

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

РГБ ОД

13 АЕН 2000

Кашкевич Марии Петровна

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ОБРАЗ  
ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ ГЛУБИННЫХ РАЗЛОМОВ**

Специальность 04.00.12 - геофизические методы  
поисков и разведки месторождений полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт - Петербург

2000

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета  
Санкт - Петербургского Государственного Университета

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических  
наук, профессор Комаров В.А.

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических  
наук, профессор Путиков О.Ф.  
кандидат физико-математических  
наук Крылов С.С.

Ведущая организация: ВИРГ - Рудгеофизика, Санкт-Петербург

Защита состоится “29 июня” 2000 г в 15 часов на  
заседании Диссертационного совета Д.063.57.18 по защите  
диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в Санкт-  
Петербургском Государственном Университете по адресу: 199034,  
СПб, Университетская наб., 7/9, Геологический факультет, ауд. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. М.Горького  
в СПбГУ

Автореферат разослан “26 мая” 2000г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор г.-м. наук, профессор

В.А.Шашканов

Д 390.57 с 4,0

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Глубинные разломы, являющиеся крупными тектоническими элементами, разделяющими земную кору на отдельные блоки и проникающими в мантию, привлекают особое внимание исследователей. Разломы несут информацию об истории геологического развития и строении регионов. С зонами тектонических разрывов земной коры во многих случаях связаны магматизм и рудообразование.

Разломы обладают повышенной проницаемостью и рассматриваются как пути проникновения гидротерм и флюидов. Хотя зоны разломов сами редко содержат промышленные концентрации рудных минералов, к тектоническим узлам приурочено большинство известных рудных месторождений.

Представление о пространственном расположении глубинных разломов необходимо при строительстве крупных объектов, например, таких, как атомные электростанции, для которых особенно необходима сейсмически стабильная обстановка. Вероятность же различных подвижек в земной коре в зонах глубинных разломов во много раз больше, чем в других областях.

Многолетние наблюдения за состоянием здоровья людей, проживающих в пределах зон глубинных разломов, показали резкое возрастание числа заболеваний раком, что связано с воздействием радона, мигрирующего с глубин. Эти факты необходимо учитывать при строительстве жилых массивов.

Возникающие вблизи разлома зоны трещиноватости и дробления горных пород, характеризующиеся повышенной проницаемостью для растворов, является негативным фактором при размещении захоронений радиоактивных и химических отходов.

Таким образом, выявление и трассировка зон разломов земной коры комплексом геолого-геофизических методов - одна из важных и интересных задач геологии. Однако недостаточно знать только положение разлома. Не менее важными являются вопросы о глубине его заложения, проницаемости и т.д. Глубина заложения разлома - один из наиболее трудно устанавливаемых параметров и возможность его определения появляется лишь при условии выхода на поверхность интрузивных пород глубинного происхождения. Кроме того, разломы, перекрытые более поздними отложениями, не выявляются непосредственно при геологической съемке. Большими возможностями в таких условиях обладают геофизические методы [Никитский, Бродовой, 1987]. В настоящее время разработан комплекс геофизических методов для картирования глубинных разломов. Но в зависимости от структуры и генезиса, от сопровождающих его минераль-

ных ассоциаций, разлому будет соответствовать свой *геофизический образ*, т.е. он будет характеризоваться индивидуальным набором геофизических полей определенной структуры и интенсивности.

Таким образом, под термином “*геофизический образ*” будем понимать совокупность геофизических признаков, характеризующих графитизированные глубинные разломы, т.е. как отображение данных структур в физических полях на поверхности Земли, так и указание петрофизических характеристик и особенностей минеральных ассоциаций, генетически связанных с этим типом разломов.

Так, на территориях древних щитов в районах тектонической переработки кристаллических пород фундамента, приуроченных к глубинным разломам, исследователи обнаруживают зоны, в которых при относительно малом объеме содержания (порядка единиц процентов) электропроводящих минералов (графита и пирротина) электрические аномалии весьма интенсивны: потенциал естественного электрического поля (ЕП) достигает минус 750 мВ; кажущееся удельное сопротивление ( $\rho_s$ ) - единиц омметров при фоне 5-10 тысяч омметров. Повсеместно отмечена их четкая пространственная корреляция с интенсивными аномалиями магнитного поля ( $\Delta T$ ) обоих знаков (от -10000 до +12000 нТл). В пределах Хаутаварской зоны отмечены аномальные содержания гелия, ртути [Мейер и др., 1995] и ряда металлов.

Подобные явления были зарегистрированы на Балтийском, Канадском щитах, а также в северо-восточной Баварии вблизи сверхглубокой скважины КТВ [Наак, 1991; Frost, 1989; Korja, 1996 и др.].

Мы обратились к данной проблеме после того, как группа сотрудников и студентов геологического факультета СПбГУ (при участии автора) обнаружили эти уникальные аномалии в Южной Карелии в районе Хаутаварского колчеданного месторождения.

**Цель работы** - изучение геолого-геофизического образа графитизированных глубинных разломов на основе комплексных геофизических исследований и разработка методики их выявления и прослеживания при геологической съемке.

Выделены три **основные задачи**:

- 1) определение специфических минеральных ассоциаций и структур в зонах глубинных разломов, создающих интенсивные геофизические аномалии;
- 2) составление рационального комплекса геофизических работ для картирования графитизированных глубинных разломов;
- 3) развитие методики интерпретации естественных электрических полей применительно к подобным геологическим условиям.

### Научная новизна.

1. Впервые в пределах Хаутаваарского зеленокаменного трога обнаружены интенсивные геофизические аномалии, не связанные с пирит-пирротиновыми телами, и приведены доказательства их связи с графитизированными глубинными разломами.

2. Подтверждена гипотеза о резком повышении электропроводности горных пород за счет образования в них тонких углеродистых пленок на границах зерен.

3. На реальных полевых данных опробована методика интерпретации ЕП с позиции неоднородной поляризации электропроводящих тел и учета их вызванной поляризации, обусловленной током ЕП.

4. Разработан и практически реализован алгоритм построения геоэлектрического разреза, предназначенный для интерпретации электрических зондирований, полученных при измерении внутреннего и внешнего поля в условиях фиксированного разности питающей линии.

5. В породах хаутаваарской серни обнаружена редкая формация пирротина, обладающего сверхвысокой остаточной намагниченностью ( $Q=I_n/I_s=300$ ), который предложено рассматривать в качестве источника интенсивных аномалий магнитного поля обоих знаков.

### Практическая и научная ценность.

1. Предложена рентабельная методика выявления и прослеживания графитизированных глубинных разломов для решения задач структурной, инженерной и экологической геологии, поисков рудных месторождений.

2. Изучение физических свойств и условий образования протяженных графитистых пленок вносит вклад в решение задач о возникновении и существовании других многоатомных соединений, например, фуллеренов.

3. Аномалии ЕП изучаемого типа могут служить задачам исторической геологии и нести информацию о глубине эрозионного среза. Термодинамические и химические условия образования тонких углеродистых пленок на границах зерен соответствуют глубине порядка 4 км, в то время как сейчас они находятся на поверхности Земли, с чем и связаны наблюдаемые интенсивные аномалии.

4. Внесенные дополнения в методику интерпретации данных ЕП с учетом неоднородной поляризации тела имеют значение при оценке вертикальных размеров аномалобразующих объектов и при определении положения и размеров тел при съемках в скважинах и горных выработках.

5. В результате совершенствования методики электрического зондирования с фиксированным разномом питающей линии и разработки соответствующего алгоритма интерпретации получена возможность более эффективного проведения полевых электроразведочных работ.

### Защищаемые положения.

1. Глубинные разломы древнего кристаллического фундамента проявляются в физических полях в виде протяженных региональных аномалий электропроводности, естественного электрического и магнитного полей, состоящих из цепочек локальных аномалий высокой интенсивности.
2. Электропроводящие графитовые пленки на границах зерен горных пород служат причиной понижения общего сопротивления пород на несколько порядков, даже если объемное содержание графитового вещества составляет около 1%.
3. При интерпретации аномалий естественного электрического поля над проводниками со значительными вертикальными размерами необходимо учитывать нелинейность вертикального распределения электродного потенциала. По форме аномалии можно судить о положении точки максимального градиента ЭП, а по амплитуде - о протяженности зоны графитизации в глубину при условии малой мощности перекрывающей толщи.

Фактический материал. Основу работы составили результаты полевых комплексных геофизических работ на территории Хаутаваарской структуры, в которых автор принимал участие в 1992-1999 годах в период учебных геофизических практик и в составе геофизического отряда НИИ ЗК. Лабораторное моделирование и изучение электрических свойств образцов проведено в лаборатории электроразведки геологического факультета СПбГУ под руководством с.п.с. НИИ ЗК Ильина Ю.Т. Математическое моделирование выполнено автором с использованием алгоритмов В.А. Комарова, компьютерная обработка - по программам КМ.Ермохина, А.А. Петрова, А.Е. Каминского.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве:

2 – проведение лабораторного моделирования и теоретических расчетов; 5 – постановка задачи, проведение полевых работ и лабораторных исследований, обработка и интерпретация данных; 6,7 – участие в анализе и интерпретации полевых материалов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной геофизической конференции и выставке “Moscow-97” (Москва, 1997), Всероссийской и I Международной научно-практических конференциях молодых ученых и специалистов “Геофизика -97” и “Геофизика -99” (Петродворец, 1997, 1999), 27<sup>th</sup> сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского “Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей” (Москва, 2000), IX молодежной научной конференции им. К.О. “Геология и полезные ископаемые Сев.-Запада и Центра России” (Петрозаводск, 2000).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, 43 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована цель работы и обоснована актуальность поставленных задач.

В главе 1 “Отображение графитизированных глубинных разломов в физических полях” показаны общие черты геофизических полей в зонах глубинных разломов (высокая интенсивность аномалий, корреляция аномалий проводимости, магнитного и естественного электрического полей, расположение региональных аномалий вдоль зон разлома в виде цепочки локальных аномалий и т.д.). Обобщены результаты работ немецких, американских и канадских геофизиков в подобных геологических условиях и сопоставлены с наблюдениями в Хаутаваарской тектонической зоне.

1.1. Геологическая характеристика и классификация глубинных разломов. Определено понятие “глубинного разлома”. Дан краткий обзор литературы по классификации разломов земной коры. Обсуждаются критерии для выделения глубинных разломов среди прочих разрывных структур.

1.2 Обзор результатов геолого-геофизических исследований в зонах глубинных разломов (Богемский массив, Канадский щит). Приведены материалы геолого-геофизических работ в Юго-Восточной Баварии в рамках программы континентального глубинного бурения (Kontinentales Tiefbohrprogramm - КТВ) и на Канадском щите в зонах глубинных разломов. Выявлены общие закономерности поведения физических полей над графитизированными глубинными разломами [Haak, 1991, 1997; Frost, 1989; Winter, 1991].

1.3 Геолого-геофизическая характеристика Хаутаваарской тектонической зоны. Дано краткое описание геологического строения района Хаутаваарского колчеданного месторождения. На основании тектонических карт Балтийского щита показана связь Хаутаваарской структуры с глубинным разломом [Перевозчикова, 1974; Вревский, 2000]. Проводится аналогия между геофизическим образом Хаутаваарской тектонической зоны и зон глубинных разломов на Канадском щите и в Северо-Восточной Баварии. Общим для указанных зон является высокая интенсивность и пространственная корреляция аномалий удельного сопротивления (единицы омметров при фоне 5-10 тысяч омметров), естественного электрического (-750 мВ) и магнитного (от -10000 до +12000 нТл) полей, а также пространственное расположение локальных аномалий вдоль зон разломов, формирующих протяженные региональные аномалии.

На основании выводов, сделанных в главе 1, *на защиту выносятся:*

*1. Глубинные разломы древнего кристаллического фундамента проявляются в физических полях в виде протяженных региональных аномалий электропроводности, естественного электрического и магнитного полей, состоящих из цепочек локальных аномалий высокой интенсивности.*

Глава 2 “Графит в горных породах” посвящена происхождению аномалий электрического сопротивления в верхней части земной коры.

2.1 Природа аномалий электропроводности в верхней части литосферы. Обсуждаются различные точки зрения на причину электропроводности литосферы (солевые потоки, графит магнитного происхождения, хлопья графита биологического происхождения и т.д. [Семенов, 1984; Жамалетдинов, 1990; Ковтун, 1984; Ваньян, 1984; Филиппов, 2000; Bailey, 1989; Frost, 1989 и др.]).

Наиболее полно низкие удельные сопротивления в земной коре в зонах глубинных разломов объясняются в рамках гипотезы о существовании в них специфических термодинамических ( $T=350-400^{\circ}\text{C}$ ,  $P=1.5-2$  Кбар) и химических условий на глубинах порядка 4 км, которые наряду с тектоническими движениями, выраженными в последовательных растяжениях и сжатиях земной коры в области разрывных нарушений, являются причиной стрессового минералообразования [Walther, Althaus, 1991]. Указанные условия способствуют образованию из смеси метана и углекислого газа ( $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 = 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$ ) уникальных углеродистых структур - протяженных тонких (1000А) графитовых пленок на границах зерен пород, обеспечивающих повышение электрической проводимости пород на несколько порядков.

2.2 Графитовые пленки – источник аномалий электропроводности в зонах глубинных разломов: теоретические и экспериментальные доказательства. Приведены дополнительные доказательства в пользу гипотезы о повышении электропроводности в сухих кристаллических породах за счет образования протяженных тонких углеродистых пленок на границах зерен. Они основаны на результатах теоретических расчетов среднего удельного сопротивления среды для пород, содержащих редкую примесь (около 1%) электропроводящих включений, и лабораторных исследований образцов пород хаутаваарской серии.

Обязательным условием для существования высокой проводимости является непрерывность пленок, которая наблюдается только в естественном залегании пород. В лабораторных условиях в результате декомпрессии непрерывность пленок нарушается, образцы пород демонстрируют сопротивление на 3-4 порядка выше, чем *in situ*. Наши измерения электропроводности образцов графитизированных сланцев, отобранных из скважин и на обнажениях в зонах, где кажущееся удельное сопротивление составляет

около 1 Ом, продемонстрировали удельное сопротивление в лабораторных условиях от 1000 до 6000 Ом.

Теоретические расчеты среднего удельного сопротивления среды для пород, содержащих редкую примесь (около 1 %) электропроводящих включений сферической формы (которыми мы аппроксимировали графитовые пленки в кристаллических породах), показали, что такой концентрации достаточно чтобы объяснить уменьшение среднего удельного сопротивления на 4-5 порядков. Промоделирована также ситуация с образцами, когда непрерывность пленок нарушается при том же объемном содержании графитистого вещества (в расчетах вертикальные размеры сферидов брали в 100 раз меньше, чем в предыдущем случае). В этом случае электропроводность среды резко падала и приближалась к тем значениям, которые характерны для сухих кристаллических пород при отсутствии электропроводящих включений.

Проведенные исследования дали дополнительные доказательства в пользу гипотезы о понижении общего сопротивления пород за счет графитовых пленок.

2.3 Аномалии электрического сопротивления в районе Хаутаваарского колчеданного месторождения. Электроразведочные работы методом кажущегося удельного сопротивления в районе Хаутаваарского колчеданного месторождения выявили участки с аномально низкими значениями  $\rho_{\Sigma}$ , коррелирующиеся с аномалиями естественного электрического поля поля и вызванной поляризации.

Использована методика полевых работ методом кажущегося удельного сопротивления по схеме градиента и показана возможность интерпретации данных как в модификации профилирования (срединный градиент), так и электрического зондирования с фиксированным разносом питающей линии, где в качестве формального признака зондирования рассматривается изменение коэффициента установки за счет изменения положения приемных электродов относительно питающих (как внутри питающей линии, так и снаружи). Разработан и практически реализован (программа Каминского А.Е., СПбГУ) алгоритм построения геоэлектрического разреза, предназначенный для интерпретации электрических зондирований, полученных при измерении внутреннего и внешнего поля в условиях фиксированного разнoса питающей линии. При создании программы использованы работы Абрамовой, В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина (1992). На отдельных участках в геоэлектрическом разрезе выделяются слои с удельным сопротивлением менее 1 Ом при характерных сопротивлениях пород хаутаваарской серии порядка 5000-10000 Ом.

Подобный разрез с аномальными зонами проводимости получен при обработке данных по программе проф. Ермохина К.М. (АОЗТ "Теллур-

СПБ”), в основу которой положен метод дипольных источников.

В заключении главы 2 сформулируем второе защищаемое положение:

*2. Электропроводящие графитовые пленки на границах зерен горючих пород служат причиной понижения общего сопротивления пород на несколько порядков, даже если объемное содержание графитового вещества составляет около 1%.*

В главе 3 “Особенности интерпретации аномалий ЕП в условиях графитизированных глубинных разломов” обсуждаются особенности интерпретации аномалий ЕП, сопутствующих графитизированным глубинным разломам, и рассматриваются различные причины, приводящие к увеличению амплитуды внешнего потенциала ЕП.

3.1. Интенсивное естественное электрическое поле как индикатор графитизированных глубинных разломов. Метод ЕП является надежным и информативным, не требующим значительных затрат средств выявления и прослеживания графитизированных глубинных разломов древнего кристаллического фундамента. Этим обусловлена рациональность использования метода ЕП при решении подобных геологических задач и необходимость включения его в комплекс геофизических методов на различных стадиях геологоразведочных работ при изучении графитизированных глубинных разломов.

3.2. Естественное электрическое поле однородно поляризованного сфероида. В предположении, что поляризация тел однородна, т.е. вертикальное изменение потенциал-определяющего фактора линейное, были получены аналитические решения ряда фундаментальных задач, которые легли в основу теории естественного электрического поля (Семенов, 1980). На примере однородно поляризованных сферондов нами решена задача о взаимном влиянии двух близко расположенных источников ЕП с учетом влияния границы земля-воздух и эффекта вызванной поляризации, возникающей на границе ионного и электронного проводника при протекании тока ЕП [Комаров, Капкевич, Мовчан, 1998]. Было показано, что за счет высокой электропроводности каждый из сферондов под действием поля ЕП соседнего сфероида приобретает дополнительный дипольный момент, направленный в противоположную сторону первичному дипольному моменту. При предельном сближении сферондов внешний потенциал каждого из тел уменьшается в два раза.

В лабораторных опытах физической моделью природных источников ЕП служили две медно-цинковые пластины, вертикально расположенные в баке с водой. Исследования изменения потенциала ЕП по мере уменьшения расстояния между параллельными пластинами показали, что при предельном сближении пластин (но электронный контакт отсутствовал) их суммарное поле приобретает то же значение, что и в случае одиночного

сфероида. Таким образом, подтверждены теоретические расчеты и показано, что нет оснований ожидать повышение измеряемого потенциала ЕП за счет сложения полей от параллельно включенных источников, как ранее допускали в качестве возможного объяснения наблюдаемых интенсивных аномалий ЕП [Haak, 1991].

В результате лабораторных и теоретических исследований установили, что *ни при каких соотношениях параметров источников, создающих естественные электрические поля (коэффициента поверхностной поляризации, расстояния между ними, глубиной залегания, удельного сопротивления) внешний суммарный потенциал естественного поля не может превышать ЭДС ЕП, обусловленную вертикальным изменением потенциалопределяющего фактора в среде, вмещающей электрические проводники.*

3.3. Естественное электрическое поле в случае неоднородной поляризации электронных проводников. Однородная поляризация является лишь частным случаем и не отражает в достаточной мере реальные физико-химические условия. Исследования последних лет [Haak, 1997; Winter, 1991] показали, что в глубоких скважинах окислительно-восстановительный потенциал в среде меняется с глубиной по закону, который можно описать в виде двух экспонент. В скважине КТВ от поверхности земли до глубины 100-150 м ОВП сначала довольно резко уменьшается на 250 мВ, а затем медленнее до глубины 4500 м на 600 мВ. Полный перепад ОВП в скважине составляет 850 мВ, что близко к теоретическому электрохимическому пределу для ОВП, определяемому фугитивностью кислорода, растворенного в электролите.

В Хаутавааре измеренный минимум потенциала ЭЭП достигает -780 мВ. Это прямо указывает на вероятную протяженность графитовых пленок до глубины не менее 4 км. В настоящее время графитизированные сланцы обнажаются на поверхности земли, в то время как Р-Т условия их образования соответствуют глубине около 4 км, т.е. столько составляет эрозионный срез. Этот вывод интересен с точки зрения геологической истории Карельского региона.

Зависимость изменения ОВП с глубиной, измеренную в скважине КТВ, мы использовали при интерпретации аномалий ЕП с помощью программы расчета естественных электрических полей, создаваемых электронными проводниками произвольной формы при заданном поведении потенциалопределяющего фактора в среде по вертикали (программа Петрова А.А., ГНПП "Севморгео").

Наряду со способом численного решения задачи о естественном электрическом поле, который благодаря созданному программному обеспечению является удобным для интерпретации практических данных метода ЕП, сохраняется значимость аналитических решений при сложном поведении электродного потенциала на поверхности поляризуемых тел. По-

следними разработками в этой области явились аналитические решения задачи Дирихле для электропроводящей сферы, находящейся в неоднородном поле электродного потенциала [Комаров, Петров, 2000]. Рассмотрен частный случай изменения ЭП по вертикали - по экспоненциальному закону, что отражает поведение ОВП в верхней части Земной коры. При решении учтена вызванная поляризация, обусловленная током естественного поля. Была установлена возможность в качестве аппроксимирующего использовать поле вертикального диполя, который расположен над центром сферы и, в зависимости от степени неоднородности поля ЭП во вмещающей среде, приближается к верхнему полюсу сферы. Лишь в предельном случае однородной поляризации вертикальный диполь совпадает с центром сферы. По аналогии со случаем однородной поляризации установлена связь между формой аномалии и эффективной глубиной расположения вертикального диполя.

С этих же позиций мы интерпретируем результаты обработки площадной съемки потенциала ЕП по программе К.М. Ермохина, в основу которой положен алгоритм Г.А. Трошкова для нахождения источников аномалии методом особых точек. Глубина расположения источников аномалий естественного электрического поля оказалась равной первым десяткам метров, что соответствует области максимального градиента концентрации кислорода.

Таким образом, по форме графика потенциала естественного электрического поля, полученного в результате измерений на поверхности Земли, мы находим глубину диполя, соответствующую границе анода и катода на поверхности проводника и области максимального градиента ОВП, а не центр проводника, как в случае однородной поляризации. Этот вывод имеет большое практическое значение при интерпретации аномалий ЕП над графитизированными глубинными разломами, являющимися электронными проводниками со значительными вертикальными размерами и для которых характерно смещение границы анод-катод к верхней кромке тела.

Параллельно было выполнено физическое моделирование с использованием неравномерно поляризованных моделей, т.е. граница анод-катод была смещена к верхней кромке тела и отношение меди к цинку составляло 1:6. График внешнего потенциала ЕП над неравномерно поляризованной моделью был более узкий и соответствовал по форме графику над равномерно поляризованной моделью, но помещенной на меньшую глубину. На форму графика повлияла не глубина погружения моделей (однородно и неоднородно поляризованные модели были исходно помещены на одинаковую глубину и имели одинаковый диаметр), а глубина границы анод-катод.

В процессе моделирования была обнаружена еще одна закономерность. График над однородно поляризованной моделью, расположенной под углом  $30^\circ$ , полностью повторяет график над моделью со смещенной границей анод-катод, расположенной горизонтально. Это обстоятельство особенно надо принимать во внимание при оценке пространственного расположения тел и их размеров по данным ЕП, полученным в условиях горных выработок и скважин.

На физических и математических моделях исследовали влияние на естественное электрическое поле близко расположенных пластов высокого сопротивления, что соответствует условиям катаклазированных тектонических зон, где электронные графитовые проводники переслаиваются относительно сухими плохо проводящими породами. Присутствие изоляторов увеличивает амплитуду аномалии и делает минимум более узким. Кроме того, в присутствии диэлектрика наблюдаются отдельные минимумы над каждым проводником, в то время как отсутствие диэлектрика приводит к тому, что аномалия объединяется в один широкий минимум.

*Большое количество узких экстремумов на графиках ЕП (Хаутаваарская зона, Богемский массив, Лапландский гранулитовый пояс) объясняется тем, что источники ЕП, соответствующие области максимального градиента ЭП, находятся вблизи поверхности и переслаиваются высокоомными пластами.*

На основании выводов, сделанных в главе 3, сформулируем 3 защищаемое положение:

*3. При интерпретации аномалий естественного электрического поля над проводниками со значительными вертикальными размерами необходимо учитывать нелинейность вертикального распределения электродного потенциала. По форме аномалии можно судить о положении точки максимального градиента ЭП, а по амплитуде - о протяженности зоны граффитизации в глубину при условии малой мощности перекрывающей толщи.*

В главе 4 "Комплексные геофизические и геохимические исследования Хаутаваарской тектонической зоны" представлены данные комплексных геофизических и геохимических съемок в пределах Хаутаваарской тектонической зоны и результаты их интерпретации. Обсуждается природа аномалий магнитного поля и причины его корреляции с электрическими аномалиями.

4.1. Результаты комплексных геофизических и геохимических съемок и их анализ. Комплекс геофизических работ включал электроразведку методами кажущегося удельного сопротивления, вызванной поляризации и естественного электрического поля, магниторазведку, гравиразведку, пешеходную гамма-съемку, сейсморазведку и рентгенорадиометрическое опробование почв и неозоленных растений.

На протяжении нескольких лет сотрудниками НИИ ЗК и каф. ядерной геофизики СПбГУ [Мейер и др., 1995] проводились измерения содержания гелия и ртути в пределах Хаутаварского месторождения. По содержаниям в пробах воды, рыхлых отложений и биогеохимических пробах была зафиксирована комплексная гелиево-ртутная аномалия. Контрастность ртутной аномалии составила 60 единиц по сравнению с фоном, гелиевой - 50.

По результатам комплексных геофизико-геохимических работ были выделены участки с повышенной концентрацией рудных элементов в породах и экстремальными значениями геофизических полей, что соответствует геофизико-геохимическому образу рудных тел на Хаутаварском кончеданном месторождении. Кроме того, выделялись зоны, которые отличались набором и интенсивностью аномалий, их сопровождающих, от эталонного рудного объекта. Такие зоны мы увязываем с минерализованными разломами.

Для более полной интерпретации и получения дополнительной информации путем установления корреляционных зависимостей, данные, полученные по профилю протяженностью 4 км были обработаны с помощью факторного анализа в модификации метода главных компонент. Профиль проходил через обнаруженную нами аномальную зону, над рудным телом на известном месторождении и дальше тянулся на 1,5 км по "пустым" гранитоидам, которые давали нам фоновые значения геофизических полей в районе.

В факторном анализе в качестве признаков были использованы содержания элементов и значения геофизических полей по профилю. По совокупности признаков были выделены "рудный" и "нерудный" факторы, которые указали на наличие рудного тела в изучаемой аномальной зоне, аналогичного основному рудному объекту на месторождении, и нерудного источника аномалии. По характеру изменения фактора, отражающего геохимию и минералогию сульфидных фаз, сделан вывод о неоднородном составе аномалобразующих объектов. Физические факторы, куда в качестве признаков вошли только значения магнитного и естественного электрического полей, подтвердили предположение о существовании различных типов магнитных минералов, вызывающих магнитные аномалии. Так, фактор с положительной корреляцией магнитного поля и ЕП выделяет породы с электронной проводимостью и вектором намагниченности, направленным против полного вектора магнитного поля Земли. Такими породами являются графитизированные сланцы с вкрапленностью моноклинового пирротина, характеризующегося высокими значениями остаточной намагниченности ( $J_r$ ), вектор которой направлен против вектора индуцированной намагниченности ( $J_i$ ). Фактор с антикорреляцией магнитного и естествен-

ного электрического поля указывает на присутствие минерала с  $J_i > J_r$ . Таким минералом может быть ферромагнитный магнетит или гексагональный пирротин.

Параграф 4.2. Исследования магнитных свойств пород в зонах глубинных разломов. Графитизации в зонах разломов сопутствует образование пирротина, объемное содержание которого было оценено в 2-3 %, о чем свидетельствуют керны скважин, пробуренных на Хаутаваарском месторождении, образцы пород хаутаваарской серии, отобранные на обнажениях и керны со сверхглубокой скважины КТВ.

Лабораторные исследования хаутаваарских образцов, выполненные А.Д. Кузовенковым в магнитной лаборатории СПбФ ИЗМИРАН под руководством д. г.-м. и. В.В. Герника, выявили аномально высокую остаточную намагниченность пирротина (Q-фактор достигал 300 и более единиц).

В скважине КТВ на глубинах от 80 до 150 м был обнаружен крупнозернистый магнетит, а в диапазоне от 220 до 4000 м - ферримагнитный моноклинный пирротин. Эта формация пирротина реже встречается в природе, чем формация гексагонального пирротина, из-за неустойчивости к внешним воздействиям. Исследования показали, что моноклинный пирротин формируется лишь в случае низкой кислородной фугитивности, т.е. в тех же условиях, что и графитовые пленки. При нагревании на воздухе образца из скважины КТВ до температуры 330<sup>0</sup>, пирротин заместился магнетитом. Сочетание высокой магнитной восприимчивости магнетита и высокой остаточной намагниченности пирротина рассматривается как причина наблюдаемых магнитных аномалий.

*Минеральная ассоциация гексагонального и моноклинного пирротинов гидротермально-метаморфогенной природы, обнаруженная в катаклазированных породах зон глубинных разломов, характеризуется высокой остаточной намагниченностью и генерирует интенсивные аномалии магнитного поля обоих знаков. Пирротин в зонах разломов формируется за счет поступления сульфид-содержащих флюидов на тех же глубинах и в тех же физико-химических условиях, что и графитовые пленки на границах зерен. С этой точки зрения, хотя магнитные и электрические аномалии генерируются разными источниками, их корреляция является закономерной, а совокупность экстремальных значений проводимости, естественных электрических и магнитных полей - характерный признак графитизированных глубинных разломов.*

#### Заключение

На основе комплекса геофизических исследований составлен геофизический образ графитизированных глубинных разломов. Во внешних физических полях графитизированные глубинные разломы проявляются в виде интенсивных локальных аномалий сопротивления (единицы омметров

при фоне 5-10 тысяч омметров), естественного электрического (более -750 мВ) и магнитного (от -10000 до +12000 нТл) полей, формирующих протяженные региональные аномалии.

В качестве источника аномалий проводимости и естественного электрического поля рассматриваются тонкие протяженные углеродистые пленки на границах зерен пород, сформировавшиеся на глубинах 3-5 км в период активных тектонических движений за счет поступления углеродсодержащих флюидов. В этих же термодинамических условиях образуются ассоциации моноклинного и гексагонального пирротинов, отличающиеся исключительно высокой остаточной намагниченностью (Q-фактор достигает 300 единиц) и генерирующие интенсивные магнитные аномалии обоих знаков. Выводы об источниках аномалий сделаны на основании собственных лабораторных исследований образцов и математического моделирования, а также с учетом результатов работ других исследователей.

Геофизический образ лег в основу разрабатываемого рационального комплекса геофизических методов для выявления и прослеживания графитизированных глубинных разломов при геологической съемке. Надежными и информативными в данных геологических условиях, не требующими значительных затрат, являются электроразведка методом естественного поля и методом сопротивлений и магниторазведка.

Параллельно были разработаны дополнения к методике интерпретации естественных электрических полей применительно к подобным геологическим условиям. Показана необходимость учета нелинейного вертикального распределения потенциалопределяющего фактора в земной коре при интерпретации аномалий естественного электрического поля над проводниками со значительными вертикальными размерами. Использование упрощенной модели однородной поляризации тел приводит к значительным погрешностям при оценке размеров и расположения исследуемых объектов.

В разведочной геофизике интенсивные геофизические аномалии, связанные с зонами графитизации вдоль разломов, обычно рассматривались как помеха при поиске рудных месторождений. Мы хотим подчеркнуть исключительно важную роль понимания природы этих аномалий для решения задач структурной, исторической геологии, геоэкологии. Хотя графитизированные катакластические зоны сами редко содержат промышленные концентрации рудных минералов, к ним приурочены многие известные сульфидные и золоторудные месторождения.

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю профессору Владимиру Александровичу Комарову за постоянное внимание и неоценимую помощь в ходе выполнения данной работы. Автор

благодарен руководству учебных геофизических практик за предоставленную возможность проведения полевых исследований, с.н.с. НИИ ЗК Ильину Ю.Т. за содействие в выполнении лабораторных исследований и полезные консультации, а также всему коллективу кафедры геофизики СПбГУ за поддержку и помощь. Автор искренне признателен создателям компьютерных программ, используемых в работе. Выполнение многих разделов работы было бы невозможно без материалов по КТВ, любезно предоставленных сотрудниками Центра геофизических исследований (Потсдам).

Работа выполнена при финансовой поддержке Мэри С.-Петербурга (гранты для молодых ученых 1995, 1998, 1999 годов).

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Кашкевич М.П.* Математическое и физическое моделирование естественных электрических полей сферондальных тел // Сборник тезисов Международной Геофизической конференции и выставки "Москва-97", Москва, 15-18 сентября 1997 года, ВЗ.З.
2. *Комаров В.А., Кашкевич М.П., Мочаев И.Б.* Геофизические поля тел сферондальной формы // Учебное пособие. Из-во СПбГУ, С.-Петербург, 1998. 120с.
3. *Кашкевич М.П.* Математическое и физическое моделирование естественных электрических полей сферондальных тел // Сборник тезисов геофизической конференции молодых ученых и специалистов "Геофизика-97", 3-6 июня 1997, С.-Петербург, с.14.
4. *Кашкевич М.П.* Геофизический образ графитизированных глубинных разломов // Материалы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции "Геология и геодинамика Евразии", 19-23 апреля, 1999, Иркутск, с. 18-19.
5. *Кашкевич М.П., Муслимов А.В., Романова Н.Е., Сотников С.С.* Особенности интерпретации аномалий естественного электрического поля над графитизированными глубинными разломами // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "Геофизика -99", 9-12 ноября 1999, С.-Петербург, с. 54-55.
6. *Комаров В.А., Петров А.А., Кашкевич М.П.* Развитие теории естественного электрического поля, создаваемого электронными проводниками // Материалы 27<sup>ой</sup> сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского "Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей" (под ред. В.Н. Страхова), ОИФЗ РАН, Москва, 2000, с. 99-100.
7. *Комаров В.А., Кашкевич М.П., Петров А.А.* Геологическое значение естественного электрического поля, сопутствующего глубинным разломам // там же, с. 98-99.

Подписано в печать 23. 05. 2000. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № 144.

ЦОП типографии Издательства СПбГУ.

199034, С-Петербург, наб. Макарова, 6.