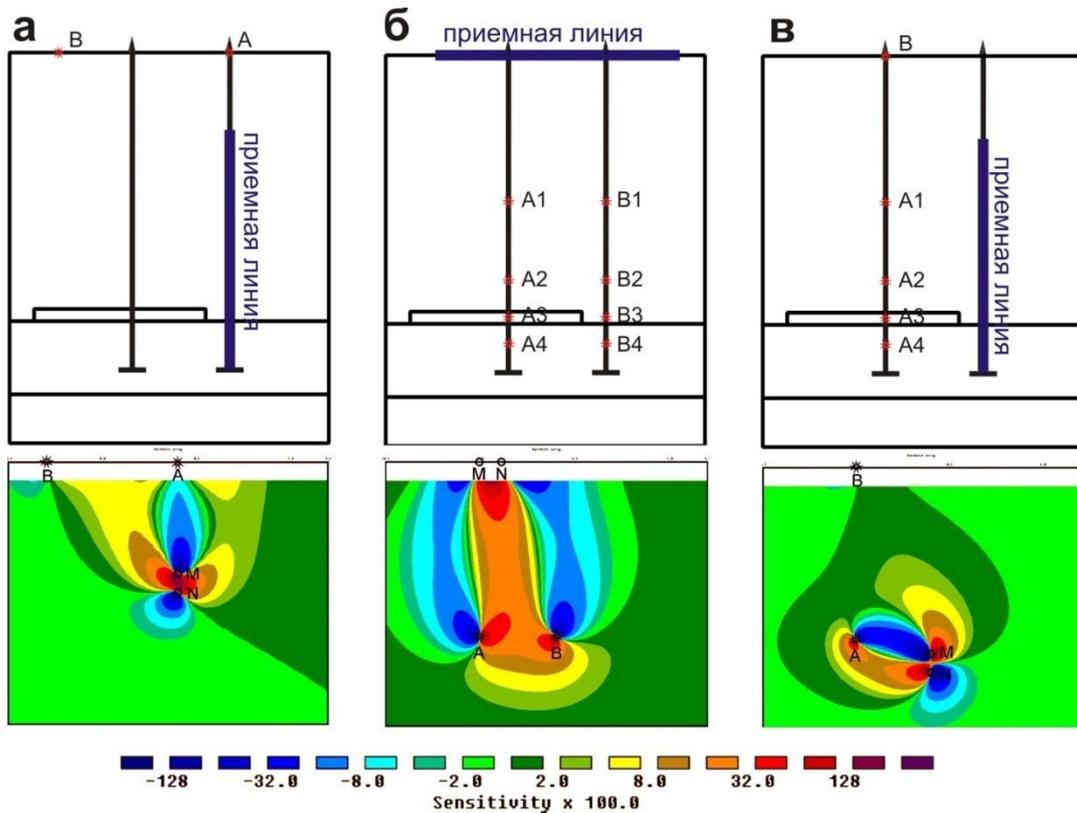


Рис. 12. Установки межскважинной электротомографии (вверху). Чувствительность установки к изменению удельного сопротивления (в у.е. [Loke, 1999]) для одного положения электродов (внизу).

б) Измерения скважина-поверхность. Питающие электроды расположены в различных скважинах на одинаковой глубине. Приемные диполи располагаются на поверхности (рис. 12б);

в) Измерения поверхность-скважина. Питающие электроды расположены на поверхности. Один - у устья скважины, другой на большом расстоянии от скважины. Приемные диполи располагаются в скважине (рис. 12в).

Во втором разделе четвертой главы описаны результаты расчетов по **оценке чувствительности и разрешающей способности метода МЭТ** для решения типичных рудных задач на основе математического моделирования.

Третий раздел четвертой главы посвящен **результатам полевых измерений методом МЭТ, выполненных на одном из месторождений НРЗ**.

По методике, разработанной автором, компания ООО «Северо-Запад» провела работы методом МЭТ на южном фланге интрузии Норильск-1.

Юго-восточное крыло интрузии Норильск-1 залегает в низах туфолавовой толщи, по границе последней с осадочными терригенными породами Тунгусской серии. В продольном разрезе, интрузия представляет собой пластообразное тело с глубокими прогибами дна. Глубина залегания ее подошвы колеблется в пределах: от 430 м до 1174 м, мощность на участках раздува достигает 340 м.

Сульфидное медно-никелевое оруденение локализуется, преимущественно, в нижних горизонтах интрузии и нижних контактовых габбро-долеритах. Внутреннее строение рудных зон достаточно сложное и обусловлено весьма неравномерным распределением сульфидов, а также непостоянным минералогическим составом рудного вещества.

Методика полевых работ была адаптирована к условиям и задачам работ на изучаемой площади. Основные изменения сводились к следующему:

- Из комплекса были исключены установки «скважина-поверхность», т.к. главным объектом изучения являлся незначительный, по мощности, рудный горизонт, находящийся на глубинах более 1 км;
- Установки «поверхность-скважина» были заменены на установки типа «зонд», с разными размерами приемных и питающих линий, для изучения околоскважинного пространства;
- Межскважинные измерения проводились, как от точечного, так и от дипольного источника;
- При проведении измерений, мы намеренно отказались от использования многоканальных измерительных кос. Для всех типов установок, в одной скважине одновременно находилось не более трех электродов. Это увеличило время измерений, но позволило использовать стандартные трехжильные каротажные кабели, и свести к минимуму возможность аварии в скважинах.

Двумерная инверсия данных межскважинной электротомографии осуществлялась с помощью программ Res2DInv (Geotomo Software, Малайзия) [Loke, 1996, 1999] и ZondCht. Каминского А.Е [Каминский, 2009].

Результатом инверсии является геоэлектрическая модель межскважинного пространства в интервале глубин около 200 м, от забоя скважины. Наибольшее количество измерений выполнено в пределах рудного горизонта и на его границах, поэтому здесь детальность модели максимальна (рис. 14).

Наиболее ярко, в интерпретационных моделях, выделяется проводящий рудный горизонт, мощностью от 20 м до 50 м. Сопротивление, в пределах проводника, составляет десятки – первые сотни Ом·м. Непосредственно над ним, выделяется мощный высокоомный слой Норильской интрузии. Сопротивления габбро-долеритов, слагающих интрузию –  $10^4$  Ом·м и более. Второй проводящий слой фиксируется во всех скважинах над породами Норильской интрузии и, предположительно, соответствует горизонту толеитовых базальтов Сывирминской свиты нижнего триаса. Низкие сопротивления могут быть также

связаны с областью малосульфидного оруденения в лейкогаббро верхнего контакта интрузии.

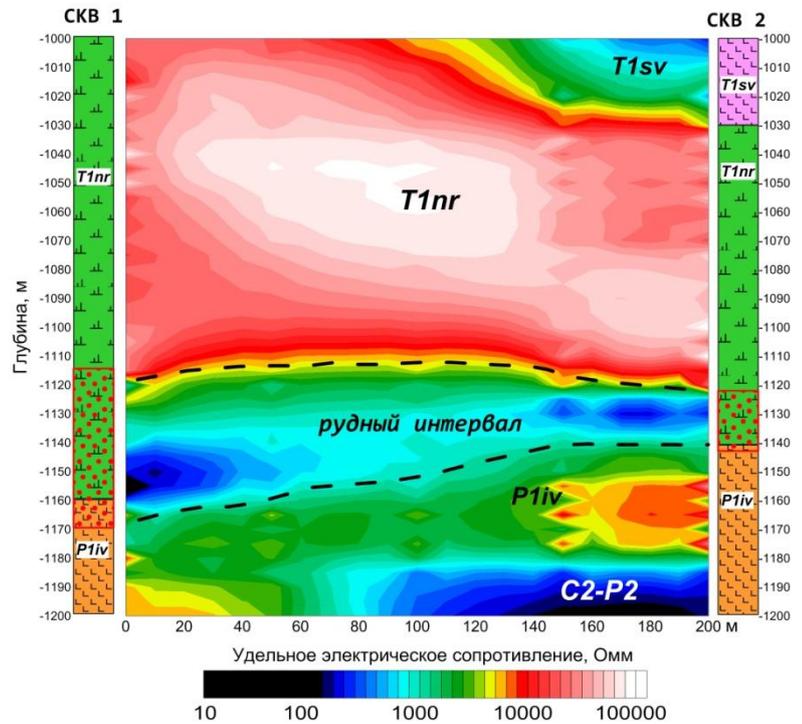
Под проводящим рудным горизонтом залегает относительно высокоомный слой эффузивных пород (сопротивление - первые сотни Ом·м).

Проводящие осадочные отложения Тунгусской серии мы своими установками не пересекали, но их влияние на результаты измерений, особенно на больших установках, очевидно. Например, контрастный проводник, отвечающий кровле отложений  $C_2-P_2$ , в основании геоэлектрической модели, однозначно вырисовывается в районе скважины № 2.

#### **Выводы к главе 4.**

Классическим методом скважинной электроразведки является метод заряда. Метод широко применялся в Советском Союзе, и в первую очередь, при работах на рудных месторождениях [Кормильцев, 1987]. Но метод заряда в том виде, в каком он применялся в 70-80-е годы прошлого столетия, не дает заметного преимущества перед наземными исследованиями, когда речь идет об изучении объектов на глубинах более 1 км, что подтверждают многочисленные модельные расчеты. Кроме того, интерпретация результатов в методе заряда носила скорее качественный характер, заканчиваясь анализом карт электрического потенциала или магнитной индукции.

Предложенный нами широкий комплекс измерений – «скважина-поверхность», «поверхность-скважина» и «скважина-скважина» - включает в себя все возможные методики электроразведочных работ с использованием скважин, в том числе, и метод заряда, в классическом варианте. Конкретный набор измерительных установок формируется в каждом отдельном случае с учетом



*Рис. 14. Геоэлектрическая модель межскважинного пространства по результатам двумерной инверсии между скважинами 1 и 2. По краям геоэлектрической модели приведены геологические колонки и рудные интервалы по данным бурения.*

многих факторов: размеров изучаемого объекта, расстояния между скважинами, электрических свойств среды и т.д. Используя многоэлектродные системы измерений, с детальным шагом питающих и приемных линий, при скважинных измерениях, мы можем проводить количественную двумерную инверсию по всей совокупности полученных данных.

## **Заключение**

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Разработана технология синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований с оцениванием параметров горизонтального магнитного поля для решения поисковых задач рудной геофизики, которая позволила решить две важнейшие задачи: существенно увеличить глубинность исследований и перейти от одиночных и профильных работ к площадным измерительным схемам, с последующим построением трехмерной геоэлектрической модели. Выполнена оценка разрешающей способности предложенной методики магнитотеллурических исследований на основе трехмерного математического моделирования.
2. Исследованы области применения магнитотеллурических методов в рудной геофизике, определены и классифицированы геологические задачи, решаемые с помощью МТ/МВ-методов на разных стадиях геологоразведочных работ. Успешное решение различных геологических задач на рудных месторождениях с помощью МТ/МВ-методов продемонстрировано на экспериментальных результатах в различных рудных провинциях.
3. Выполнена отработка сценариев совместного применения магнитотеллурических методов с другими геофизическими методами в специфических условиях конкретных рудных провинций. Приоритетное значение, при поисках сульфидных руд, имеет развитие комплекса магнитотеллурических методов и вызванной поляризации (ВП) и, в частности, создания алгоритмов последовательного и совместного решения обратных задач этих методов.
4. Проведено развитие и совершенствование методики фазово-частотных измерений вызванной поляризации, направленное на расширение возможностей рудной электроразведки, которое сопровождалось созданием на базе ООО «Северо-Запад» нового аппаратного комплекса, программ обработки, петрофизической лаборатории.

С участием автора, была предложена и успешно применена, на многих рудных объектах, простая формула оценки частотной характеристики поля ВП для разделения аномалий электрической поляризации разной природы.

5. Предложена методика глубинной электротомографии, которая в сочетании с многочастотными фазовыми измерениями вызванной поляризации, позволяет решать до глубин 400-500 м следующие геологические задачи: определение границ интрузивных образований, зон сульфидной минерализации и областей окварцевания; определение границ водоносных горизонтов; определение мощности мерзлых пород и таликовых зон; картирование и изучение проводящих тектонических нарушений.
6. Предложен и успешно экспериментально опробован метод межскважинной электротомографии, включающий в себя широкий комплекс измерений: «скважина-поверхность», «поверхность-скважина» и «скважина-скважина». Метод позволяет повысить возможности геофизики при изучении глубокозалегающих объектов (более 1000 м). Использование многоэлектродных систем измерений, с детальным шагом питающих и приемных линий, при скважинных измерениях, позволяет проводить количественную двумерную инверсию по всей совокупности полученных данных.

**Основные публикации автора по теме диссертации:  
в изданиях, рекомендуемых ВАК при защите докторских диссертаций**

1. **Куликов, В.А.** Возможности магнитотеллурических методов при проведении работ на высокоомных разрезах / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев // Разведка и охрана недр. - 2008. - № 12. - с.3-6.
2. **Куликов, В.А.** Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев // Разведка и охрана недр. - 2011. - № 3. - с.26-33.
3. **Куликов, В.А.** Применение частотных характеристик вызванной поляризации для разделения аномалий от углефицированных пород и сульфидов / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев // Геофизика. - 2008. - № 6. - с.55-60.
4. **Куликов, В.А.** Разделение аномалий вызванной поляризации по частотным характеристикам дифференциального фазового параметра / В.А.Куликов, Н.И.Зорин, И.Т.Манжеева, А.Г.Яковлев // Геофизика. - 2013. - № 6. - с. 23-31
5. **Куликов, В.А.** Результаты комплексных геофизических работ при поисках сульфидных руд на Северном Тимане / В.А.Куликов, А.В.Храпов, А.Г.Яковлев, М.Е.Блинова // Разведка и охрана недр. - 2008. - № 1. - с. 10-11.
6. **Куликов, В.А.** Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м / В.А.Куликов, А.А.Бобачев, А.Г.Яковлев // Геофизика. - 2014. - № 2. - с. 39-46.
7. Варенцов, Ив.М. Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики / Ив.М.Варенцов, **В.А.Куликов**, А.Г.Яковлев, Д.В.Яковлев // Известия РАН. Физика Земли. - 2013. - № 3. - с. 9-29.
8. **Куликов, В.А.** Межскважинная электротомография при изучении глубоко залегающего рудного тела в Норильском районе / В.А.Куликов, А.А.Бобачев, И.Д.Груздева, А.Г.Яковлев // Геофизика. - 2013. - № 1. - с. 27-34.
9. **Куликов, В.А.** Оценка удельного электрического сопротивления богатых медно-никелевых руд Норильского региона / В.А.Куликов, И.М.Варенцов, И.Д.Стерлигова, А.В.Соловьева // Геофизика. - 2014. - № 6. - с.25-29.
10. **Куликов, В.А.** Применение новой аппаратуры производства ООО «Северо-Запад» при гидрогеологических и инженерных электроразведочных работах / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев // Разведка и охрана недр, 2008, № 1, с. 8-10.
11. Алексанова, Е.Д. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы / Е.Д.Алексанова, Ив.М.Варенцов, **В.А.Куликов**, И.Н.Лозовский, П.Ю.Пушкарев, Е.Ю.Соколова, Н.Л.Шустов, А.Г.Яковлев // Геофизика. - 2013. - № 2. - с. 32-38.
12. Алексанова, Е.Д. Электромагнитные зондирования осадочного чехла и консолидированной земной коры в зоне перехода от Московской синеклизы к Воронежской антеклизе: проблемы и перспективы / Е.Д.Алексанова, Ив.М.Варенцов, М.И.Верещагина, **В.А.Куликов**, П.Ю.Пушкарев, Е.Ю.Соколова, Н.Л.Шустов, В.К.Хмелевской, А.Г.Яковлев // Известия РАН. Физика Земли. - 2010. - № 8. - с. 62-71.

13. Алексеев, Д.А. Опыт применения метода АМТЗ при поисках полезных ископаемых / Д.А.Алексеев, **В.А.Куликов**, А.Г.Яковлев, В.П.Гребнев, А.И.Корявко, В.А.Матросов // Разведка и охрана недр. - 2004. - № 5. - с.40-44.
14. Алексанова, Е.Д. Использование полей электрифицированных железных дорог при проведении электромагнитных зондирований /Е.Д.Алексанова, **В.А.Куликов**, П.Ю.Пушкарев, А.Г.Яковлев // Известия ВУЗов. Геология и разведка. - 2003. - № 3. - с.60-64.
15. Андреева, Е.В. Комплексование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель» / Е.В.Андреева, А.А.Бобачев, Ив.М.Варенцов, М.И.Верещагина, **В.А.Куликов**, А.Г.Яковлев, Д.В.Яковлев // Разведка и охрана недр. - 2006. - № 8. - с.71-79.
16. Бобачев, А.А. Современные модификации скважинно-наземных и межскважинных измерений ВП при решении рудных задач / А.А.Бобачев, **В.А.Куликов** // Разведка и охрана недр, 2008, № 12, с 6-12.
17. Бердичевский, М.Н. Чувствительность глубинного магнитотеллурического зондирования в присутствии флюидонасыщенных разломов / М.Н.Бердичевский, **В.А.Куликов** // Известия АН СССР, Физика Земли. - 1994. - № 6. - с. 39-49.
18. Бердичевский, М.Н. Аналитическая модель МТ-зондирования, искаженного эффектом вытеснения / М.Н.Бердичевский, В.П.Борисова, Н.С.Голубцова, **В.А.Куликов** // Известия АН СССР, Физика Земли. - 1995. - № 11. - с. 18-24.
19. **Куликов, В.А.** Результаты работ методом ВЭЗ-ВП в районе полигона «Александровка» Калужской области / В.А.Куликов, И.Д.Груздева, А.Г.Яковлев // Вестник Московского Университета, серия Геология. - 2013. - № 3. - с. 53-61.
20. Рыбалка, А.В. Глубинное строение Урала по данным Полярно-Уральского трансекта / А.В.Рыбалка, Г.А.Петров, Т.В.Кашубина, **В.А.Куликов**, А.В.Егоркин, В.А.Душин, С.Н.Кашубин // Региональная геология и металлогения. - 2012. - № 48. - с. 25-37.

#### **В других изданиях:**

1. **Куликов, В.А.** Некоторые особенности геофизического комплекса, применяемого при решении рудных задач на разных стадиях геологоразведочных работ. Тезисы доклада на конференции «ИНЖЕНЕРНАЯ И РУДНАЯ ГЕОФИЗИКА-2009» / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев - Геленджик, 2009. - с. 200.
2. **Куликов, В.А.** Практическое использование частотных характеристик вызванной поляризации при рудных поисках. Материалы пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев - СПбГУ, 2011. - Книга 2. - с. 278-281.
3. **Куликов, В.А.** Роль магнитотеллурических методов при поиске и разведке месторождений рудных полезных ископаемых. Материалы пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. /

- В.А.Куликов, И.М.Варенцов, А.Г.Яковлев - СПбГУ, 2011. - Книга 1. - с. 286-289.
4. Бердичевский, М.Н. Применение электромагнитных зондирований для поисков и разведки твердых полезных ископаемых. Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения» / М.Н.Бердичевский, А.Г.Яковлев, **В.А.Куликов**, Д.А.Алексеев, Д.В.Яковлев, П.Ю.Пушкарев - Москва: Изд-во МГУ, 2004. - с. 95.
  5. Бердичевский, М.Н. Школа геоэлектрики Московского Университета: достижения на рубеже веков. Сборник научных трудов: Ломоносовская школа МГУ по геофизическим методам исследования земных недр: прошлое, настоящее, будущее. / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев, А.Г.Яковлев, Е.Д.Александрова, Е.В.Андреева, В.П.Бубнов, Н.С.Голубцова, А.В.Кошурников, **В.А.Куликов**, А.Г.Морозова, Д.В.Яковлев, П.Ю.Пушкарев, Н.Л.Шустов. - Издательство МГУ, 2004. - с. 42-49.
  6. Варенцов, И.М. Наземные геофизические методы при поисках и разведке медно-никелевых месторождений ГКМ Норильский Никель. Международная выставка и конгресс "Гео-Сибирь-2007". / И.М.Варенцов, В.А.Куликов, А.В.Храпов, А.Г.Яковлев - Новосибирск: СНИИГГиМС, 2007. - 12с.
  7. Варенцов, И.М. Профильная интерпретация МТ/МВ данных в рудных приложениях. Материалы пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли – ЭМЗ-2011. В двух книгах. / И.М.Варенцов, **В.А.Куликов**, А.Г.Яковлев, Д.В.Яковлев - СПбГУ, 2011. - Книга 2. - с. 243-247.
  8. **Kulikov, V.A.** 2D inversion of MT/MV data in mining application: a case study on drilled deposit / Kulikov Viktor A., Varentsov Ivan M., Yakovlev Andrey G., Yakovlev Denis V. //ELECTROMAGNETIC SOUNDINGS: THEORY AND APPLICATIONS PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP IN MEMORY OF PROFESSORS MARK N. BERDICHEVSKY AND PETER WEIDELT. - p. 94-98.
  9. **Kulikov, V.** Spectral Induced Polarization in mineral exploration. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Induced Polarization / V. Kulikov, I. Sterligova - Ile d'Oleron, France, 2014. - p.112-114.
  10. Berdichevskiy, M.N. Analytic model of magnetotelluric sounding distorted by displacement effect / Berdichevskiy M.N., Golubtsova N.S., **Kulikov V.A.**, Borisova V.P. // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. - 1996. - T.31. - № 11. - p. 926-932.
  11. Bobachev, A. Experience of mining MT/DC/IP applications / Bobachev A., **Kulikov V.** Varentsov I., Yakovlev A. // XVIII Workshop on EM Induction in the Earth (Abstracts). El Vendrel. Spain. - 2006. - 1p.
  12. Varentsov, Iv. M. Possibilities of Magnetotelluric Methods in Geophysical Exploration for Ore Minerals / Iv. M. Varentsov, **V. A. Kulikov**, A. G. Yakovlev, D. V. Yakovlev // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. - 2013. - Vol. 49. - No. 3. - pp. 309–328.