

на правах рукописи



Барсуков Павел Олегович

**ИМПУЛЬСНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ
ЗОНДИРОВАНИЯ В МИКРОСЕКУНДНОМ
ДИАПАЗОНЕ**

25.00.10 - геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

г. Троицк - 2004 г.

Работа выполнена в Институте геоэлектромагнитных исследований
Российской Академии Наук

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Якубовский Ю.В.

доктор физико-математических наук Гохберг М.Б.

доктор физико-математических наук Губатенко В.П.

Ведущая организация:

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
кафедра геофизических методов исследований земной коры
геологического факультета.

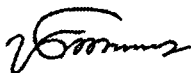
Защита диссертации состоится 17 июня 2004 г. в 15⁰⁰
на заседании Диссертационного Совета Д.212.121.07 при Московском
государственном геологоразведочном университете

Адрес: 117485 Москва ул. Миклухо-Маклая д.23, МГГРУ. 6-38 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Московского государственного геологоразведочного университета

Автореферат разослан “ “ мая 2004 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д.212.121.07
к.т.н., профессор



Боганик Г.Н.

2006-4

218 61/15

16827 Общая характеристика работы

Актуальность исследований

Импульсные электромагнитные зондирования – это один из популярных и широко используемых методов геоэлектрических исследований геологических структур и месторождений полезных ископаемых.

В электроразведке метод обычно называют ЗС- зондирования становлением поля, МПП- метод переходных процессов (TEM- Transient ElectroMagnetic или TDEM –Time Domain ElectroMagnetic)

Имеется несколько модификаций этого метода, различающихся конфигурацией и типом приемных и излучающих антенн. Однако во всех модификациях ЗС исследуется реакция геологической среды на возбуждение импульсами магнитного или электрического поля - т.н. переходные характеристики среды или процессы становления.

Различают зондирования становлением в дальней и ближней зонах – ЗСД и ЗСБЗ (ЗСБ). ЗСД – это исследования переходных характеристик в дальней зоне источника, т.е. на таких расстояниях r и временах t , на которых выполняется условие $t/\mu\sigma r^2 \ll 1$ (μ и σ – магнитная проницаемость и проводимость среды). Напротив, в ЗСБ исследования проводят в ближней зоне источника, где $t/\mu\sigma r^2 \gg 1$.

ЗСД и ЗСБ имеют свои преимущества и недостатки по глубине и разрешающей способности исследований, в возможностях интерпретации, в технико-экономических показателях, таких как производительность и стоимость.

Как электроразведочный метод ЗС начался с работ С.М.Шейнмана и А.Н.Тихонова около 60 лет назад. В дальнейшем теория и эксперимент ЗС развивались в СССР усилиями Л.Л. Ваньяна, В.И.Дмитриева, П.П.Фролова, О.А.Скугаревской, А.А.Кауфмана, Л.А.Табаровского, Ф.М. Каменецкого, В.М.Тимофеева, Ю.В.Якубовского, В.А. Сидорова, В.В.Тикшаева, А.Б. Великина, Ю.И., Булгакова, Г.А.Исаева, Б.И.Рабиновича, П.П. Макагонова, И.А.Безрука, Г.Б.Ицковича, М.М.Голдмана, Ю.А.Нима и др.

За рубежом в развитии метода ЗС принимали участие J.Wait, B.Spies, T.Lee, G.West, L.Buselli, A.Hoerd, M.Nabighian, R.Smith, P.Weidelt, K-M.Strack, C.Stoyer, K.Vosoff, P.Weidelt, A.Reiche, G.Keller и др. исследователи.

В настоящее время ЗС активно развивается в работах А.К. Захаркина, М.И. Эпова, Г.М. Тригуновича, В.С.Могилатова, В.В. Филатова (Новосибирск), С.Н. Шерешевского, Я.Л. Литмановича, А.А. Петрова (С-Петербург), В.П. Губатенко, В.П. Лепешкина, Б.В. Бучарского (Саратов), Э.Б.Файнберга и Е.О.Хабенского (Москва).

Проблемы, связанные с зондированиями в частотно дисперсных средах, исследовались В.А. Сидоровым, Ф.М. Каменецким, Б.С.Световым, В.В.Агеевым, В.В.Кормильцевым, А.Н.Мезенцевым, Г.В.Астаханцевым, Г.В.Улитиним, Г.В.Журавлевой, А.В.Куликовым, Е.А.Шемякиным,

А.Ф.Постельниковым, Д.С.Даевым, Н.О.Кожевниковым, А.А.Рыжовым, В.Задорожной, А.М.Яхиным и др.

В России за последнее десятилетие создана целая серия современной аппаратуры для исследований становлением поля: ИМПУЛЬС, ЦИКЛ, СТРОБ, КОД. На мировом геофизическом рынке аппаратура ЗС представлена компаниями Geonics (Канада), Zonge(США), SIRO (Австралия) и AEMR (Голландия).

Современные мировые тенденции развития метода ЗС направлены на :

- расширение временного диапазона в область малых времен для решения инженерных, гидрогеологических и других задач в области малых и сверхмалых глубин;
- использование поляризационных и суперпарамагнитных явлений в ЗС как источника дополнительной геологической информации;
- разработку инверсионных процедур и трансформаций данных ЗС для интерпретации площадных данных;
- разработку автоматизированных систем измерений, сбора и интерпретации данных для снижения затрат на полный комплекс ЗС исследований;

В соответствии с потребностями рынка геофизических услуг в методе ЗС имеются потенциальные возможности существенного увеличения производительности исследований с одновременным повышением их качественных характеристик и расширением области применения метода.

Практическая реализация этого потенциала и определяет актуальность темы диссертации.

Объекты исследований

Электромагнитные процессы в геологических средах с частотно зависимыми электрическими и магнитными свойствами.

Физические процессы, протекающие в приемно-излучающих антеннах с распределенными параметрами.

Физические и математические проблемы, связанные с процессами диффузии импульсного электромагнитного поля в промежуточной зоне ЗС.

Цель исследований

Разработка современного комплекса импульсных электромагнитных зондирований, обеспечивающего высокопроизводительные исследования малых глубин в максимально широком диапазоне геологических и техногенных условий.

Задачи исследований

Теоретически и экспериментально изучить процессы распространения электромагнитных импульсов в неоднородных геоэлектрических средах и в средах с частотной дисперсией электрических и магнитных свойств. Найти, обосновать и создать эффективные алгоритмы для инверсии и интерпретации данных ЗС в таких средах. Опробовать созданные алгоритмы на экспериментальных данных, доказать их эффективность и надежность в различных геолого-геофизических условиях. Оценить возможные погрешности

инверсии ЗС данных в неоднородных и дисперсных средах. Сформулировать ограничения применимости инверсионных процедур и стратегию поиска приближенных решений обратной задачи ЗС.

Методы исследований

Экспериментальные (полевые и лабораторные) исследования переходных характеристик ЗС на образцах и in-situ в различных геологических регионах, математическое моделирование электромагнитных процессов в неоднородных и частотно дисперсных средах, физическое пленочное моделирование.

Математическое решение обратных задач и приближенные методы интерпретации данных ЗС.

Научная новизна

- Разработан устойчивый алгоритм аппроксимации (сглаживания) данных ЗС, основанный на анализе экспоненциальных спектров диффузионных процессов становления.
- Разработан алгоритм нормировки процессов ЗС в промежуточной зоне, существенно снижающий зависимость кажущегося сопротивления от размера и конфигурации приемно-излучающей системы антенн.
- Разработана дифференциальная трансформация переходных характеристик ЗС промежуточной зоны в зависимость кажущего сопротивления от глубины исследования.
- Разработан алгоритм решения прямых и обратных задач в горизонтально слоистых средах с произвольными моделями частотной дисперсии электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости.
- Обнаружен и изучен антенный поляризационный эффект- АПЭ, проявляющийся в инверсии полярности и аномально медленном спаде электрических потенциалов в антеннах. Амплитуда АПЭ пропорциональна квадрату сопротивления проводов антенны и определяется частотной дисперсией диэлектрической проницаемости горных пород.
- Подробно изучено явление суперпарамагнитной релаксации субдоменных частиц магнитных минералов в горных породах. Обнаружен и изучен каминный суперпарамагнитный эффект, проявляющийся в виде аномального замедления скорости суперпарамагнитной релаксации магнитных частиц в приповерхностных породах над рудными месторождениями.

Практическая значимость

Разработанная система импульсных электромагнитных зондирований в микросекундном диапазоне (TEM-FAST) позволяет с высоким разрешением исследовать неоднородные геологические среды с частотно зависимыми электрическими и магнитными свойствами в диапазоне глубин ~ 300 м. Наибольшая геологическая и технико-экономическая эффективность системы достигается при использовании совмещенных приемно-излучающих антенн и зондированиях в промежуточной зоне ЗС.

Система позволяет снизить затраты и увеличить производительность исследований в 3-5 раз по сравнению с существующими отечественными и мировыми технологическими аналогами

Апробация и публикации

Разработанная система импульсных электромагнитных зондирований TEM-FAST используется двадцатью геофизическими компаниями в России, Туркменистане, Франции, Италии, Швейцарии, Голландии, Германии, Швеции, Дании, Никарагуа, Мадагаскаре, Реюньоне и Японии.

Основные принципы построения системы, результаты ее применения и новые физические эффекты, исследованные с ее помощью, доложены на российских и международных конференциях:

1. «Патологически вырожденные процессы ЗС»

Школа-семинар «Индуктивная Электроразведка», п.Славское, 1989.

2. «Экспрессная модификация МПП (TEM-FAST) для поиска россыпей золота, гидрогеологических исследований и гражданского инжиниринга» НТД-91 ЦНИГРИ, Москва, ЦНИГРИ, 1991.

3. “Geoelectrical Study in Vicinity of Giza Pyramids, Egypt.”

13-th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Japan, July 1996.

“Search of underground galleries in Vorontsov Palace-museum by TEM”

1-st international workshop “Electric, Magnetic and EM methods applied to cultural heritage” Ostuni, Italy 1997.

4. “Double IP-effect in Electromagnetic Transients”

The 14-th Workshop on EM Induction in the Earth., Sinaia, Rumania 1998.

5. “Electromagnetic Resonance in Transients?”

The 14-th Workshop on EM Induction in the Earth., Sinaia, Rumania 1998.

6. “TEM-FAST – импульсная электромагнитная технология исследования геологических сред» Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Москва, ИОФЗ РАН, 27-31 январь 2002.

7. “Innovative approach to EM research and monitoring of environment”

III International Workshop on Magnetic, Electric and ElectroMagnetic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV-2002), Moscow, Sep. 3-5 2002

8. “An application of magnetic and electromagnetic methods for environmental research” 8-th meeting “Environmental and Engineering Geophysics” EEGS-ES 8-12 Sep 2002 Aveiro, Portugal.

9. «Применение метода переходных процессов (технология TEM-FAST) для решения задач малоглубинной геоэлектрики и исследований окружающей среды».

Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г.

10. «Инверсия TEM данных в поляризующихся и суперпарамагнитных средах».

Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г.

11. «Антенный поляризационный эффект в ТЕМ».

Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г.

Всего по теме диссертации опубликовано более 20 статей, тезисов и научных сообщений, включая 10 печатных работ в рецензируемых изданиях.

Защищаемые положения

1. Импульсные электромагнитные зондирования геологических сред в микросекундном диапазоне охватывают область времен и расстояний, в которой затухание электромагнитного поля от излучающей антенны определяется в равной мере, как скин-эффектом, так и геометрическим рассеянием. В этой, промежуточной зоне ЗС, совмещенные приемно-излучающие антенны позволяют максимально ослабить влияние боковых неоднородностей и эффективно использовать для интерпретации экспериментальных данных алгоритмы одномерной инверсии и трансформации.
2. Разложение импульсных откликов неполяризующейся среды на экспоненциально затухающие составляющие позволяет аппроксимировать полевые данные функциями с совершенной монотонностью и эффективно использовать их для подавления помех и вычислений кажущегося сопротивления в промежуточной зоне ЗС. Кажущиеся сопротивления слабо зависят от конфигурации приемно-излучающей системы антенн и служат основой для вычислений трансформаций - зависимости кажущегося сопротивления от глубины зондирования. Трансформации позволяют с высоким разрешением создавать трехмерные электромагнитные образы, которые дают качественно правильное представление об исследуемой геологической среде.
3. Частотная дисперсия электрических свойств среды проявляется в индуктивных ЗС как в виде индукционно вызванной поляризации, так и в виде антенного поляризационного эффекта - АПЭ. В антеннах с распределенными емкостью и сопротивлением АПЭ инвертирует полярность переходных процессов и аномально медленно убывает во времени. Амплитуда АПЭ пропорциональна квадрату сопротивления проводов антенн.
4. Суперпарамагнитные явления, связанные с релаксацией намагниченности нанометровых ферромагнитных частиц в горных породах, проявляются в виде процесса становления, убывающего во времени как $1/t$. Над некоторыми месторождениями руд и разломными зонами наблюдается каминный суперпарамагнитный эффект – аномальное замедление скорости спада процесса становления.

5. Разработанная TEM-FAST система – это высокопроизводительная технология ЗС в диапазоне глубин до 300 м. TEM-FAST эффективно используется для исследований неоднородных и частотно дисперсных геологических сред и позволяет решать разнообразные научные и прикладные геоэлектрические проблемы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 72 наименований. Работа содержит 195 страниц текста, 88 рисунков и 4 таблицы.

Автор выражает глубокую благодарность коллегам, с которыми ему посчастливилось вместе работать:

Э.Б.Файнбергу, Е.О.Хабенскому, Б.С.Светову, В.В.Агееву, В.Ф.Лаптеву, Ю.Л.Титкову, Е.М.Ершову, Харитонову А.В. (Москва), Ю.В.Николаеву (г.Октябрьский), В.Д.Брагину (Бишкек), О.А.Сусину (Севастополь), а также зарубежным коллегам Р.Andrieux (Париж), D.Fabre, J-M Vengeon, F.Robach (Гренобль), Gad El-Oady (Каир).

Становление поля в горизонтально однородных средах

Этот раздел посвящен анализу процессов становления поля в совмещенных приемно-излучающих антеннах над слоистыми горизонтально однородными средами без частотной дисперсии электропроводности и магнитной восприимчивости.

При геоэлектрических исследованиях приповерхностных геологических структур (до 100-300 м) возможно и целесообразно использовать совмещенные петлевые антенны с размерами $L \times L$ от 10×10 до 100×100 м² и диапазон времен становления от первых микросекунд до 10-20 мс.

Выбор именно совмещенных установок, в которых одна и та же горизонтальная петлевая антенна используется как для возбуждения электромагнитного поля, так и для измерений откликов среды, определяется следующими факторами:

- высокой производительностью полевых исследований (поскольку отпадает необходимость применять измерительные датчики, обеспечивать синхронизацию измерителя и генератора и т.д.);
- простотой и компактностью измерительной аппаратуры, в которой отпадает необходимость в существенном усилении принимаемого сигнала от приемного датчика, коррекции частотных характеристик датчиков и т.п.;
- локальностью исследований - слабой зависимостью регистрируемых сигналов от поверхностных неоднородностей, поскольку отклики среды усредняются в пределах достаточно большого контура антенны;
- ценными свойствами сигналов ЗС в совмещенных антеннах, которые эффективно используются при интерпретации данных зондирования.

При средних сопротивлениях пород от 10-100 Ом•м 80% измеряемых переходных характеристик в динамическом диапазоне от 1 мкВ до 10 В и возбуждающих токах $I \sim 1-4$ А соответствует промежуточной зоне ЗС, т.е. $0.1 < t/\mu\sigma L^2 < 3$ (t - время, μ и σ - магнитная проницаемость и проводимость среды). В этой зоне ЗС затухание электромагнитного поля от излучающей антенны определяется в равной мере, как скин-эффектом, так и геометрическим рассеянием. Таким образом, малоглубинные зондирования ЗС правильней было бы называть зондированиями в промежуточной зоне, хотя традиционно их называют ЗСБЗ- (зондирования становлением в ближней зоне). Поведение процессов становления поля в промежуточной зоне, к сожалению, не удастся описать простыми аналитическими выражениями, как это имеет место для ближней и дальней зон ЗС, что вынуждает исследователей применять численные методы анализа.

Именно по этой причине в ЗС принята нормировка переходных характеристик в кажущееся сопротивление на основе асимптотических выражений для ближней зоны зондирования. Несмотря на простоту и устойчивость такой нормировки, у нее есть существенный недостаток - форма кривых кажущегося сопротивления для одинаковых моделей среды зависит от размера антенны. Для инверсии данных ЗС в классе горизонтально слоистых моделей среды, это,

конечно же, не имеет значения, поскольку прямая задача решается с учетом реального размера антенны. Однако это свойство кривых кажущегося сопротивления $\rho(t)$, рассчитанных по формулам ближней зоны ЗС, не позволяет эффективно использовать трансформации $\rho(t) \rightarrow \rho(h)$, которые по своей природе должны характеризовать исследуемую среду вне зависимости от конфигурации применяемой установки зондирования.

В работе предложен и реализован иной способ нормировки переходных характеристик, базирующийся на «полной» формуле ЗС над однородным полупространством, которая справедлива при любых параметрах $t/\mu\sigma R^2$. В совмещенных круглых антеннах радиуса R сигнал становления $E(t)$ можно выразить в виде

$$E(t) / I = \frac{\mu\pi R}{t} F(t/\tau) \quad \tau = \mu\sigma R^2 \quad (1)$$

$$F(t/\tau) = (t/\tau) \int_0^\infty u^2 \alpha(t, u) J_1^2(u) du - u^2 t/\tau \quad (1a)$$

$$\alpha(t, u) = \left[\frac{e}{u \sqrt{\pi t/\tau}} - \operatorname{erfc}(\sqrt{t/\tau} u) \right] \quad (2)$$

Нетрудно заметить, что функция $t^*E(t)/I$ из (1) зависит только от известного размера установки R и нормированного времени t/τ . Если теперь экспериментально зарегистрированные характеристики поля $E_{\text{экс}}(t)/I$ умножить на $t/\mu\pi R$, то разрешая нелинейное уравнение

$$\frac{t}{\mu\pi R} * \frac{E_{\text{экс}}(t)}{I} = F(t/\tau) \quad (3)$$

относительно переменной $\tau = \mu\sigma R^2$ для каждого времени t можно найти значение проводимости σ или сопротивления $\rho = 1/\sigma$.

Функция $F(t/\tau)$ (1a), описывающая поведение поля над однородным полупространством в любой стадии становления, может быть легко вычислена и табулирована. Уравнение (3) устойчиво разрешается в интервале $0.2 < t/\mu\sigma R^2$. На ранних стадиях становления, соответствующих дальней зоне $t/\mu\sigma R^2 \ll 0.2$, сигнал в совмещенных антеннах не зависит от сопротивления среды $F(t/\tau) \rightarrow 1/(2\pi)$ и проводимость σ не может быть найдена из (3). На поздних стадиях ЗС при $t/\mu\sigma R^2 > 3$ найденная из (3) проводимость σ совпадает с величиной, которая может быть получена при традиционной нормировке по формулам ближней зоны становления.

На рис.1 приведен пример нормировки переходных процессов, соответствующих трехслойной модели среды, по формуле

ближней зоны (А) и из уравнения (3) – (Б).

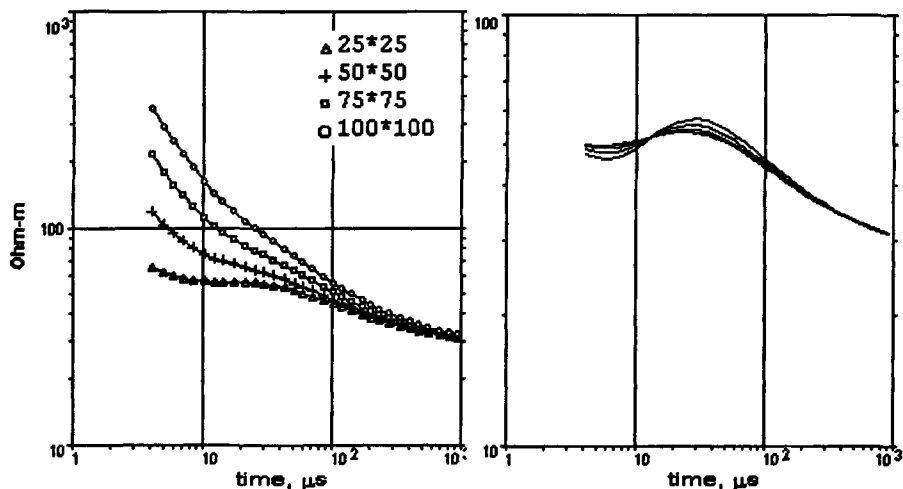


Рис 1. Кажущиеся сопротивления ЗС над трехслойной моделью среды для совмещенных антенн разного размера. А- нормировка ближней зоны, Б- нормировка по «полной» формуле (1-3).

Кривые сопротивления на (А) совпадают лишь на временах $t > 500$ мкс, в то время, как на (Б) они отличаются не более, чем на 10% всюду при $t > 4$ мкс.

Трансформации переходных характеристик поля

Трансформациями переходных характеристик в ЗС называют процедуру вычислений зависимостей кажущегося сопротивления от кажущейся глубины исследования на основе либо переходных характеристик $E(t)$, либо кривых кажущегося сопротивления $\rho(t)$. Иногда в качестве трансформаций используют зависимость продольной проводимости S от глубины исследований (S_T - трансформация)

Цель различного рода трансформаций – получение приближенной картины строения исследуемой геологической среды и оценки ее основных параметров. Иногда геоэлектрический разрез, построенный по трансформациям, называют «псевдоразрезом» или электромагнитным образом исследуемой среды. Достоинством всех известных и широко используемых в ЗС трансформаций является простота и оперативность вычислений. Обычно для построения трансформаций не требуется какая-либо априорная информация об изучаемой среде (например, предположение о горизонтальной однородности).

Напротив, электромагнитные образы сред, построенные по трансформациям, в совокупности с геологическими данными служат априорной информацией для начала более детальной интерпретации данных на основе инверсий, аналитических продолжений полей и т.д.

Разработанная в диссертации трансформация относится к дифференциальному типу и базируется на особенностях поведения переходных характеристик поля и его временных производных на каждом времени t в каждой, отдельно взятой точке зондирования. Электромагнитный 2D или 3D образ изучаемой среды строится в виде томографической картинки, состоящей из фрагментов, полученных на основе трансформаций в каждой точке зондирования по профилю и площади исследований.

Использование временных производных от экспериментально зарегистрированных переходных характеристик ЗС существенно увеличивает разрешающую способность трансформаций, однако снижает устойчивость вычислений. Для получения оптимального результата в трансформациях необходимо учитывать информацию об универсальных аналитических свойствах переходных характеристик поля ЗС и информацию о шумах и погрешностях измерений, искажающих экспериментальные данные.

Первым этапом построения трансформаций является этап сглаживания и вычислений временных производных сигналов становления. В основе этой процедуры лежит идея, сформулированная Б.С.Световым и П.О.Барсуковым. В предположении о том, что сигналы ЗС подчиняются диффузионному уравнению, можно утверждать, что переходные характеристики представимы в виде суперпозиции экспоненциально затухающих во времени элементарных процессов:

$$f(t) = \int_0^{\infty} E(s)e^{-st} ds \quad (4)$$

Действительная функция $F(s)$ от действительной, положительной частоты s называется экспоненциальным спектром процесса $f(t)$.

В.П.Губатенко и др. исследователями показано, что в совмещенных приемно-излучающих антеннах в средах с частотно независимой проводимостью экспоненциальный спектр положителен $E(s) > 0$, а все производные сигнала $f(t)$ являются функциями с «совершенной монотонностью», т.е.

$$\frac{d^n f}{dt^n} = (-1)^n \int_0^{\infty} s^n E(s)e^{-st} ds \quad (-1)^n \frac{d^n f}{dt^n} > 0 \quad n \geq 0 \text{ и } t > 0 \quad (5)$$

Проблема сглаживания переходных характеристик ЗС сводится к решению задачи на минимум функционала невязки Ω :

$$\Omega = \|U(t) - f(t)\| \quad (6)$$

где $U(t)$ – исходные переходные характеристики поля, измеренные с погрешностью $\pm \Delta(t)$, $f(t)$ – синтезированная переходная характеристика из (4), $\|\bullet\|$ – среднеквадратическая норма, учитывающая погрешности измерений $\Delta(t)$ на каждом времени t . Поиск минимума Ω (6) в предположении, что $E(s) > 0$, приводит к вычислению экспоненциального спектра $E(s)$, причем если в среде нет частотной зависимости проводимости, то одновременно выполняется условие невязки: $|U(t) - f(t)| < \Delta(t)$ для каждого времени t .

Далее во всех операциях, необходимых для получения трансформаций, используется синтезированная переходная характеристика $f(t)$ и ее временные производные, полученные на основе $E(s)$ (например (5)). Отметим, что сколь бы не были велики ошибки в вычисленных спектрах $E(s)$ (вариационная задача (6) весьма неустойчива), синтезированная переходная характеристика $f(t)$ и все ее производные всегда остаются гладкими функциями времени.

На втором этапе построения трансформаций по синтезированным характеристикам $f(t)$ вычисляются зависимости кажущего сопротивления от времени $\rho_k(t)$ на основе уже описанного ранее алгоритма (3).

Третий этап вычислений связан с увеличением разрешающей способности трансформаций и вычислением кажущейся глубины исследований.

Заметим, что на этом этапе, где используются временные производные кажущегося сопротивления, принципиально важно, чтобы исходные кривые $\rho_k(t)$ не содержали искажений (или содержали их по минимуму), связанных с влиянием размера установки зондирования.

Кажущееся сопротивление $\rho_k(t)$ трансформируется в $\rho_h(t)$ на основе простой идеи, плодотворно используемой в методе МТЗ: $\rho_h(t) = \rho_k(t) * k(t)$, где

$$k(t) = \frac{1}{(1 - \nu)^{3/2}} \quad \nu = \frac{d \ln \rho_k(t)}{\ln t} \quad | \nu | < 1$$

Сопротивление $\rho_h(t)$ возрастает, если растет логарифмическая производная $\nu > 0$ и уменьшается, если $\nu < 0$.

Кажущаяся или эффективная глубина h_k исследований для каждого времени t определяется как

$$h_k = \sqrt{\frac{t \beta}{\mu}} \quad \beta \in [\rho_k \rho_h] \quad \mu = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$$

Параметр β имеет размерность Ом*м, регулирует разрешающую способность трансформаций и выбирается между значениями величин $\rho_k(t)$ и $\rho_h(t)$. Для среднего уровня погрешностей в исходных данных $\Delta \quad \beta \approx (\rho_k * \rho_h)^{1/2} \approx \rho_k k(t)^{1/2}$.

На четвертом этапе на трансформированных кривых $\rho_h(h_k)$ определяются области (точки) в которых имеются экстремумы скорости изменения $\rho_h(h_k)$ т.е. $d^2\rho_h(h_k)/dh_k^2 = 0$. На основе моделирования процессов ЗС в слоистых средах установлено, что границы слоев локализуются в окрестностях именно этих точек и по ним можно с приемлемой погрешностью оценить мощности слоев и их количество. Эти оценки необходимы для определения стартовой модели разреза, которая используется в качестве начального приближения при 1D инверсиях.

На рис.2 представлены трансформации процессов ЗС и слоистые модели, которые им соответствуют. Модельные расчеты выполнены для совмещенных приемно-генераторных антенн размером 25х25 м*м. Горизонтальными маркерами обозначены кажущиеся глубины ($h=h_k$), соответствующие условию $d^2\rho_h(h)/dh^2 = 0$.

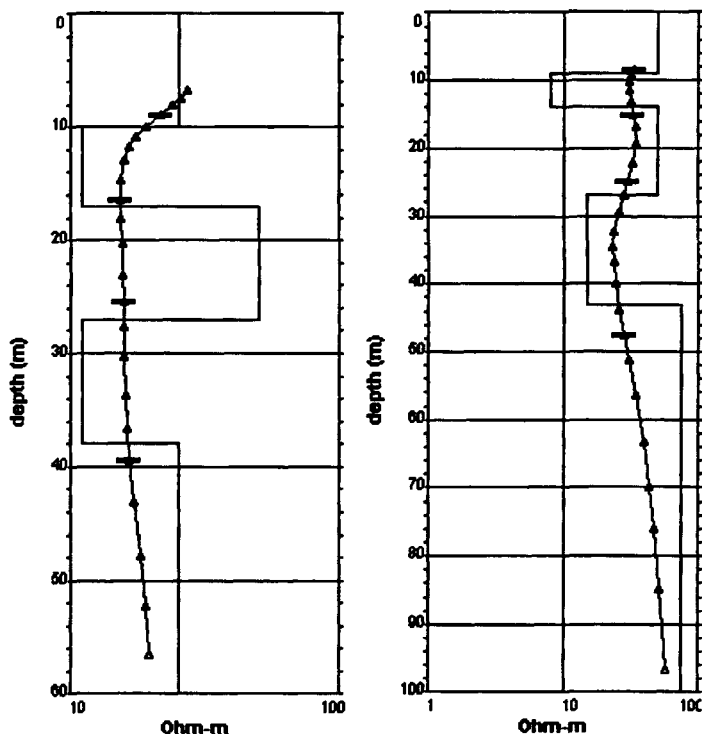


Рис. 2 Трансформации переходных характеристик ЗС в $\rho(h)$ и соответствующие им слоистые модели среды.
Горизонтальная ось- сопротивление, вертикальная – глубина.

В горизонтально слоистых средах трансформации $E(t) \rightarrow \rho(t) \rightarrow \rho(h)$ используются, как правило, только для определения стартовых моделей для 1D инверсий.

Следует заметить, что в средах с частотной зависимостью проводимости сглаживание методом экспоненциальных спектров при условии положительности $F(s)$ из (4) не приводит к желаемому результату и условие невязки $|U(t)-f(t)| < \Delta(t)$ не выполняется для всех времен t . Для эффективного сглаживания в этом случае ограничения на знак $E(s)$ не накладываются.

С другой стороны, большие погрешности при сглаживании $E(t)$ с ограничением на знак экспоненциальных спектров говорит о том, что исследователь имеет дело с частотно дисперсной средой и должен применять соответствующие алгоритмы для интерпретации экспериментальных данных.

Напомним, что любые неоднородности исследуемой среды в отсутствии частотной дисперсии проводимости при ЗС с совмещенными антеннами не могут нарушить условие $E(s) > 0$.

Зондирования горизонтально неоднородных сред

Для оценки эффективности ЗС с совмещенными антеннами и алгоритмов 1D инверсий и трансформаций было проведено физическое моделирование процессов становления над различными моделями геологических структур. Для моделирования использовались алюминиевые пластины и пленки. Диапазон измерений переходных характеристик от 4 мкс до 4000 мкс. В качестве антенны использовалась 20-витковая катушка размером 10×10 см*см. Коэффициент пересчета модельных результатов в «натурные» $k=400$ для линейных размеров и $1/400$ для продольных проводимостей.

Экспериментально полученные на пленочных моделях переходные характеристики обрабатывались точно так же, как и обычные полевые данные, т.е. последовательно использовались процедуры, соответствующие ранее описанным этапам трансформаций.

На рис.3 приведены результаты 1D инверсий (А) и пленочная модель (Б). Как видно, значимые отклонения результатов 1D инверсий и трансформаций наблюдаются лишь вблизи вертикальных неоднородностей. Субвертикальная пластина, имитирующая разломную зону, локализуется с достаточно большими погрешностями, тем не менее, возможна оценка ее наклона и глубины залегания. Заметим, что в краевых частях модели имитирован рельеф дневной поверхности с уклоном 15-20% и плоскость антенны совпадает с этой поверхностью (как это и происходит на практике). Однако даже в этих весьма неблагоприятных условиях зондирований оценки глубины залегания пластин оказываются близкими к истинным.

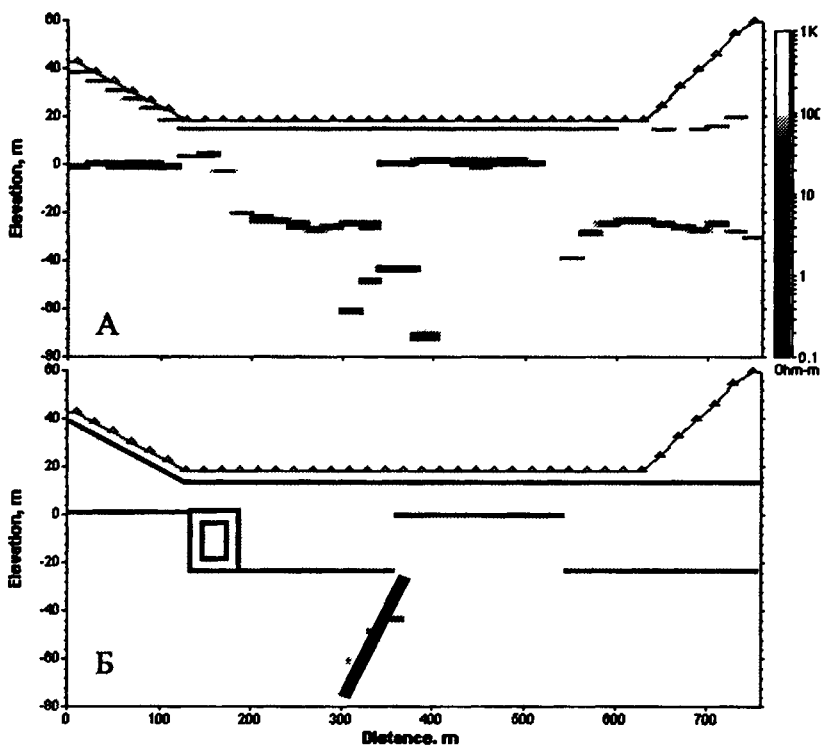


Рис.3 Результаты 1D инверсии (А) и пленочная модель (Б).
Размер совмещенной антенны 40х40 м*м (два пикета на профиле).
Пикеты соответствуют центру антенны.

На рис.4 показан электромагнитный образ, полученный на основе трансформаций $E(t) \rightarrow \rho(t) \rightarrow \rho(h)$, и пленочная модель разреза.

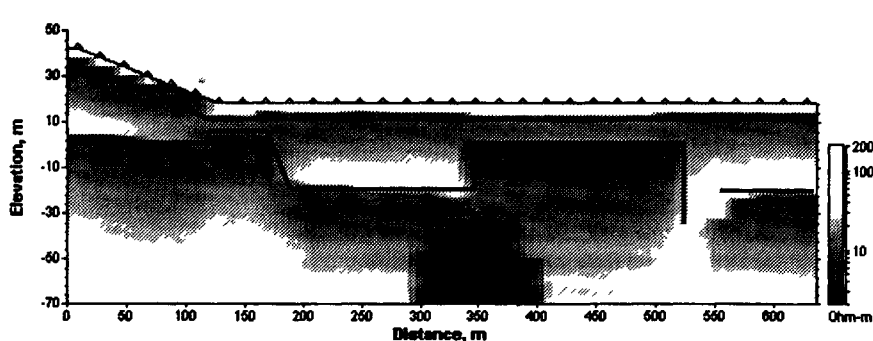


Рис 4. Электромагнитный образ, полученный на основе трансформаций.

Тестирование разработанной системы трансформаций и одномерных инверсий на пленочных моделях показало, что при использовании совмещенных приемно-излучающих антенн получаемые электромагнитные образы качественно правильно отражают строение исследуемых структур. Даже в сложно построенных моделях с резкими вертикальными и наклонными проводящими неоднородностями удастся количественно оценить параметры моделей с приемлемой точностью. Значимые искажения в результатах 1D инверсий или трансформаций появляются лишь тогда, когда центр совмещенной антенны $L \times L$ располагается на расстояниях ближе, чем $1.5L$ от горизонтальной неоднородности. Если расстояние оказывается больше, результат инверсии оказывается неискаженным. Наилучшие результаты в резко неоднородных средах достигаются при совмещении электромагнитных образов, полученных по трансформациям и на основе 1D инверсий.

Зондирования сред с частотной зависимостью электрических свойств

Как показывают экспериментальные исследования, частотная дисперсия электропроводности горных пород существенно искажает результаты ЗС. Даже незначительные отношения проводимостей на высоких σ_∞ и низких σ_0 частотах ($\sigma_\infty/\sigma_0 \sim 1.05 \div 1.10$) в приповерхностных отложениях приводят к появлению т.н. «отрицательных аномалий ЗС». Индуцированные в горных породах токи изменяют свое направление и создают вторичное магнитное поле, направленное навстречу породившему его первичному магнитному полю. Регистрируемая в приемной антенне э.д.с., также изменяет свой знак, и переходные характеристики становятся отрицательными. Интерпретационные алгоритмы, основанные на квазистационарной теории взаимодействия э-м полей с проводящей средой, перестают работать и метод ЗС теряет свою эффективность. Понятно, что для преодоления этой проблемы необходимо «модернизировать» квазистационарную теорию и рассматривать процессы взаимодействия полей со средой с учетом токов смещения. Для горизонтально слоистых сред такое «обновление» не представляет проблемы: в известных аналитических формулах частотно независимая проводимость заменяется на дисперсную комплексную функцию $\sigma \rightarrow \sigma(i\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega)$ и затем производится интегрирование по пространственным и временным гармоникам для получения переходных характеристик ЗС. Экспериментально полученные на образцах горных пород зависимости $\sigma(i\omega)$ обычно аппроксимируются простыми функциями, содержащими несколько параметров. Чаще всего используются формулы (дисперсионные модели) Дебая, Кола-Кола, Девидсона. Все они содержат такие параметры как поляризуемость $\eta = 1 - \sigma_0/\sigma_\infty$ и постоянную времени релаксации τ . Самая простая и физически «прозрачная»

дисперсионная зависимость была получена Дебаем

$$\sigma(p) = \sigma_{\infty} \left(1 - \frac{\eta}{1 + p\tau}\right) \quad \eta = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{\infty}} \quad p = i\omega \quad (7)$$

Модель Кола-Кола, которая чаще всего используется для описания дисперсии в частотной области, можно представить в виде суперпозиции элементарных процессов Дебая:

$$\frac{\sigma(p)}{\sigma_{\infty}} = 1 - \frac{\eta}{1 + (p\tau)^c} = 1 - \eta \int_0^{\infty} \frac{F(s) ds}{p + s}$$

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{(s\tau)^c \sin(\pi c)}{[1 + (s\tau)^c \cos(\pi c)]^2 + [(s\tau)^c \sin(\pi c)]^2} \quad (7a)$$

Функцию $F(s)$ иногда называют спектром (распределением) Фарадея (рис. 5).

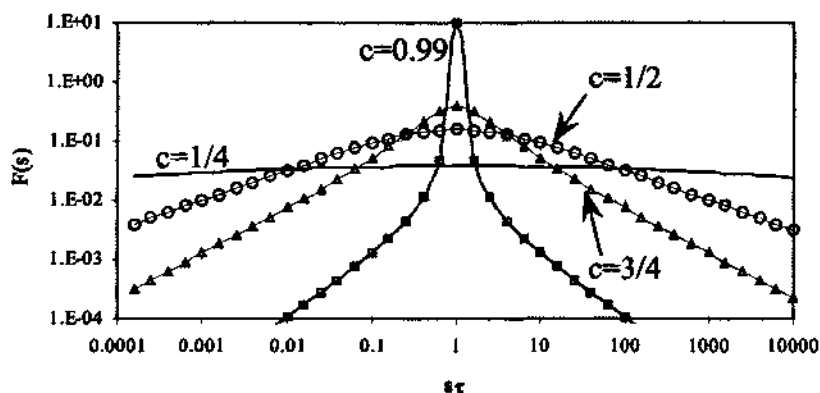


Рис 5. Функция распределения Фарадея $F(s)$ для различных «с» (7a).

При $c < 1$ спектры Фарадея для модели Кола-Кола равномерны в широком диапазоне $s\tau$ и определение какой-либо «характерной постоянной времени» теряет смысл.

Как показывают экспериментальные исследования дисперсионных процессов в ЗС, весьма удобной аппроксимационной конструкцией может служить формула, содержащая несколько (N) элементарных дебаевских процессов

$$\frac{\sigma(p)}{\sigma_{\infty}} = 1 - \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k}{p + 1/\tau_k} \quad (8)$$

Таким образом, каждый слой 1D модели характеризуется как мощностью h и сопротивлением $\rho = 1/\sigma_0$, так и дисперсионными характеристиками η_1, η_2, \dots и τ_1, τ_2, \dots . Обычно количество дисперсионных параметров в (8) $N \leq 5$.

Б.С. Световым и др. исследователями показано, что обратная задача в классе горизонтально слоистых моделей с дисперсией электропроводности в общем случае не имеет единственного решения. Однако если на основе какой-либо априорной информации локализовать в пространстве поляризующийся слой, обратная задача решается единственным образом, хотя и в рамках эквивалентных моделей (в классической постановке обратной задачи без учета частотной дисперсии проводимости эквивалентность также присутствует).

Экспериментально установлено, что в подавляющем большинстве случаев поляризационный эффект индуцируется в приповерхностных хорошо проводящих отложениях (глины, сулинки). Этот факт легко экспериментально проверяется на основе сравнений переходных характеристик в антеннах разных размеров или в антеннах, приподнятых над поверхностью земли.

Полагая, что только верхний (или ближайший к поверхности) проводящий слой обладает частотно дисперсионными свойствами, можно осуществить инверсию экспериментальных данных и найти не только мощности и сопротивления слоев, но и параметры дисперсии - поляризуемости η и постоянные времени τ . Инверсионный алгоритм несущественно отличается от традиционных алгоритмов 1D инверсий в классе горизонтально слоистых сред. Особенность заключается лишь в том, что для сужения пространства эквивалентных решений дисперсионный алгоритм минимизирует значения поляризуемости η . Без этого условия модели с низкими значениями η ($\sigma_\infty/\sigma_0 \sim 1.02-1.05$) в приповерхностных толщах и модели с огромными значениями поляризуемости ($\sigma_\infty/\sigma_0 > 10$) в глубоко залегающих слоях ($\sim 100-300$ м) могут оказаться эквивалентными, т.е. их переходные характеристики могут отличаться лишь в пределах интервалов погрешностей измерений.

На рис. 6 приведены кажущиеся сопротивления $\rho_k(t)$ для горизонтально слоистой модели с дисперсией сопротивления в верхнем и глубинном слоях.

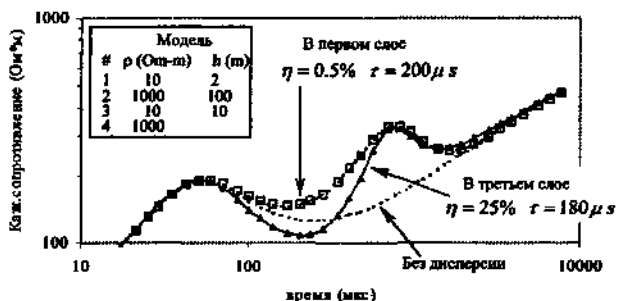


Рис. 6 $\rho_k(t)$ для моделей с дисперсией Дебая (7), $\eta = 1 - \sigma_0/\sigma_\infty$.

Как видно различия в кривых $\rho_k(t)$, осложненных дисперсией в поверхностном и глубинном слоях, не велики (40% при $t=200$ мкс), хотя поляризуемость η глубинного слоя (~ 100 м от поверхности) в 50 раз выше, чем поверхностного. Однако, весьма малые дисперсии в поверхностном слое мощностью всего лишь 2 м и $\eta=0.5\%$ существенно изменяют форму переходного процесса, хотя и не приводят к инверсии знака.

В качестве примера на рис 7 представлена карта распределения поляризуемости η , полученная на основе 1D инверсий данных площадных зондирований в районе распространения мерзлых пород. Области с повышенными значениями поляризуемости $\eta > 2\%$ локализуют зоны оттаивания мерзлых пород (талики), что подтверждено скважинными исследованиями. Наблюдается корреляция между величиной поляризуемости и постоянной времени релаксации: чем выше η , тем больше значения τ .

В правой части рисунка показаны кажущиеся сопротивления, полученные в зонах с повышенными и низкими значениями поляризуемости.

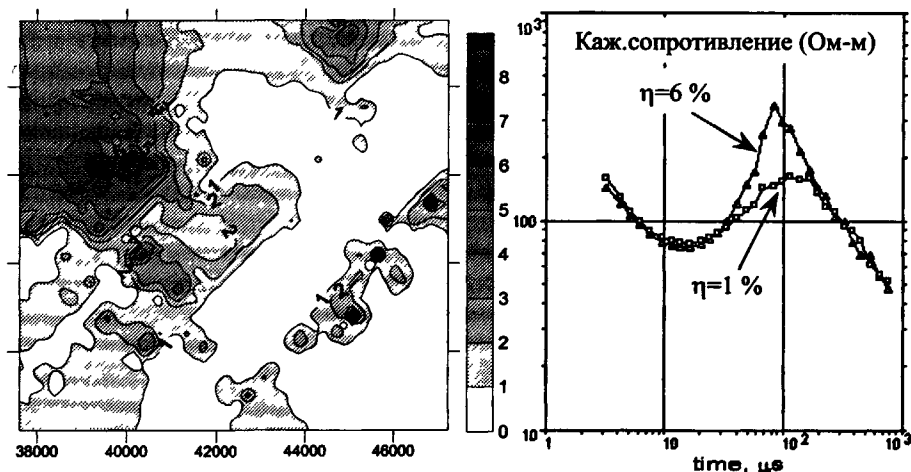


Рис.7 Распределение поляризуемости η (%) в приповерхностных глинистых отложениях мощностью $h=5-25$ м и сопротивлением $\rho=30-80$ Ом•м, постоянная времени релаксации $\tau=10-20$ мкс, модель Дебая (7). Зондирования с совмещенными антеннами 50×50 м*м.

Отметим, что инверсия данных ЗС, полученных в поляризующихся средах, дает однозначные и устойчивые результаты только при использовании совмещенных антенн ЗС, в которых инверсия знака регистрируемого сигнала и всех временных производных возможна лишь вследствие частотной дисперсии электропроводности исследуемой среды.

В разнесенных же установках ЗС инверсия знака сигнала или его производных возможно из-за неоднородности среды, что приводит к неоднозначности и неустойчивости результатов инверсии

По мнению автора, физическая природа возникновения дисперсионных эффектов в ЗС с постоянными времени релаксации из микросекундного диапазона не связана с электрохимическими и электроосмотическими явлениями (в отличие от классического метода ВП). Заметное возрастание комплексной проводимости некоторых горных пород связано с аномально большими значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon/\epsilon_0 \sim 10^3 \div 10^5$ на низких частотах ($f < 1$ Гц) и медленным убыванием ϵ/ϵ_0 до значений 3-10 при $f \sim 0.1 \div 1$ МГц. Уменьшение значений ϵ с частотой поля и появление квадратурной (мнимой) части диэлектрической проницаемости глубоко изучены в теории несовершенных диэлектриков (т.н. нормальная дисперсия ϵ).

При сопоставлении результатов измерений поляризуемости гальваническим (метод ВП) и индукционным (ЗС) методами необходимо учитывать тот факт, что регистрируемые импульсные отклики поляризующейся среды $\rho(t)$ или $\sigma(t)$ принципиально различны. В диссертации теоретически и экспериментально показана возможность вычислений сравнительных оценок частотной дисперсии сред на основе характеристик ЗС и вторых временных производных от переходных характеристик метода ВП.

Полученные автором экспериментальные оценки дисперсии ϵ для глинистых и известковых пород на основе ЗС хорошо согласуются с опубликованными результатами исследований ϵ в частотном и временном диапазонах на образцах и естественном залегании горных пород.

В работе также приводится ряд экспериментальных результатов, свидетельствующих об аномальном поведении комплексной электропроводности некоторых горных пород: убывании $\sigma(\omega)$ с увеличением частоты электромагнитного поля, т.е. $\sigma_0 > \sigma_\infty$ в диапазоне частот 0.1-100 КГц.

Такая дисперсия электропроводности также приводит к инверсии знака переходного процесса ЗС. Однако на временах, больше, чем постоянная релаксации дисперсионных процессов, переходные характеристики ЗС аномально возрастают.

В некоторых геологических условиях «аномальная» дисперсия электропроводности приводит к возникновению резонансных явлений – регистрируемые переходные характеристики многократно меняют знак, осциллируя с частотой 10-100 КГц. Частота осцилляций не зависит от размера и конфигурации антенной установки ЗС и определяется исключительно свойствами горных пород. Подобные явления часто возникают в разломных зонах и служат хорошим поисковым признаком при геоэлектрических исследованиях сложных геологических структур.

Антенный поляризационный эффект

Описанные ранее эффекты вызванной поляризации в ЗС связаны с протеканием индукционных токов в геологических средах с частотной зависимостью электрических свойств. Однако это не единственный физический механизм, вызывающий искажения переходных характеристик поля ЗС в частотно дисперсных средах.

Экспериментально замечено, что регистрируемые переходные процессы в совмещенных установках зависят от распределенного сопротивления и емкости проводов, из которых изготовлена антенна. В поляризующихся средах наблюдаются «отрицательные аномалии ЗС» (т.н. «отрицательные хвосты»), аномально медленно затухающие во времени ($E(t) \sim 1/t$) и регистрируемые вплоть до первых сотен миллисекунд. Теоретически можно показать, что столь медленный спад переходных процессов в совмещенных индукционных антеннах не может быть вызван ни особенностями структуры исследуемого геоэлектрического разреза, ни какой-либо особой частотной зависимостью электропроводности или диэлектрической проницаемости горных пород.

Для объяснения этого феномена была проанализирована математическая модель приемно-излучающей антенны с распределенными электрическими параметрами, лежащей на поверхности среды с частотно дисперсной диэлектрической проницаемостью.

Эквивалентная электрическая схема приведена на рис 8.

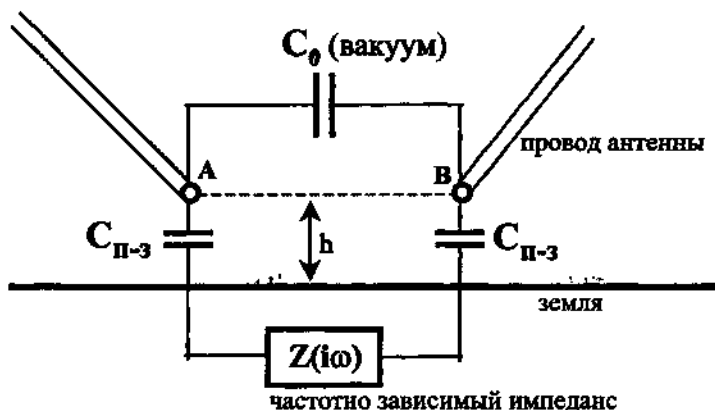


Рис.8 Эквивалентная электрическая схема антенны на поверхности поляризующейся среды.

Предположим, что частотная зависимость диэлектрической проницаемости приповерхностных отложений описывается моделью Девидсона:

$$\varepsilon(p)/\varepsilon_0 = \varepsilon_{r0} + \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}}{(1 + p\tau)^\nu} \quad p = i\omega \quad \varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ Ф/м}$$

где ε_{r0} и $\varepsilon_{r\infty}$ - относительные диэлектрические проницаемости на низких и высоких частотах, τ - постоянная времени релаксации, ν - т.н. логарифмическая скорость релаксации. Напряжение на терминалах совмещенной антенны $U(t)$ после выключения постоянного тока I на временах, превышающих длительность индукционных процессов становления, описывается формулой

$$\frac{U(t)}{I} \approx \frac{4R^2}{\pi^3} \frac{C(0) - C(\infty)}{\tau} \frac{e^{-t/\tau}}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{\tau}{t}\right)^{1-\nu} \quad [\text{В/А}] \quad (9)$$

где $\Gamma(\nu)$ - Гамма-функция Эйлера ($\Gamma(\nu) > 0$ при $0 < \nu \leq 1$), R - суммарное сопротивление проводов антенны, $C(0)$, $C(\infty)$ - емкость проводов антенны на низких и высоких частотах (емкость измеряется при разрыве антенны посередине периметра). Полярность сигнала всегда совпадает с напряжением $U_0 = IR$, которое было на терминалах антенны до выключения тока I (переходная характеристика ЗС всегда имеет обратную полярность!). Как следует из (9) процесс $U(t)$, названный антенным поляризационным эффектом (АПЭ), пропорционален квадрату сопротивления и емкости проводов антенны. Многочисленные измерения частотной зависимости диэлектрической проницаемости на образцах горных пород дают оценку параметра ν в пределах $\nu = 0.2 - 0.5$, а постоянная времени релаксации τ для глинистых пород лежит в пределах 10-100 мс. Таким образом, в диапазоне времен ЗС $t \sim 0.1 - 5$ мс скорость спада АПЭ крайне медленная $U(t) \sim 1/t^{0.7}$.

Формула (9) может быть получена и для дисперсионной модели Кола-Кола

$$\frac{U(t)}{I} \approx \frac{4R^2}{\pi^3} \frac{C(0) - C(\infty)}{\tau} \frac{-1}{\Gamma(-\nu)} \left(\frac{\tau}{t}\right)^{1+\nu} \quad [\text{В/А}] \quad (10)$$

Полевые эксперименты полностью подтвердили гипотезу о физическом механизме проявления антенного поляризационного эффекта.

На рис.9 представлены результаты измерений с фиксированными совмещенными антеннами, подтверждающие справедливость (9) и (10).

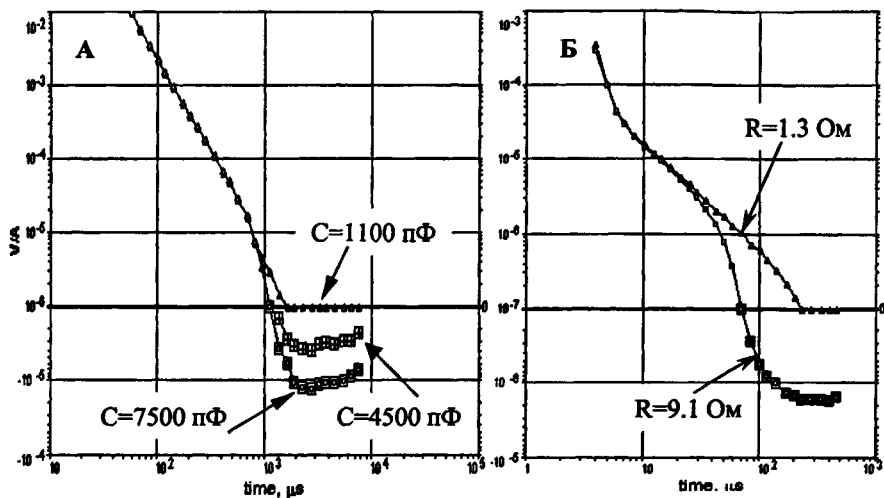


Рис 9. Антенный поляризационный эффект в совмещенных приемно-излучающих антеннах: А - емкость проводов антенны изменяется в зависимости от влажности воздуха, Б - провода имеют различное сопротивление.

На рис. 10 изображена схема, поясняющая возникновение и проявление антенного поляризационного эффекта

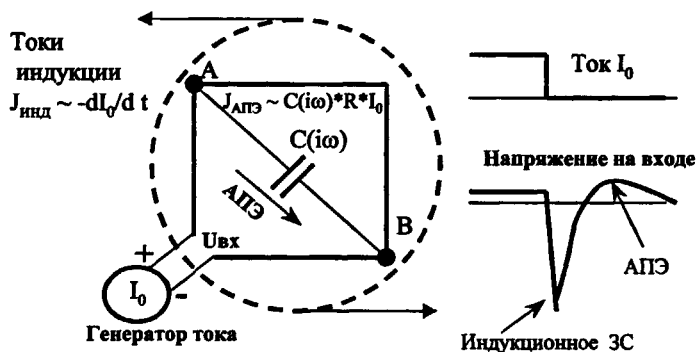


Рис 10. Совмещенная приемно-излучающая антенна с сопротивлением проводов R и частотно зависимой емкостью $C(i\omega)$.

Падение напряжения на каждом участке проводов антенны U_{AB} заряжает емкость $C(i\omega)$, а после выключения I_0 создают на терминалах антенны напряжение, совпадающее по знаку с $U_0 = I_0 R$. Направление же индукционных токов совпадает с $-d I_0/dt$ (пунктирная окружность).

Как показали эксперименты, АПЭ регистрируется не только в совмещенных антеннах. В установках «петля в петле», «петля-датчик» АПЭ также интенсивно проявляется, причем в зависимости от неоднородностей приповерхностного слоя пород и конфигурации приемно-излучающей антенной системы, знак АПЭ может изменяться и совпадать с индукционным процессом ЗС. Этот факт доказан экспериментально на основе искусственного создания неоднородностей распределенной емкости антенны - заглубления сегментов антенн в приповерхностные поляризующиеся породы.

Таким образом, распределенные частотно зависимые параметры реальных антенн создают даже в горизонтально однородных средах электрические поля, распределение которых резко отличается от круговой симметрии индукционных процессов ЗС. Эти поля регистрируются в виде антенного поляризационного эффекта. Постоянные времени и скорость релаксации АПЭ определяются дисперсионными параметрами среды и, как правило, АПЭ затухает значительно медленнее, чем индукционные процессы ЗС. АПЭ, по-видимому, может являться причиной многих необъяснимых до сих пор несоответствий в интерпретации данных ЗС и результатов, полученных другими методами геофизики.

Частотная дисперсия электрических свойств среды проявляется в индуктивных ЗС как в виде индукционно вызванной поляризации, так и в виде антенного поляризационного эффекта - АПЭ. В совмещенных установках ЗС оба процесса изменяют знак переходных характеристик или их первых производных. Индукционные ВП процессы пропорциональны току в излучающей антенне и не зависят от емкости и сопротивления проводов. АПЭ зависит от емкости проводов и при фиксированном токе пропорционален квадрату сопротивления проводов антенны. Как правило, релаксация АПЭ медленнее, чем $1/t$, в то время как индукционные ВП убывают быстрее $1/t^2$.

Суперпарамагнитная релаксация (SPM эффект)

В теории ЗС магнитные свойства исследуемых сред обычно не учитываются, полагая, что μ среды слабо отличается от $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м. Однако сначала австралийские, а затем и российские исследователи показали, что частотная дисперсия магнитной восприимчивости горных пород может существенно искажать измеряемые переходные характеристики и результаты интерпретации, полученные без учета этих явлений.

Частотная дисперсия магнитной восприимчивости или суперпарамагнитный эффект (SPM) впервые был исследован Л.Неелем более 50 лет назад.

Было установлено, что магнитный момент одинаковых субдоменных ферромагнитных частицы под воздействием температурных флуктуаций релаксирует после выключения намагничивающего поля по

экспоненциальному закону $J(t) = J_0 \exp(-t/\tau)$. Постоянная релаксации τ экспоненциально зависит от константы магнитной анизотропии k_1 , объема частиц V и тепловой энергии kT : $\tau = \tau_0 \exp(-k_1 V / 4kT)$, $\tau_0 \approx 10^{-9}$ сек.

Если объем частиц мал и энергия анизотропии $k_1 V$ сравнима с тепловой, постоянная времени τ лежит в наносекундном диапазоне и магнитный момент $J(t)$ практически мгновенно исчезает после выключения намагничивающего поля. Для частиц с большим объемом постоянная релаксации τ лежит в миллисекундном или секундном диапазоне (в диапазоне ЗС). Крупные частицы могут релаксировать в диапазоне часов, месяцев, десятилетий или тысячелетий (предмет изучения палеомагнитологов).

Как правило, в горной породе содержание магнитных минералов очень мало и ансамбль частиц разных размеров можно рассматривать как «магнитный газ», не учитывая взаимодействия соседних частиц. Интегрируя магнитные моменты частиц разных размеров по объему образца, можно показать, что результирующий момент релаксирует обратно пропорционально логарифму времени

$$J_E(t) \sim 1/\ln(t).$$

В индуктивном методе ЗС измеряется э.д.с., пропорциональная производной магнитного поля по времени, и сигнал в измерительной рамке, помещенной в суперпарамагнитную среду, затухает во времени как

$$E(t) \sim \frac{\chi_{SPM}}{t^{1+\nu}} \quad (11)$$

χ_{SPM} – стационарная суперпарамагнитная восприимчивость, $|\nu| \ll 1$ – небольшой безразмерный параметр, зависящий от функции распределения концентрации частиц с разными размерами (при магнитных измерениях $J(t)$ ν считается пренебрежимо малой величиной и, как правило, не учитывается).

Магнитные поля, создаваемые суперпарамагнитным эффектом всегда совпадают по направлению с намагничивающим полем, а полярность э.д.с., наведенной в приемной антенне, совпадает с индукционным процессом ЗС.

Таким образом, суперпарамагнитный эффект создает в приемнике дополнительный медленно меняющийся процесс $\sim 1/t$, накладывающийся на переходные характеристики ЗС, которые релаксируют быстрее, чем $\sim 1/t^2$. Формальная интерпретация данных ЗС, осложненных SPM эффектом, приводит к локализации хорошо проводящих слоев в глубоких горизонтах исследуемой среды. Обнаружение ошибок в интерпретации, обусловленных влиянием SPM эффекта, возможно лишь при сопоставлении измерений, выполненных с различными размерами или конфигурациями приемно-излучающих антенн.

Амплитуда SPM эффекта в ЗС пропорциональна коэффициенту взаимной индукции приемной и излучающей антенн и максимальна для совмещенных установок. В коаксиальных установках влияние SPM в 3-5 раз меньше. Для однородного проводящего и суперпарамагнитного полупространства в совмещенных антеннах $L \times L$ индукционный процесс ЗС в ближней зоне (поздние времена) пропорционален $\sim L^4$, в то время как SPM процесс $\sim L$. Чем больше размер антенны L - тем меньше относительное влияние суперпарамагнитных эффектов. Однако при детальном исследовании с малыми антеннами SPM эффект может оказаться значительно интенсивней, чем индукционный процесс ЗС.

Полевые исследования в разных регионах мира показали, что, как правило, интенсивный SPM эффект продуцируют поверхностные глинистые отложения (слой почвы, глин и суглинков мощностью до 0.5-1 м). Максимальный SPM эффект наблюдался на терригенно-осадочных породах, образовавшихся на эффузивах (например, базальт) с большим содержанием магнитных минералов. Как правило, суперпарамагнитная восприимчивость таких отложений достигает значений $\chi_{SPM} \sim 500-5000 \cdot 10^{-6}$ ед. СИ. Результаты зондирования с совмещенными антеннами малых размеров ($25 \times 25 - 100 \times 100 \text{ м}^2$) в таких ситуациях существенно искажены суперпарамагнитными эффектами. Аналогичная ситуация часто встречается в Австралии при исследовании геологических структур, перекрытых реголитами (L. Buselli и T. Lee). Интенсивный SPM эффект был обнаружен при исследованиях эффузивных толщ в горном массиве Мариоко (Япония, GERD).

Для изучения SPM эффекта приповерхностных пород был создан специальный индукционный датчик, имеющий форму тора, в полость которого помещались образцы исследуемых пород.

Чувствительность датчика достаточна для исследований SPM характеристик в диапазоне времен от 20 мкс до 20-50 мс.

На рис 11 показаны результаты измерений SPM восприимчивости χ_{SPM} , полученные при исследовании образцов поверхностных суглинков на золото - серебряных рудопоявлениях в Хакасии.

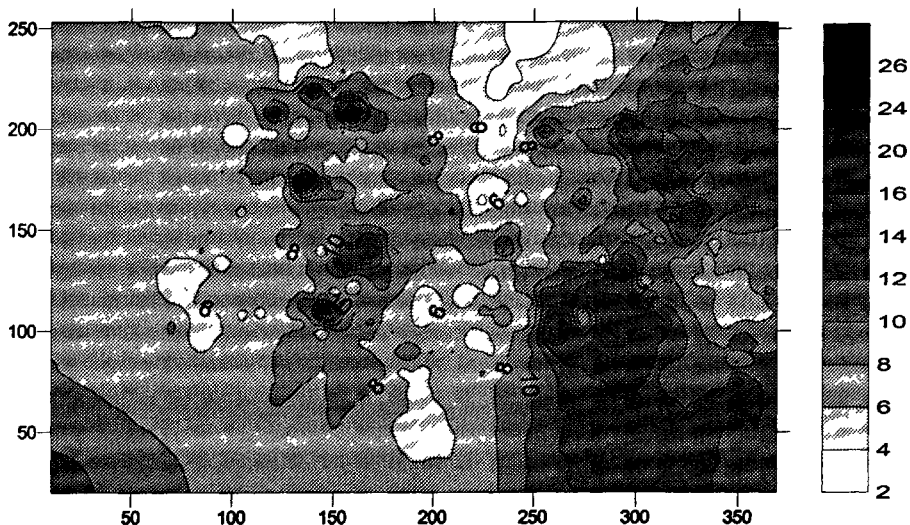


Рис 11. Суперпарамагнитная восприимчивость χ_{SPM} ($\times 10^{-6}$ ед СИ) образцов поверхностных отложений на золото-серебряных рудопроявлениях Хакасии. Широта и долгота карты в метрах.

Наиболее интенсивные SPM аномалии локализуются вблизи ореолов оруденения. В Восточной части планшета аномалии совпадают с зонами повышенного содержания магнетита в эффузивных породах. Эти зоны были «отбракованы» на основании измерений обычной магнитной восприимчивости ($\chi > 600 \times 10^{-6}$ СИ), которая показывала повышенное содержание магнетита. В центральной же части площади исследований χ не превышала 100×10^{-6} СИ. Таким образом, «рудные» аномалии были локализованы по максимумам соотношений суперпарамагнитной и магнитной восприимчивости $\eta = \chi_{SPM} / \chi$.

Измерения SPM эффектов оказались весьма полезными при решении задачи поисков и оконтуривания арсенала ВМФ СССР в инкерманских штольнях (Севастополь). Штольни с арсеналом боеприпасов были взорваны в 1941г. при наступлении немцев на Севастополь. Своды штолен обрушались, завалив арсенал, который практически не пострадал от взрыва. Попытки локализовать металлические объекты, находящиеся на глубине от 15 до 25 м под поверхностью известкового массива высокоточными магнитными измерениями не увенчались успехом из-за интенсивной засоренности поверхности мелкими металлическими объектами. Измерения же SPM эффектов с совмещенными антеннами 25×25 м*м решили поставленную задачу.

На рис.12 показаны результаты магнитных измерений (ΔT) и распределение суперпарамагнитного сигнала E/I .

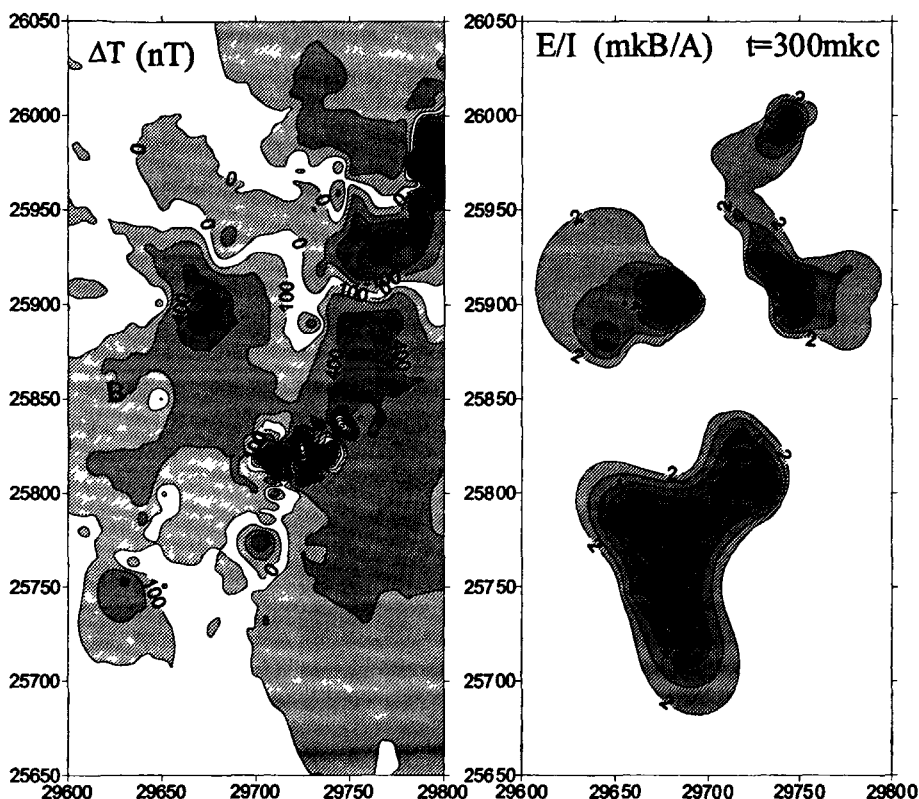


Рис.12 Карты аномального магнитного поля (ΔT) и суперпарамагнитного сигнала (E/I) в совмещенных антеннах 25×25 м*м над погребенным арсеналом боеприпасов (Севастополь, Инкерман, 2000 г.)
Широта и долгота карт в метрах.

Каминный суперпарамагнитный эффект

Как уже отмечалось, спад переходных характеристик SPM эффектов в достаточно широком диапазоне времен описывается формулой (11), в которой присутствует небольшой по величине параметр ν .

Экспериментально было замечено, что над некоторыми геологическими объектами, находящимися в зонах разломов, параметр ν становится отрицательным, и достигает величин $\nu \sim -0.2$, в то время, как вне

аномальных зон $v \approx \pm 0.05$ (при погрешностях оценки $\Delta v \approx \pm 0.02$). Аномальное замедление релаксации SPM эффектов носило локальный характер и регистрировалось строго над известными рудными объектами. Такой характер аномалий позволил назвать обнаруженный эффект «каминным» по аналогии со столбом дыма, поднимающимся из трубы камина и долгое время не теряющим форму вертикального столба. На рис. 13 приведены результаты измерений магнитной, суперпарамагнитной восприимчивости и логарифмической скорости релаксации SPM сигналов ($1+v$) из (11). Измерения выполнены на образцах поверхностных отложений, отобранных по профилю на россыпном месторождении золота (Челябинская обл, п. Светлый, 1994 г.).

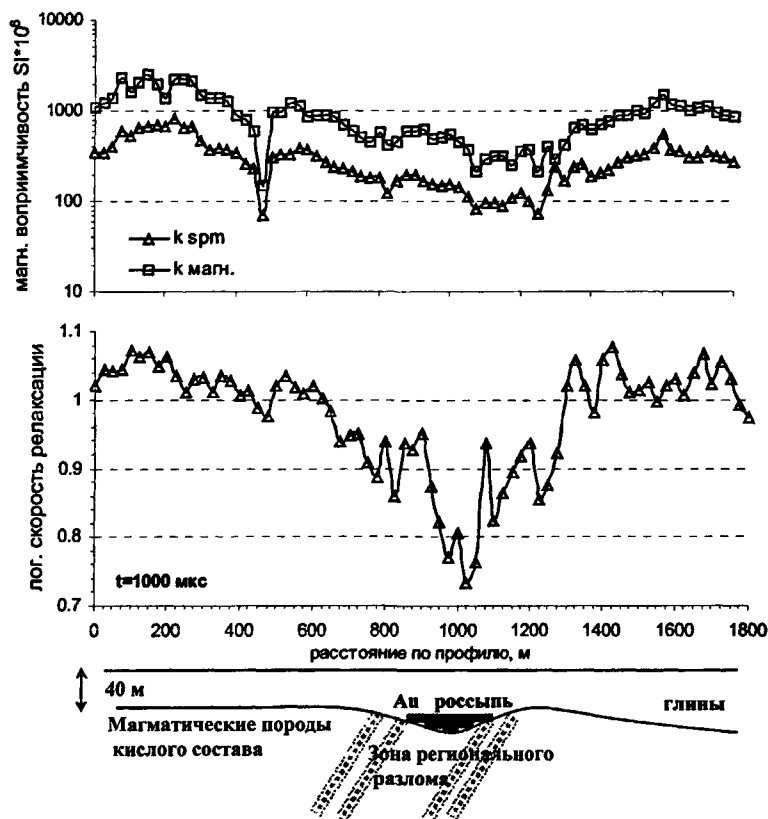


Рис.13 Магнитная (k_{MAG}) и суперпарамагнитная (k_{SPM}) восприимчивость, логарифмическая скорость релаксации SPM эффекта $s=1+v$ из (11), измеренные на образцах поверхностных отложений.

На остальных профилях, секущих региональный разлом вне россыпи, распределения k_{MAG} и k_{SPM} не отличаются от приведенных на рисунке, а величина $|v| < 0.1$. Аномальное замедление скорости релаксации наблюдается только над контуром россыпи. Аналогичные результаты были получены над рудопроявлением никеля в Воронежской обл. (п. Елань-Колено), где рудные тела субвертикально залегают на глубине около 500 м в зоне регионального разлома и перекрыты мощной терригенной толщей осадков. Несмотря на достаточно большую глубину залегания, аномалии скорости релаксации SPM локализуются строго над контурами рудных тел.

В настоящее время не существует ясных и непротиворечивых объяснений физической природы обнаруженного феномена - *каминного суперпарамагнитного эффекта*. Однако существует гипотеза, которая в какой-то мере проливает свет на природу эффекта и позволяет надеяться на получение более четких объяснений в будущем.

Согласно теории суперпарамагнетизма и расчетам, сделанным на ее основе, логарифмическая скорость релаксации $1+v$ (11) не зависит ни от общей концентрации магнитных минералов в породе, ни от типа минерала (магнетит, маггемит или гематит, например), а точнее от константы анизотропии k_1 . Единственная причина, которая может вызвать замедление или ускорение скорости релаксации, это изменение характера функции распределения частиц по их размерам. В аномальных зонах суперпарамагнитные частицы с эффективными радиусами $r = 25-34$ нм (именно эти частицы «ответственны» за SPM эффект в диапазоне времен 3С) распределены так, что частиц с большими размерами (34 нм) значительно больше, чем частиц с маленькими (25 нм). Вне аномальных зон концентрация почти равномерна и скорость релаксации равна $1+v \sim 1$.

Таким образом, можно предположить, что в аномальных зонах изменяется функция распределения суперпарамагнитных частиц по их размерам, что приводит к аномальному замедлению скорости релаксации SPM эффекта. Отметим, что сделанное заключение относится только к весьма узкому интервалу размеров частиц, находящихся при данной температуре в суперпарамагнитном состоянии с постоянными времени релаксации порядка $\tau \approx 0.1-1$ с.

Отметим, что каминный SPM- эффект наблюдается только в геологических ситуациях, включающих в себя два фактора: наличие разломов в земной коре и повышенной концентрации какого-либо элемента (минерала) в локальной области внутри разломной зоны. Причем в случае с россыпью (рис 11), по-видимому, аномальным следует считать не золото Au, а другие элементы (As, Zn, Cr, Co и т.д.) и минералы (магнетит, пирит, арсенопирит, пирротин и др.), содержание которых в россыпи намного больше, чем золота.

В основе гипотезы каминного SPM лежат два известных факта.

1. В разломных зонах существуют вертикальные потоки *геогаза*. В состав *геогаза* входят частицы минералов и химических элементов, которые были захвачены из пород и руд, через которые диффундирует геогаз. Размер частиц находится в интервале 10-100 нм. Поверхностные глинистые и суглинистые отложения (и почва), обладая хорошими сорбционными свойствами, накапливают частицы, принесенные *геогазом*.
2. Из публикаций, посвященных SPM релаксации, следует, что суперпарамагнитные частицы резко изменяют свои SPM свойства в случае внедрения в их кристаллическую решетку даже ничтожно малого количества «инородных» элементов. Причем в этом случае изменяется не столько константа анизотропии – k_1 , сколько агрегатное состояние частиц. Т.е. частицы с дефектами кристаллической решетки объединяются в более крупные агрегаты, но, по-прежнему, обладают суперпарамагнитными свойствами. Этот факт экспериментально доказан для искусственных ферритов с внедрением в их кристаллическую решетку таких элементов, как Ni, Co и Cr.

Основываясь на этих известных фактах можно предположить, что механизм образования каминного SPM эффекта может быть следующим.

- *Геогаз*, выделяющийся из разломных зон, захватывает элементы, сконцентрированные в залежах полезных ископаемых, через которые он диффундирует.
- Эти элементы адсорбируются поверхностными глинистыми отложениями и почвой.
- В процессе химических реакций, происходящих при выветривании поверхностных отложений, принесенные элементы внедряются в кристаллическую решетку магнитных минералов, всегда находящихся в почве (магнетит, маггемит или гематит).
- Мелкие частицы магнитных минералов изменяют свои агрегатные состояния, что приводит к замедлению скорости релаксации SPM эффектов.

Такой механизм, связанный с потоками (вертикальными!) *геогаза*, объясняет необычную форму аномалий каминного SPM эффекта.

Отметим, что аномалии концентраций самого *геогаза* также можно назвать каминным эффектом, поскольку они также строго соответствуют проекциям разломных зон на дневную поверхность даже при мощностях перекрывающих разломные зоны отложений в сотни метров.

Суперпарамагнитные явления в ЗС можно рассматривать как помеху, снижающую эффективность зондирований (в частности, глубинность исследований, поскольку она искажает поздние времена переходных характеристик). Для устранения этой помехи необходимо применять антенные установки с минимальным коэффициентом взаимной индукции между приемной и излучающей антеннами (разнесенные установки «петля-петля», смещенные петлевые установки). При ЗС в ближней зоне такие приемы позволяют практически полностью избавиться от SPM. Однако в промежуточной зоне ЗС применение разнесенных установок резко снижает эффективность интерпретации данных из-за влияния горизонтальных поверхностных неоднородностей исследуемой среды. При зондированиях с малыми антеннами ($10 \times 10 - 25 \times 25$ м²) поверхностный SPM эффект устраняется при подъеме проводов антенны над поверхность земли. Этот же способ позволяет оценить глубину до SPM слоя, если он находится на 20-30 м под поверхностью. В работе приведен пример локализации зоны фильтрации грунтовых вод на Норильском рудном поле, основанной на сравнении амплитуд SPM эффектов в совмещенных антеннах 25×25 м², приподнятых над поверхностью и лежащих на поверхности земли. Глубины залегания слоя $h \sim 20$ м, что подтверждено буровыми скважинами. Подъем антенн на высоту 1.5-2 м практически всегда возможен с мелкими антеннами. Эта операция практически не искажает результат интерпретации индукционных переходных характеристик ЗС и не создает дополнительных трудностей, связанных с горизонтальными поверхностными неоднородностями исследуемой среды. Такой же прием применяется и в случае поверхностной поляризации среды – индукционный ВП и антенный эффекты резко ослабляются.

С другой стороны SPM эффект можно использовать для извлечения полезной информации о геологическом строении изучаемого региона, для поисков техногенных и археологических объектов, исследований загрязнения окружающей среды и т.д. Для этих целей наиболее подходящей является небольшая совмещенная приемно-излучающая антенна, выполненная либо в виде незаземленной петли, либо в виде соленоида, тора или спиральной плоской катушки для исследования поверхностных пород в естественном залегании.

Применение TEM-FAST технологии для решения геологических и геоинженерных задач.

В этом разделе представлены результаты применения разработанной технологии для решения разнообразных геологических, геотехнологических, гидрогеологических, инженерных и др. задач. Результаты получены автором диссертации при исследованиях ЗС в различных геологических регионах в период 1984–2003 г. Все измерения переходных характеристик ЗС выполнены аппаратурой TEM-FAST, в разработке которой автор принимал самое активное участие вместе Е.О.Хабенским и Э.Б.Файнбергом.

Технические характеристики TEM-FAST 48

Генератор

- время выключения токового импульса по уровню $10\mu V, I=1 A$
 $L \times L = 25 \times 25 \text{ м}^2$ не более $4 \mu s$
 $L \times L = 100 \times 100 \text{ м}^2$ не более $20 \mu s$
- Амплитуда токовых импульсов (А) до 4

Приемник

- Полоса частот (МГц) не менее 4
- Количество автоматически регистрируемых задержек 48
- подавление промышленных помех 50/60 Hz (dB) не менее 60
- Внутренний шум (μV) не более 0.1
- Динамический диапазон (макс. /мин.) $10V / 0.1 \mu V$
- Измеряемые величины:

Э.Д.С./ток V/A
погрешности измерений V/A, %

- Возможные типы измерительных установок:

однопетлевая с размерами антенн от 0.1×0.1 до $400 \times 400 \text{ м}^2$
«петля в петле» - размер генераторной петли не более $400 \times 400 \text{ м}^2$
оптимальная конфигурация - одна петля размером $25 \times 25 - 100 \times 100 \text{ м}^2$

Время измерений (сек) 18 - 300

Энергопотребление

- Штатная внутренняя батарея 12V, 2 А*час
- Среднее потребление, $I=1A$ (mA) не более 350

Другие характеристики

Работа с IBM -совместимым PC OS DOS/Win95/98/ME/2000/XP
Palm PC OS WinCE, Pocket PC (порт RS232)

Вес (кг) не более 1.5
Размеры (мм) $103 \times 27 \times 310$
Температурный диапазон работы..... $-20^\circ - +65^\circ C$
Степень защиты корпуса прибора IP65
Производительность исследований (точек/день)..... до 100

На рис.14 представлен геоэлектрический разрез, полученный на основе 1D инверсий данных зондирования структуры осадочных пород на Русской платформе.

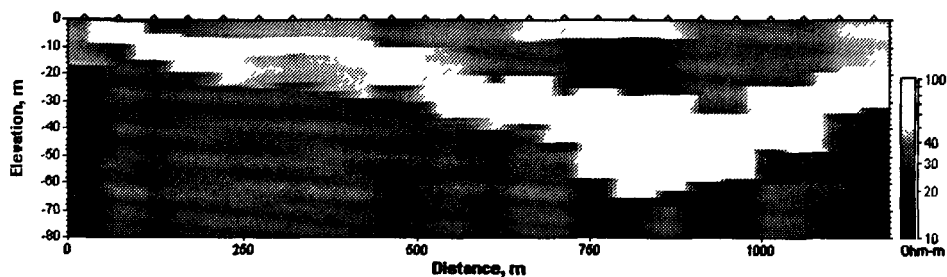


Рис 14. Геоэлектрический разрез структуры палеодолины. Высоомный слой (светлые тона) маркирует песчаные и известковые отложения, низкоомные зоны соответствуют суглинкам и глинам.

Зондирования выполнены с совмещенной антенной 50х50 м*м. Неровности в рельефе выделяемых слоев обусловлены погрешностями инверсии данных ЗС и эквивалентностью геоэлектрических разрезов, содержащих тонкие проводящие и непроводящие слои. Результаты интерпретации ЗС подтверждаются данными бурения.

На рис.15 представлен электромагнитный образ кимберлитовой трубки, полученный на основе трансформаций переходных характеристик ЗС в зависимость кажущегося сопротивления от глубины $E(t) \rightarrow \rho(t) \rightarrow \rho(h)$.

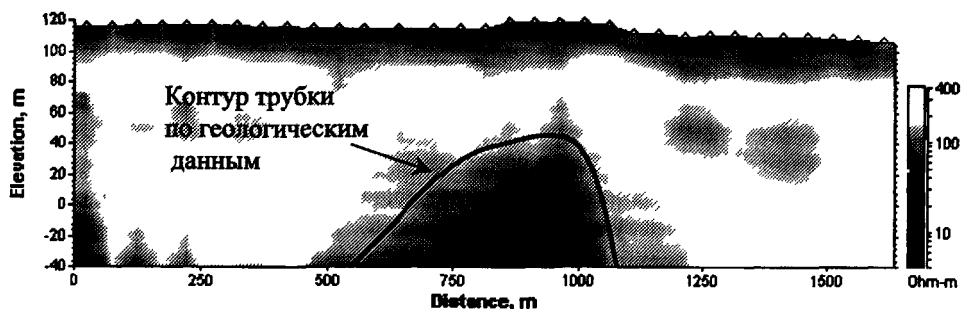


Рис 15. Электромагнитный образ кимберлитовой трубки и ее контур по геологическим данным. ЗС с совмещенными приемно-излучающими антеннами 50х50 м*м.

Хотя геологические и геоэлектрические контура трубки и не совпадают, общая структура объекта и его форма выделяется с приемлемой для стадии поисково-оценочных геофизических работ точностью.

Рис.16 иллюстрирует результаты ЗС исследований оползневых процессов в Крыму.

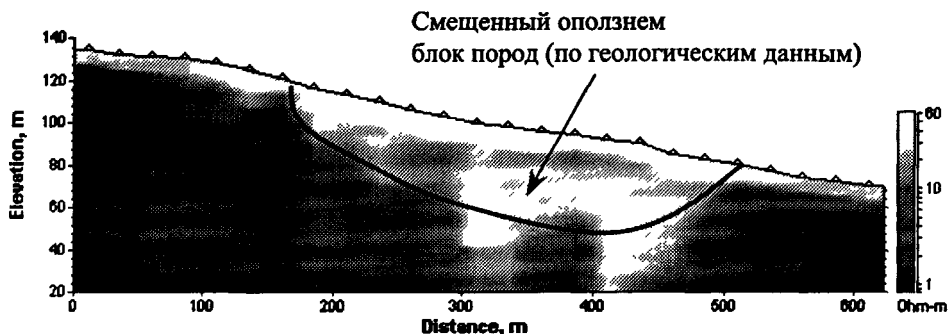


Рис 16. Электромагнитный образ оползневого процесса (трансформации процессов ЗС). Форос, Крым, 2000 г.

В результате весеннего паводка блок терригенных отложений сместился на 100 м и разрушил автомагистраль. Смещение происходило вдоль зоны разлома (ПК 300–400) в коренных породах, сложенных алевролитами и аргиллитами Таврической серии (низкоомные толщи, обозначенные темными тонами). На основе ЗС были определены глубины до кровли стабильных коренных пород, необходимые для проведения восстановительных мероприятий (установка стабилизирующих свай).

На рис.17 показан геоэлектрический разрез зоны суффозии – размыва слоя глин, экранирующих отложения известняка.

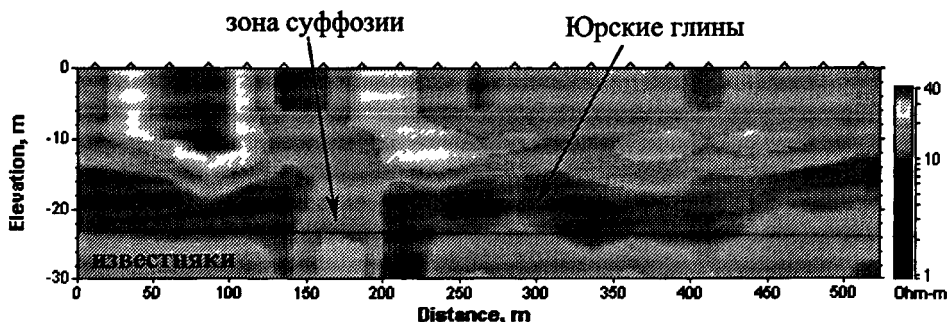


Рис.17 Электромагнитный образ зоны суффозии, построенный по трансформациям переходных характеристик ЗС.

Суффозионные процессы, представляющие реальную опасность для промышленных и гражданских сооружений, распространены в западной части г. Москвы

Зондирования выполнены с совмещенной антенной 25х25 м*м, суффозионные процессы выделяются на разрезе в виде локальных зон с повышенным сопротивлением. Неоднородности сопротивления в верхних частях разреза связаны с влиянием на переходные процессы ЗС различных коммуникаций, труб и зданий, расположенных на территории исследований. Этими же факторами можно объяснить и некоторые неровности рельефа юрских глин, которые залегают, как правило в пределах Московской области, ровным горизонтальным слоем мощностью 7-10 м. Гидрогеологическая скважина (ПК 0) вскрывает слой глин в интервале глубин 16-25м.

Рис.18 иллюстрируют результаты ЗС, полученные при исследованиях зоны фильтрации грунтовых вод во французских Альпах.

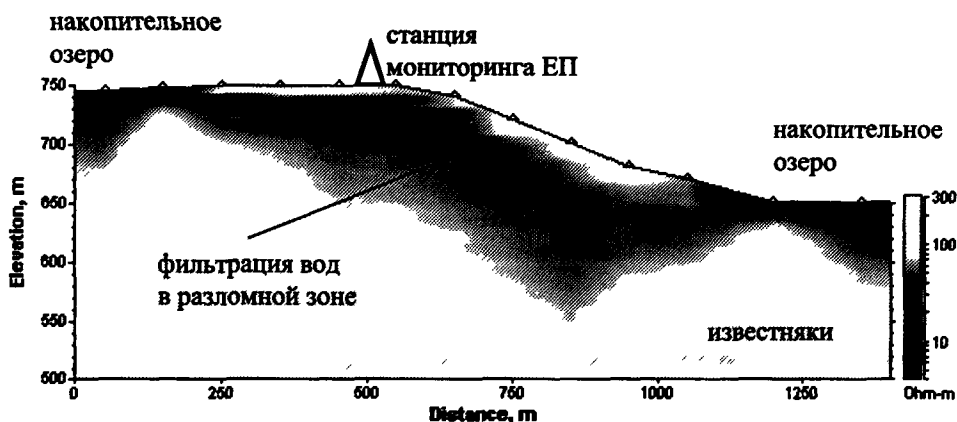


Рис.18 Электромагнитный образ зоны фильтрации грунтовых вод через водораздел между двумя накопительными озерами. (Французские Альпы 1996 г.)

Поток вод регистрируется станцией мониторинга естественных потенциалов (ЕП), расположенной на водоразделе двух накопительных озер. Конфигурация зоны трещиноватости, по которой происходит фильтрация, выделяется по данным ЗС. Измерения выполнены с совмещенными антеннами 50х50 м*м, разрез кажущихся сопротивлений построен по трансформациям переходных характеристик.

На рис.19 представлен геоэлектрический разрез плато Великих Египетских пирамид (Гиза, Каир), построенный на основе 1D инверсий данных ЗС.

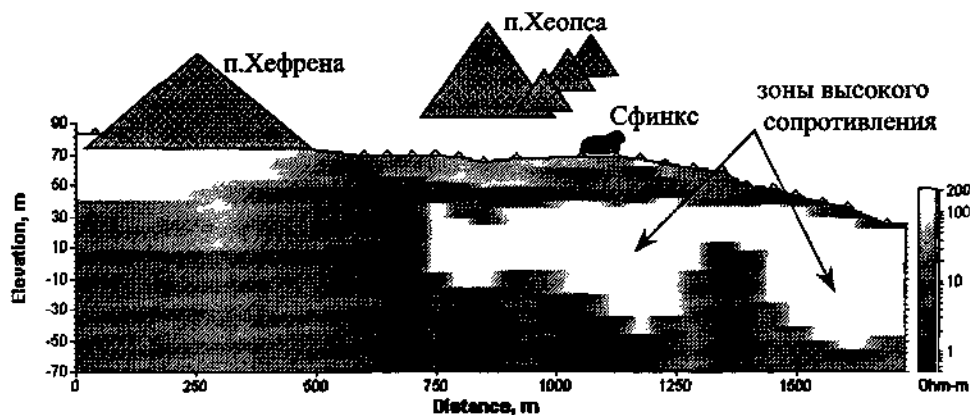


Рис.19 Геоэлектрический разрез «Сфинкс-п.Хефрена» (Гиза, Каир, Египет, 1994 г.)

Плато сложено известковыми породами и весьма низкими удельными сопротивлениями ($\sim 1-15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ по данным ВЭЗ и каротажа) из-за интенсивной засоленности поровых вод. Однако в Восточной части плато, ближе к пойме р. Нил имеется локальная зона с высокими сопротивлениями ($>100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Эта зона отчетливо фиксируется при площадных исследованиях ЗС. Известно, что в центральной части плато имеются подземные галереи и катакомбы, простирающиеся до глубин 10-15 м от поверхности. Судя по результатам интерпретации данных зондирования, эти галереи могут простираются и на большие глубины, вплоть до 50м. Левая (западная) граница зоны повышенного сопротивления совпадает с региональным разломом (ПК 750). В зону трещиноватости разлома пробурена скважина, обеспечивающая туристический комплекс Гизы питьевой водой. Резкая граница разломной зоны с низким сопротивлением пород также фиксируется ЗС.

Происхождение выделенной ЗС аномалии, по мнению египетских специалистов, явно техногенного характера и не может быть объяснено естественными особенностями геологического строения плато пирамид Гизы.

В настоящее время египетские геофизики продолжают изучение строения плато методом ЗС и ВЭЗ.

Заключение

На основе результатов исследований, выполненных автором в процессе работы над диссертацией, создана импульсная электромагнитная система TEM-FAST, включающая в себя:

- аппаратуру для измерений переходных характеристик в микросекундном диапазоне- TEM-FAST-48HPC;
- методику полевых исследований с совмещенной приемно-излучающей антенной;
- программное математическое обеспечение – TEM-RESEARCHER, позволяющее интерпретировать результаты ЗС в промежуточной и ближней зонах параметров становления поля в горизонтально неоднородных геологических средах с частотной дисперсии электрических и магнитных свойств.

Математическое и физическое моделирование переходных процессов показало, что в промежуточной зоне параметров становления, где затухание импульсов электромагнитного поля определяется как скин-эффектом, так и геометрическим рассеянием, интерпретацию данных ЗС можно производить на основе одномерной инверсии или трансформации сигналов становления.

Трансформации сигналов ЗС в зависимости кажущего сопротивления от глубины исследования позволяют приблизительно интерпретировать и визуализировать данные в сложно построенных средах.

На полевых и модельных данных показано, что погрешности, возникающие при использовании одномерных процедур интерпретации в горизонтально неоднородных средах, оказываются достаточно малыми и принципиально не искажают изучаемую геоэлектрическую структуру. Этот эффект достигается при исследованиях в промежуточной зоне становления с совмещенными приемно-излучающими антеннами. Существенные искажения в результатах 1D инверсии присутствуют лишь вблизи субвертикальных контрастных по проводимости 3D структур на расстояниях не более 1-1.5 стороны применяемой совмещенной антенны.

На больших расстояниях от неоднородностей одномерная инверсия и трансформации переходных характеристик поля дают неискаженный результат.

Электромагнитный образ изучаемой среды строится в виде томографической картинки, состоящей из фрагментов, полученных на основе точечных одномерных инверсий или трансформаций данных ЗС по профилю и площади исследований.

Для сред с частотно зависимой электропроводностью также разработан аппарат одномерной инверсия данных с определением параметров дисперсии. Предусмотрена возможность построения достаточно сложных конструкций дисперсионных моделей среды, что позволяет исследовать поляризационные

явления в ЗС и сопоставлять их с результатами метода ВП и измерениями комплексного сопротивления образцов горных пород.

Обнаружен и подробно исследован *антенный поляризационный эффект*, возникающий в антеннах с распределенными емкостью и сопротивлением. Этот эффект инвертирует знак регистрируемого переходного процесса, а его амплитуда пропорциональна емкости и квадрату сопротивления проводов антенны.

Подробно исследован суперпарамагнитный эффект в горных породах, связанный с особенностями динамики намагничивания нанометровых зерен магнитных минералов. Этот эффект проявляется в виде аномально медленного затухания сигналов ЗС. Установлено, что над некоторыми месторождениями руд, находящимися в разломных зонах, наблюдается аномальное замедление суперпарамагнитной релаксации – *каминный суперпарамагнитный эффект*.

На экспериментальных примерах показано эффективность использования суперпарамагнитного эффекта для поисков рудных месторождений.

Разработанная система TEM-FAST позволяет в 3-5 раз повысить производительность малоуглубинных (до ~ 300 м) исследований ЗС по сравнению с существующими отечественными и зарубежными технологическими аналогами. Кроме того TEM-FAST позволяет использовать для зондирования совмещенные антенны малых размеров (до 10х10 м²), что дает возможность проводить детальные исследования ограниченных площадей в пределах мегаполисов и промышленных объектов в пределах глубин от 1-2 до 20-30 м.

Сопоставление производительности и качественных характеристик ЗС исследований проводилось независимыми экспертами в процессе совместных испытаний TEM-систем ведущих мировых компаний Zonge, Geonics и аппаратуры TEM-FAST 48NPC и TEM-FAST 32 на геофизическом полигоне Гарши (Франция, 2001 г).

Разработанная программа TEM-RESEARCHER позволяет эффективно обрабатывать и интерпретировать промышленные объемы данных ЗС, а также проводить научные исследования «тонких» эффектов в переходных характеристиках поля в неоднородных и дисперсных средах.

Публикации по теме работы

1. Барсуков П.О. Патологически вырожденные процессы ЗС
Школа-семинар «Индуктивная Электроразведка», п. Славское,
1989, с.37-38.
2. Барсуков П.О. Экспрессная модификация МПП (ТЕМ-FAST) для поиска
россыпей золота, гидрогеологических исследований и гражданского
инжиниринга НТД-91 ЦНИГРИ, Москва, ЦНИГРИ, 1991, с.26-27.
3. Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. ТЕМ-FAST – импульсная
электромагнитная технология исследования геологических сред
Вопросы теории и практики геологической интерпретации
гравитационных, магнитных и электрических полей. Москва,
ИОФЗ РАН, 27-31 январь 2002, с.20-21.
4. Барсуков П.О., Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. Применение метода
переходных процессов (технология ТЕМ-FAST) для решения задач
малоглубинной геоэлектрики и исследований окружающей среды.
Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным
зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г. с. 142-151.
5. Барсуков П.О., Э.Б. Файнберг, Е.О.Хабенский
Инверсия ТЕМ данных в поляризующихся и суперпарамагнитных средах.
Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным
зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г. с.30.
6. Барсуков П.О., Э.Б. Файнберг, Е.О. Хабенский
Антенный поляризационный эффект в ТЕМ.
Первая Всероссийская школа-семинар по электромагнитным
зондированиям Земли. Москва, 10-15 ноября 2003 г. с.55.
7. Барсуков П.О., Светов Б.С. Определение экспоненциальных спектров
квазистационарных переходных процессов из экспериментальных данных.
Алгоритмы и программы решения прямых и обратных задач
электромагнитной индукции в Земле. М., ИЗМИРАН, 1982 с.11-30.
8. Барсуков П.О. Радиочастотные колебания электропроводности горных
пород. Электромагнитные зондирования АН СССР,
Звенигород, 1984, с. 65.
9. Барсуков П.О. Осцилляции переходных процессов становления поля.
Изв. Вузов, Геология и Разведка, 1985, 8, с.124.
10. Барсуков П.О. Переходные характеристики электромагнитного поля в
средах с частотной зависимостью электропроводности.
Электромагнитная индукция в верхней части земной коры.
М., ИЗМИРАН, Наука 1990, с.150-152.
11. Барсуков П.О. Файнберг Э.Б. «Каминный» суперпарамагнитный эффект
над залежами золота и никеля. Доклады РАН 1997, т.353, 6, с. 811-814.

12. Барсуков П.О. Файнберг Э.Б. Исследование окружающей среды методом переходных процессов с использованием ВП и СПИМ эффектов
Изв. РАН, Физика Земли 2002, 11, с. 82-85.
13. Барсуков П.О. Файнберг Э.Б., Хабенский Е.О. Антенный поляризационный эффект в импульсных электромагнитных зондированиях
Изв. РАН, Физика Земли, 2003, 11, с. 81-87.
14. Светов Б.С., Барсуков П.О. Трансформация квазистационарных переходных процессов геоэлектрики в эквивалентные волновые.
Изв АН СССР, Физика Земли, 1984, 8, с.29-37.
15. Светов Б.С., Барсуков П.О. "Об использовании представления эффектов становления поля в виде суперпозиции экспоненциально затухающих элементарных процессов". Сб. Измерение и обработка одиночных сигналов при геофизических исследованиях с импульсными источниками.
АН СССР, Апатиты, 1979, с.52-60.
16. Barsukov P.O. Fainberg E.B. Double IP-effect in Electromagnetic Transients
The 14-th Workshop on EM Induction in the Earth., Sinaia, Rumania
1998. p. 97-98.
17. Barsukov P.O. Fainberg E.B. Electromagnetic Resonance in Transients?
The 14-th Workshop on EM Induction in the Earth. Sinaia, Rumania.
1998, p.102.
18. Barsukov P.O. Fainberg E.B. An Application of Modern TEM-Fast Technology of Environmental Investigation The 14-th Workshop on EM Induction in the Earth, Sinaia, 1998 Rumania, p.41-42
19. Barsukov P.O. Fainberg E.B. and Andrieux P Search of underground galleries in Vorontsov Palace-museum by TEM. 1-st international workshop "Electric, Magnetic and EM methods applied to cultural heritage" Ostuni, Italy
1997, p. 80-81.
20. Barsukov P.O. Fainberg E. B. Superparamagnetic effect over gold and nickel deposits European Journal of Environmental and Engineering Geophysics
No 6, 2001, p. 61-72.
21. Barsukov P.O. Fainberg E. B., Khabensky E.O. An application of magnetic and electromagnetic methods for environmental research. 8-th meeting
"Environmental and Engineering Geophysics"
EEGS-ES 8-12 Sep 2002, Aveiro, Portugal., p.232-235.
22. Barsukov P.O., Hassaneen A.Gh., Svetov B.S., Osman S.Sh.
Geoelectrical Study in Vicinity of Giza Pyramids, Egypt. 13-th Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth. Japan, Jul 1996, p.131-133.
23. Barsukov P.O., Fainberg E. B. Innovative approach to EM research and monitoring of environment III International Workshop on Magnetic, Electric and ElectroMagnetic Methods in Seismology and Volcanology (MEEMSV-2002), Moscow, Sep. 3-5, 2002, p.71-74.

Подписано в печать 21.04.2004.
Формат 60х84 / 16. Печ. л. 2,75.
Тираж 120 экз. Заказ 0421-8.

Издательство «Трoвaнт»
142191, Троицк Московской обл., В-52. Тел. 334-09-67
ЛР № 071961 от 01.09.99.

Типография издательства «Трoвaнт»

25.00

РНБ Русский фонд

2006-4

16827



13.11.2004