

На правах рукописи

Иванов Павел Владимирович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ**

25.00.10 Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель : кандидат физико-математических наук,
доцент, Пушкарёв Павел Юрьевич

Официальные оппоненты: Дмитриев Владимир Иванович, доктор
физико-математических наук, профессор,
факультет вычислительной математики и
кибернетики МГУ имени М. В. Ломоносова,
заместитель декана

Варенцов Иван Михайлович, кандидат
физико-математических наук, ЦГЭМИ ИФЗ
РАН, директор

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
университет, Геологический факультет

Защита состоится 21 марта 2012 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.64 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, зона «А», геологический факультет, аудитория 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (ГЗ МГУ, зона «А», 6 этаж).

Автореферат разослан «15» февраля 2012 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета:

Никулин Борис Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Диссертация посвящена развитию методов интерпретации данных электромагнитных зондирований (ЭМЗ), применяемых в инженерной геофизике, которая занимается решением малоглубинных задач (чаще всего до ста метров). Практически до середины 1990-х годов для решения такого рода задач использовались преимущественно методы постоянного тока и геоэлектрохимические методы. Геофизические методы, основанные на использовании низкочастотного переменного электромагнитного (ЭМ) поля, до этого времени применялись эпизодически и считались лишь перспективными в этом направлении. Но к концу 20-го века они всё больше входят в практику, что связано с рядом их преимуществ (например, отсутствие необходимости заземления или меньшая трудоёмкость выполнения полевых работ при изучении глубин в сотни метров). Таким образом, данная группа методов применяется уже более 10 лет для решения различных задач инженерной геофизики. Тем не менее, с тех пор не было сделано никаких обобщений такого рода применения низкочастотных ЭМ методов. Большую часть информации по ним можно почерпнуть лишь в статьях в специализированных журналах и в докладах на конференциях.

Актуальность диссертации связана с необходимостью повышения эффективности низкочастотных методов для их более активного использования при решении задач инженерной геофизики. Для этого следует изучить и обобщить современное состояние дел в области применения индукционных методов зондирования (аудиомагнитотеллурического, становлением поля в ближней зоне, частотного) в инженерной геофизике, а также выявить и решить тормозящие развитие проблемы, в т.ч. при комплексировании различных ЭМ методов.

Целью работы является развитие методики низкочастотных ЭМЗ при решении задач инженерной геофизики. Для этого были поставлены следующие **задачи**:

- Обобщить накопленный российскими и зарубежными геофизиками опыт и выявить наиболее эффективные методы низкочастотной электроразведки для решения различных задач инженерной геофизики. Причём для каждого метода должны быть рассмотрены оптимальные методики наблюдений и методы анализа и интерпретации, а также современные достижения в аппаратном и программном обеспечении.
- Разработать систему с программной реализацией, позволяющей проводить анализ магнитотеллурических (МТ) данных, полученных по площадным наблюдениям, с целью выбора интерпретационной модели и подготовки данных для проведения 1D, 2D или 3D инверсии.
- Поскольку МТ зондирования получили с недавнего времени новый виток развития, заключающийся в переходе к 3D интерпретации данных, то в рамках повышения эффективности их применения необходимо изучить возможности методики «бокового зондирования» геоэлектрических структур, то есть получения по профильным данным информации о трёхмерной среде в полосе вокруг профиля наблюдений.

- Разработать алгоритм совместной интерпретации данных метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Для этого изучить особенности методов, использующих гальваническую и индукционную составляющие ЭМ поля, оценить возможность их комплексного применения, исследовать и решить возникающие при этом трудности.

Автором защищаются следующие **основные положения**:

1. Разработанная автором система с программной реализацией МТ_Array позволяет выполнять анализ магнитотеллурических данных, полученных на площадной сети, на его основе выбирать интерпретационную модель и формировать соответствующий набор данных для решения обратной задачи.
2. Разработанная методика анализа и инверсии магнитотеллурических данных, именуемая методикой «бокового зондирования», в случае контрастных объектов в квазислоистом разрезе позволяет получать геоэлектрическую модель в полосе вокруг профиля наблюдений.
3. Предложенный подход к совместной интерпретации данных методов ВЭЗ и ЗСБ объясняет различия между результатами отдельной интерпретации и обеспечивает наиболее устойчивое и детальное решение обратной задачи.

Научная новизна. В ходе выполненных исследований получены следующие новые научные результаты:

- большой арсенал методов анализа и инверсии данных МТ зондирования применён для получения информации о трёхмерной среде в полосе, охватывающей профиль наблюдений, и оценена надёжность такого рода информации;
- выполнено формализованное и подробное сопоставление информационных преимуществ и ограничений гальванических и индукционных методов, а также предложена эффективная методика их совместной интерпретации.

Практическая значимость:

- выполненный обзор практического применения методов низкочастотной электро-разведки в инженерной геофизике помогает выбрать оптимальный комплекс методов и их методик для решения той или иной задачи, а поэтому может использоваться как учебное пособие;
- разработанная автором система с программной реализацией МТ_Array для анализа площадных МТ данных успешно применяется на практике, в т.ч. внедрена в учебный процесс студентов и магистрантов кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова;
- методика «бокового зондирования», позволяющая получать информацию о трёхмерной среде по МТ данным, полученным на одиночных профилях, повышает эффективность использования МТ метода;
- представленный алгоритм совместной интерпретации данных ВЭЗ и ЗСБ делает комплексирование этих методов более эффективным, позволяя получать дополнительную информацию об изучаемой среде.

Материалы и методы. Полевые материалы, использованные при совместной интерпретации методов ВЭЗ и ЗСБ, были получены в Томской области РФ при участии автора.

Обзор применения методов низкочастотной электроразведки, включая используемые методики наблюдения, аппаратные комплексы, методы обработки, анализа и интерпретации данных, был произведён на основе различных публикаций (в виде монографий, статей, тезисов докладов и др.) как российских, так и зарубежных издательств, которые приведены в списке литературы.

Анализ МТ данных проводился в разработанной автором программе МТ_Array.

Эксперименты по моделированию и инверсии МТ данных выполнялись с использованием программ S. Constable, R. Mackie, W. Siripunvaraporn, а также программ П. Ю. Пушкарёва для визуализации результатов 2D и 3D инверсии.

Совместная интерпретация данных методов ВЭЗ и ЗСБ проводилась в новой версии программы IPI2win (разработчик А. А. Бобачёв).

Апробация работы. Материалы, полученные с участием автора диссертации и использованные в ней, докладывались на различных конференциях: 4-ая, 6-ая и 7-ая международные научно-практические конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика» (Геленджик, 2008, 2010; Москва, 2011); XIX и XX международные симпозиумы по ЭМ индукции в Земле (Пекин, Китай, 2008; Гиза, Египет, 2010); научная конференция «Ломоносовские чтения» (Москва, 2008); XVII и XVIII международные научные конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (Москва, 2010, 2011); международная конференция по ЭМЗ, посвящённая памяти М. Н. Бердичевского и П. Вайдельта (Москва-Звенигород, 2010); 5-ая всероссийская школа-семинар им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна «ЭМЗ-2011» (Петергоф, 2011); 9-й международный геофизический научно-практический семинар "Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых" (Санкт-Петербург, 2011).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в т.ч. 1 статья в издании по перечню ВАК.

Объём и структура работы. Работа изложена на 119 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырёх глав и заключения, содержит 2 таблицы, 100 рисунков, а также список литературы из 73 наименований.

Благодарности. Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю П. Ю. Пушкарёву за постоянную поддержку, помощь, обучение и многолетнее сотрудничество. Автор очень признателен А. Г. Яковлеву за оказанное участие в его научной деятельности. Также автор благодарен сотрудникам ООО «Северо-Запад» В. П. Гребневу, Е. Д. Александровой, Д. А. Алексееву и доценту Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова А. А. Бобачёву, оказавшим помощь на определённых этапах работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Обзор результатов применения низкочастотной электроразведки при решении задач инженерной геофизики

Методы электроразведки с момента своего появления, то есть на протяжении около 100 лет, применяются при решении задач инженерной геофизики. До середины 1990-х годов для этих целей практически повсеместно использовались методы постоянного тока и геоэлектрохимические методы, в то время как низкочастотные методы электроразведки применялись эпизодически и в основном лишь упоминались как перспективные в этой области. На современном этапе развития инженерной геофизики низкочастотные методы получили широкое распространение и частично заменили методы постоянного тока и геоэлектрохимические методы.

В течение последних 20 лет учебников, справочников и какой-либо иной литературы по электроразведке, обобщающей опыт её применения, не издавалось. Поэтому информацию о применении низкочастотных методов в инженерной геофизике можно найти лишь в специализированных журналах и материалах конференций. В этой главе обобщён накопленный опыт: рассмотрены решаемые задачи, основные особенности методики наблюдений и интерпретации данных, принципы комплексирования методов, представлены характерные результаты электроразведочных работ.

Основными низкочастотными методами инженерной геофизики являются методы зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), частотного зондирования (ЧЗ) и аудио- и радиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ и РМТЗ). Для работ в шахтах и изучения межскважинного пространства применяется метод радиоволнового просвечивания (РВП).

Из представленного в главе обзора следует то, что в настоящее время низкочастотные ЭМ методы активно развиваются в направлении решения различных задач инженерной геофизики. Рассмотренные в главе основные виды геологических задач и решающие их методы ЭМЗ были оформлены в виде таблицы 1.

Из примеров применения методов ЭМЗ, приведённых в главе, можно заметить, что в основном исследования проводятся в профильном режиме. При этом не используется возможность получения некоторых параметров 3D среды в полосе вокруг профиля, которые могут дать полезную информацию и позволят избежать артефактов на 2D геоэлектрическом разрезе по профилю. Особенно это актуально для МТ методов, где могут измеряться несколько компонент ЭМ поля. Методика получения информации о 3D среде по профильным данным метода АМТЗ исследована в главе 3.

Как известно, ВЭЗ является наиболее распространённым методом постоянного тока и с помощью него решается большинство задач инженерной геофизики. Из сделанного обзора видно, что методом индукционного зондирования, решающим аналогичные задачи, является ЗСБ. При этом, несмотря на то, что в ряде случаев для решения конкретной задачи достаточно применения одного из этих методов, ВЭЗ и ЗСБ

имеют разную физическую основу, а потому несут разную информацию об изучаемой среде. Более того, комплексирование этих методов позволяет получать дополнительные параметры разреза, что значительно повышает точность геологической интерпретации геофизических результатов. Этому вопросу посвящена глава 4.

Таблица 1. Основные задачи инженерной геофизики и низкочастотные методы электроразведки, наиболее часто используемые для их решения.

Цели изысканий	Основные решаемые задачи	Низкочастотные методы			
		ЧЗ	ЗСБ	РМТЗ	АМТЗ
Для подготовки проекта строительства	Картирование глубины залегания коренных пород	+	+	+	
	Поиск разломов, трещиноватых и карстовых зон		+		+
Для подготовки проекта водоснабжения	Картирование коллекторов и водоупоров в осадочной толще		+		
	Оценка обводнённости массивов скальных пород		+		+
Для выработки мер по ликвидации опасных явлений	Изучение структуры оползней и их мониторинг		+		
	Изучение обводнённости горных выработок и тоннелей	+	+		+
	Поиск мест утечки воды из гидротехнических сооружений	+	+		
	Изучение химических загрязнений (солёной водой, нефтепродуктами)		+	+	
Для оценки местоположения подземных коммуникаций	Поиск и картирование подземных коммуникаций	+	+		
Для изучения и сохранения археологических памятников	Обследование известных археологических объектов	+			
	Картирование молодых отложений, в т.ч. культурного слоя	+	+	+	
Для освоения районов развития вечной мерзлоты	Картирование и определение глубин залегания мёрзлых и талых пород	+	+		

ГЛАВА 2. Современная методика проведения электромагнитных исследований

Для развития методики ЭМЗ в инженерной геофизике по наиболее актуальным вопросам необходимо выполнить обзор существующих методов и технологий регистрации, обработки и интерпретации данных. В главе освещён весь процесс исследований для каждого метода из таблицы 1, начиная со сбора информации и применяемой аппаратуры и заканчивая анализом и интерпретацией измеренных величин.

Особое внимание в главе уделяется параграфу, посвящённому анализу и интерпретации данных. В нём содержится информация, начиная от основ решения обрат-

ных задач электроразведки и заканчивая упоминанием отдельных программ и их особенностей, а также программ, позволяющих совместно интерпретировать данные разных методов ЭМЗ. В данном параграфе значительный объём приходится на МТ методы, где основным достижением автора является разработка программы MT_Array, предназначенной для площадного анализа МТ данных. Анализ МТ данных, с одной стороны, является достаточно сложным процессом по сравнению с другими ЭМ методами, поскольку качественно интерпретируется гораздо большее количество параметров. Но с другой стороны, с помощью углублённого анализа данных можно построить наиболее оптимальную интерпретационную модель, которая позволит получить более точное решение обратной задачи.

Программа MT_Array работает с площадными МТ данными в широко используемом формате EDI. Причём данные интерполируются на единую сетку частот, содержащую значения от 10^{-4} до 10^4 Гц с геометрическим шагом 1.166.

MT_Array позволяет рисовать карты рельефа, модуля и фазы эффективного импеданса и импеданса Бердичевского, а также рассчитанных по ним кажущихся сопротивлений и трансформаций Ниблетта. Помимо этого могут быть отображены карты параметров неоднородности и асимметрии (Свифта, поляризационного, Бара и магнитовариационного) и нормы матрицы Визе-Паркинсона. Также отдельно могут быть изображены карты диаграмм и стрелок, содержащие любую комбинацию из: амплитудных и фазовых полярных диаграмм, диаграмм Визе-Паркинсона, вещественных и мнимых индукционных стрелок и стрелок Возоффа (рис. 1). Причём в программе реализован новый подход к изображению данных матрицы Визе-Паркинсона на основе индукционных стрелок - индукционные лучи. В каждой точке наблюдения строятся два луча, один из которых по направлению совпадает с вещественной индукционной стрелкой в конвенции Визе, второй строится в противоположном направлении. Тогда соответственно с помощью первых лучей возможна локализация высокоомных структур и в благоприятных ситуациях оценка координат их центров, с помощью вторых - то же самое для проводников. Данный подход продемонстрировал свою эффективность в исследованиях, представленных в главе 3 (рис. 3).

В MT_Array реализована возможность поворота и нормализации МТ данных, а также экспорта, как с целью дальнейшей работы в программах Grapher, Surfer и др., так и для выполнения 1D, 2D и 3D инверсий в программах Occam1D, Reboss и WSInv3DMT соответственно. Причём для решения обратной задачи MT_Array позволяет формировать определённый набор данных, выбранный интерпретатором по результатам анализа.

На данный момент программа MT_Array неоднократно успешно применялась при анализе синтетических и наблюденных МТ данных. Также программа задействована в учебном процессе студентов и магистрантов кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова на практических занятиях и во время

полевой учебной практики. В диссертации MT_Array применялась для анализа синтетических МТ данных, представленных в главе 3.

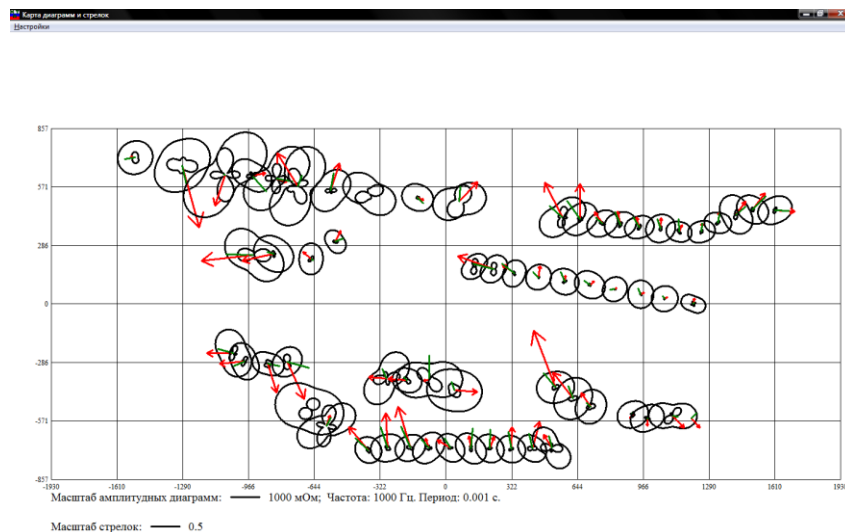


Рис. 1. Пример карты амплитудных полярных диаграмм и индукционных стрелок.

На основе информации, изложенной в данной главе, автором намечаются два наиболее актуальных вопроса, которые связаны с интерпретацией данных ЭМЗ и будут раскрыты в дальнейшем в главах 3 и 4:

- 1) Благодаря широкому внедрению программ, реализующих 3D инверсию МТ данных, автором будет развиваться методика получения параметров 3D структур по профильным наблюдениям.
- 2) Автором будет адаптирована методика последовательной частичной инверсии продольных и поперечных кривых при 2D интерпретации МТ данных для комплексной интерпретации данных методов ВЭЗ и ЗСБ.

ГЛАВА 3. Методика «бокового зондирования» геоэлектрических структур методом аудиоманнитотеллурического зондирования

Как при глубинных, так и при прикладных исследованиях МТЗ в большинстве случаев выполняются по одиночным профилям или системам из небольшого числа профилей. Использование регулярных площадных систем наблюдения требует существенных затрат времени и средств и нередко ограничено условиями местности. При изучении трёхмерно-неоднородных сред интерпретация получаемых данных связана с определёнными проблемами.

В настоящее время хорошо изучены возможности интерпретации в рамках 2D приближения. Однако при этом информация о поведении геоэлектрических структур вне профиля теряется, если не считать тех артефактов, которые они могут создавать на разрезе. Переход к 3D инверсии решает эту проблему, но при отсутствии регулярной площадной системы наблюдений обратная задача становится более неустойчивой.

Несколько лет назад М. Н. Бердичевским и В. И. Дмитриевым была высказана идея о методике «бокового зондирования» геоэлектрических структур. Она состоит из двух основных этапов:

- 1) выбор узкого класса моделей (создание интерпретационной модели);
- 2) восстановление 3D модели в полосе вокруг профиля.

На первом этапе помимо априорной геолого-геофизической информации важная роль отведена анализу МТ данных, позволяющему локализовать геоэлектрические структуры, оценить их простирание и степень вытянутости. Грубые количественные оценки некоторых геоэлектрических параметров могут быть сделаны по результатам 1D и 2D инверсий. На всей этой основе строится 3D модель, которая на последнем этапе корректируется с помощью программы для 3D инверсии МТ данных.

В данной главе на примере двух геоэлектрических моделей исследуются возможности методики «бокового зондирования». На этом пути используются стандартные методы анализа и инверсии МТ данных, но уделяется основное внимание не построению геоэлектрического разреза по линии профиля, а анализу эффектов, связанных с изменениями электропроводности вне профиля.

Первая модель представляет собой трёхслойную среду с тремя прямоугольными призмами во втором слое (рис. 2). Удельное электрическое сопротивление (УЭС) фонового разреза составляет 100 Ом·м до глубины 10 м, 400 Ом·м до глубины 300 м и 100 Ом·м ниже. УЭС призм равно 25 Ом·м, глубина до их кровли - 50 м, мощность - 100 м, а горизонтальные размеры каждой призмы - 300 м × 100 м. Одиночный профиль наблюдений пересекает первую призму в её центре, вторую - вблизи края, а третья призма находится вне профиля. Длина профиля - 1500 м, шаг по профилю - 25 м, диапазон частот колебаний поля - от 10 Гц до 10 кГц.

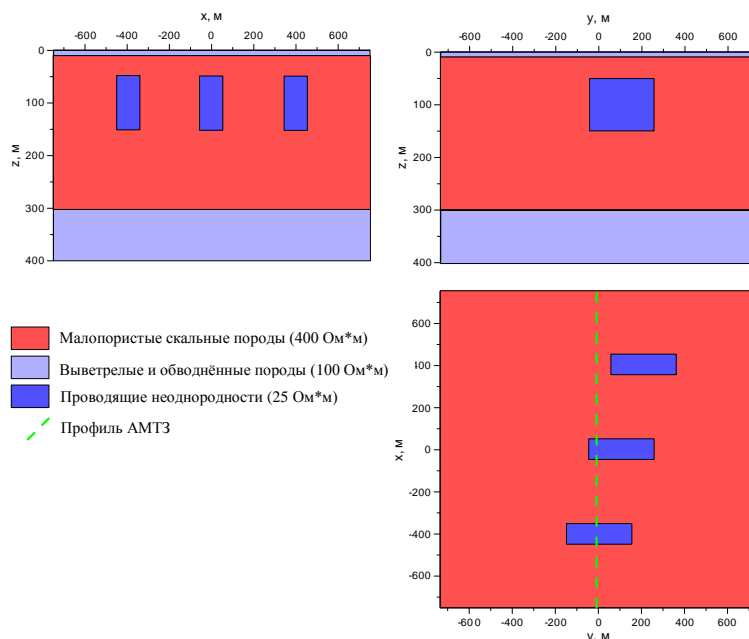


Рис. 2. Схема геоэлектрической модели с локальными неоднородностями: разрезы по плоскостям $y=100$ м и $x=0$ и карта на глубине $z=100$ м.

Тем самым имитируется ситуация, когда АМТЗ выполнены на одиночном профиле над массивом скальных пород, выветрелых в верхней (до глубины 10 м) и обводнённых в нижней (более 300 м) его части. Целью работ могла бы быть локализация проводящих (глинистых или обводнённых) зон, представляющих опасность при строительстве проектируемого тоннеля, над осью которого проложен профиль. Впрочем, можно представить себе множество других геологических ситуаций, которые можно описать такой моделью, вплоть до изучения коровых проводящих зон в высокоомной литосфере (при соответствующем изменении масштаба глубин и частот).

Вторая геоэлектрическая модель, которая не представлена в автореферате, отличается от первой только геометрическими размерами неоднородностей и их более сложным пространственным положением. В этой модели три проводящие призмы образуют протяжённую вертикальную зону мощностью 250 м, которая, изгибаясь, вначале идёт параллельно профилю, а затем пересекает его под углами 45 и 90 градусов, и имитируют разломную зону в скальных породах.

МТ данные, отвечающие модели на рис. 2, были рассчитаны с помощью программы 3D моделирования МТ3DFwd (автор - Р. Мэки). В диссертации выполнен подробный анализ синтетических данных, здесь же остановимся на наиболее показательных моментах.

Матрица Визе-Паркинсона, состоящая из комплексных компонент W_{zx} и W_{zy} , обладает большой чувствительностью к геоэлектрическим неоднородностям вдали от точки наблюдения. Рассмотрим карты вещественных индукционных стрелок $ReW = ReW_{zx} \cdot 1x + ReW_{zy} \cdot 1y$ (рис. 3). Они указывают направления от проводящих зон (конвенция Визе).

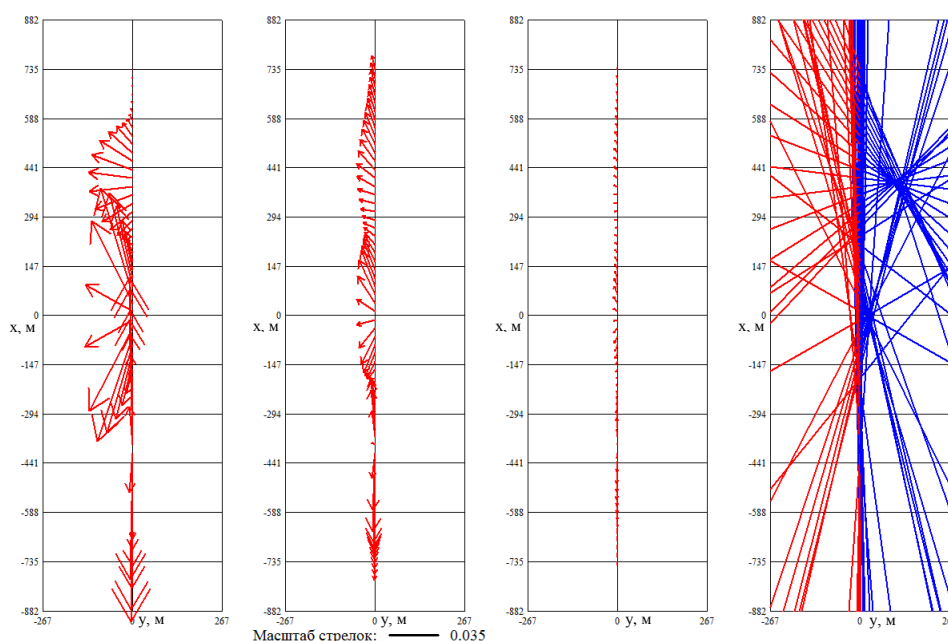


Рис. 3. Карты вещественных индукционных стрелок на частотах (слева направо): 2500, 250 и 25 Гц. Справа - карта лучей на частоте 2500 Гц.

В южной части профиля стрелки расходятся вдоль него в разные стороны от точки $x=-400$ м. На этой основе можно утверждать, что здесь располагается проводящая неоднородность, причём либо её центр находится на профиле, либо она далеко вытянута в обе стороны от профиля. В центральной ($x=0$ м) и северной ($x=400$ м) части профиля стрелки позволяют выделить два проводящих объекта, причём центры этих объектов находятся к востоку от профиля. Также характер стрелок позволяет судить, что центр северной аномалии находится дальше от профиля.

К данным матрицы Визе-Паркинсона был применён новый метод визуализации в виде лучей, реализованный в программе MT_Array (рис. 3). Проекция пересечений синих лучей на профиль отвечают проекциям истинных центров призм. Одно пересечение (северное) находится в 130 м от профиля (в то время как центр северной призмы - в 200 м), а другое - в 30 м (центр соответствующей призмы - в 100 м).

Аналогичный приём можно применить и для тензора импеданса, рисуя линии в его главных направлениях. Пересечение линий даст центр зоны аномального сопротивления, расположенной вне профиля.

Проанализируем также, как меняются вдоль профиля инвариантные (по отношению к вращению системы координат) параметры неоднородности и асимметрии среды. На рис. 4 приведены графики параметра неоднородности N и параметра асимметрии Свифта $skew_s$, рассчитанных по формулам:

$$N = \sqrt{1 - 4 \frac{Z_{XX}Z_{YY} - Z_{XY}Z_{YX}}{(Z_{XY} - Z_{YX})^2}}, \quad skew_s = \left| \frac{Z_{XX} + Z_{YY}}{Z_{XY} - Z_{YX}} \right|.$$

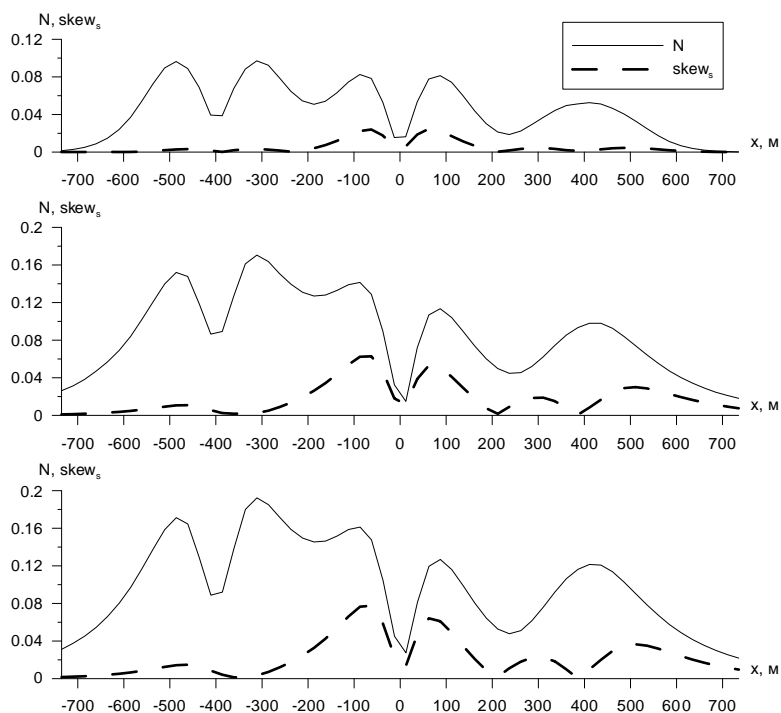


Рис. 4. Графики параметра неоднородности N и параметра асимметрии Свифта $skew_s$ для частот (сверху вниз): 2500, 250 и 25 Гц.

На графиках параметра N присутствуют 5 максимумов, и УЭС наиболее интенсивно меняется в горизонтальном направлении вблизи этих точек профиля. Поскольку на картах индукционных стрелок мы видели три аномалии, то логично предположить, что две пары острых максимумов, разделённых столь же острыми минимумами, связаны с границами двух неоднородностей, через которые проходит профиль. Широкий максимум обязан своим происхождением третьей неоднородности, расположенной вне профиля, при этом точка профиля с максимальным значением N наиболее близка к ней.

Параметр $skew_s$, характеризующий трёхмерные эффекты, очень мал на частоте 2500 Гц, однако на 250 Гц возрастает и при дальнейшем понижении частоты почти не меняется. Первая призма, углы которой наиболее удалены от профиля, слабо видна на графике. Другие две призмы дают небольшие аномалии $skew_s$ в точках профиля, наиболее приближенным к их углам. Максимальные значения $skew_s$ отвечают центральной неоднородности, поскольку она находится под профилем (и оказывает существенное влияние) и асимметрична относительно линии профиля.

Аналогичный анализ можно выполнить, используя норму матрицы Визе-Паркинсона $\|W\|$ и магнитовариационный параметр асимметрии $skew_{mv}$.

На этапе анализа МТ данных удалось выявить аномалии УЭС и приближенно определить их местоположение. Однако не менее важно оценить их глубины залегания, мощности и значения УЭС. Также необходимо получить представление о вмещающем разрезе. Для этого можно применить «сглаживающие» 1D и 2D инверсии.

На рис. 5 приведены полученные с помощью программы REBOCC результаты 2D инверсии. Геоэлектрический разрез, полученный в результате инверсии квази-продольного импеданса Z^{\parallel} , связанного с продольными токами, близок к результату 1D инверсии. На разрезе принципиально правильно восстановлена вмещающая трёхслойная среда, если не считать сглаживания границ, связанного с особенностями алгоритма. Кроме того, выделены две проводящие аномалии в районе $x=-400$ м и $x=0$ м. Устойчиво определена глубина до их кровли (примерно 50 м), но завышено УЭС (примерно 100 Ом·м вместо 25 Ом·м). Определённая проблема связана с появлением глубинных проводящих «корней», поскольку в 2D модели поведение Z^{\parallel} определяется только индукционными эффектами, и сильные гальванические эффекты (статические смещения) приводят к столь же сильным искажениям УЭС расположенных под неоднородностями зон, как и в случае с 1D инверсией. При этом остаётся велика невязка «наблюдённых» и модельных данных. Важным обстоятельством явилось то, что на разрезе не проявилась третья неоднородность, выявленная на этапе анализа МТ данных. Если бы мы рассматривали задачу о построении геоэлектрического разреза по линии профиля, то этот результат следовало бы считать успешным, поскольку третья призма действительно располагается в стороне от профиля. Однако нам важно получить информацию и о структурах вне профиля.

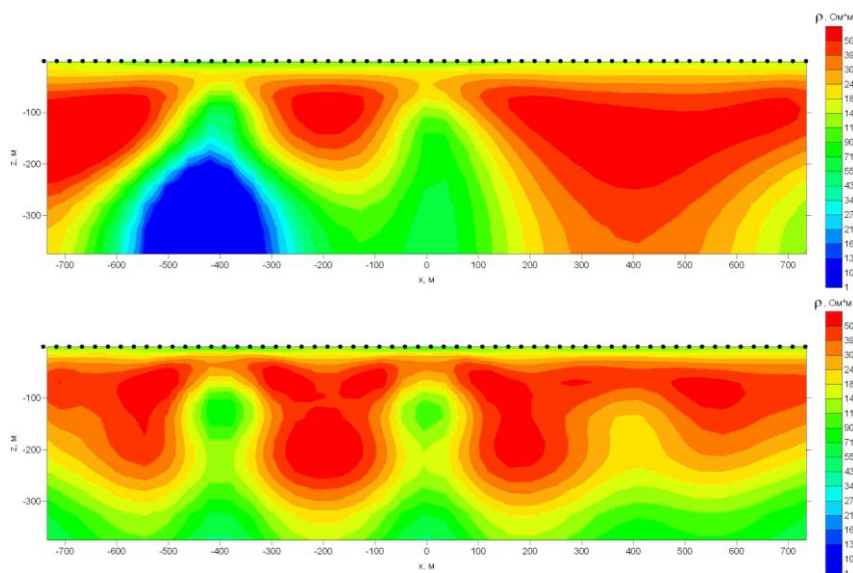


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы, полученные в результате 2D инверсии компонент Z^{\parallel} (сверху) и Z^{\perp} (внизу). Стартовая модель - однородное полупространство 100 Ом·м.

На разрезе, построенном с использованием квази-поперечного импеданса Z^{\perp} , связанного с поперечными по отношению к вытянутым структурам токами и наиболее устойчивого к 2D аппроксимации проводящих структур, видны все три неоднородности, но при этом глубина залегания и УЭС расположенной в районе $x=400$ м призмы оказались завышены. Таким образом, наличие проводящей структуры на разрезе, построенном по Z^{\perp} , и её отсутствие на разрезе, построенном по Z^{\parallel} , может объясняться тем, что эта структура находится в стороне от профиля.

Опробуемый подход подразумевает построение схематической 3D модели, включающей полученную на этапе анализа информацию об аномалиях и фоновом разрезе, и корректировка этой модели с помощью программы 3D инверсии. Однако начнём применение 3D инверсии с более простых стартовых моделей.

Для данного исследования использовалась программа WSInv3DMT (автор - В. Сирипунварпорн), которая выполняет сглаживающую инверсию МТ данных. Прямая задача в ней решается методом конечных разностей. Выполнялась инверсия четырёх комплексных компонент тензора импеданса, при этом для экономии вычислительных ресурсов ограничимся 11 периодами и 30 точками наблюдения.

Вначале в качестве стартовой модели было взято однородное полупространство (ОПП) сопротивлением 400 Ом·м (такое же сопротивление имеет слой, в котором располагаются проводящие призмы). Результаты инверсии показаны на рис. 6 слева. На карте, отвечающей глубине, на которой должны располагаться проводящие зоны, южная и центральная аномалии выделились чётко, но северная выражена не сильнее артефактов вблизи профиля. За краями профиля возникли ложные высокоомные объекты. На разрезе по линии профиля видно, что проводящие зоны расположились на завышенной глубине. Невязка инвертируемых и отвечающих этой модели данных (RMS) составляет 1.3.

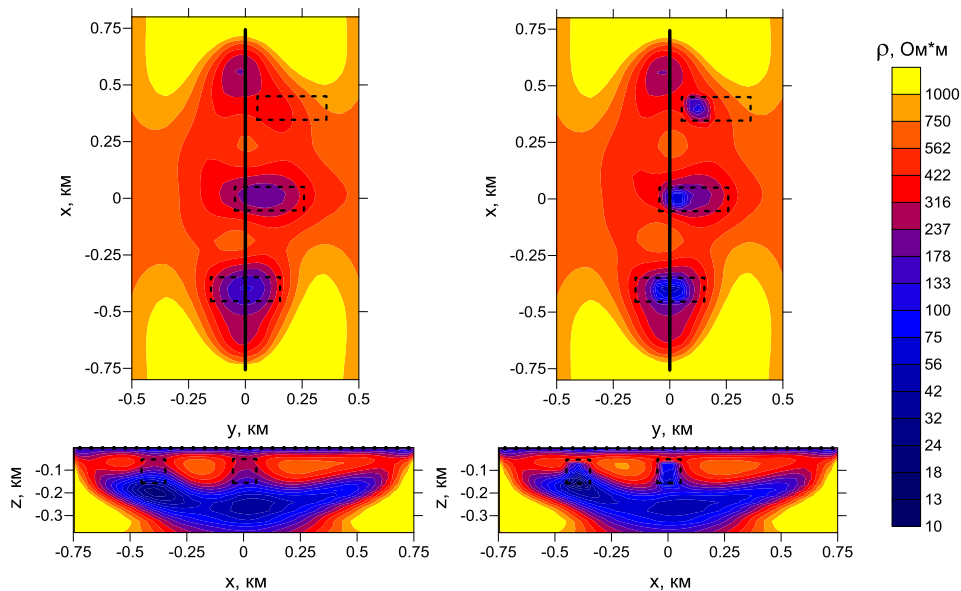


Рис. 6. Результаты 3D инверсии - карта сопротивления на глубине 112.5 м и геоэлектрический разрез вдоль профиля наблюдений (чёрная линия на карте). Стартовая модель для инверсии - ОПП 400 Ом·м (слева) и три призмы в ОПП 400 Ом·м (справа). Пунктиром показаны истинные положения призм.

Далее в стартовую модель были добавлены призмы, параметры которых были определены по результатам анализа и 1D и 2D инверсий и близки к истинным. Все три призмы присутствуют и в итоговой модели (рис. 6 справа), но ложные структуры за краями профиля сохранились, равно как и центральная глубинная аномалия, а невязка осталась на уровне 1.3.

Тогда в качестве фонового разреза в стартовой модели была задана истинная трёхслойная среда, которую удалось восстановить с помощью 1D и 2D инверсий. На рис. 7 показаны результаты инверсии для случаев, когда призмы соответственно не были и были включены в стартовую модель. В обоих случаях итоговые модели включают все призмы, их расположение определено верно, сопротивления и глубины залегания остались несколько завышенными, как и на этапе анализа и 1D и 2D инверсий, ложные структуры отсутствуют, и RMS составляет примерно 0.3.

Как мы видим, выбор стартовой модели весьма существенно влияет на результат инверсии. При удачном выборе 3D инверсия данных по одиночному профилю может дать вполне достоверное распределение сопротивления в полосе, охватывающей профиль наблюдений. Причём в условиях, когда среда представляет собой суперпозицию слоистого разреза и локальных неоднородностей (или протяжённой аномальной зоны, в случае со второй геоэлектрической моделью), ключевое значение имеет именно верное задание слоистой составляющей стартовой модели. Таким образом, за счёт сужения класса эквивалентных моделей (поиска решения в окрестности выбранной стартовой модели) удаётся успешно выполнять 3D инверсию на основе МТ данных, полученных на одиночном профиле.

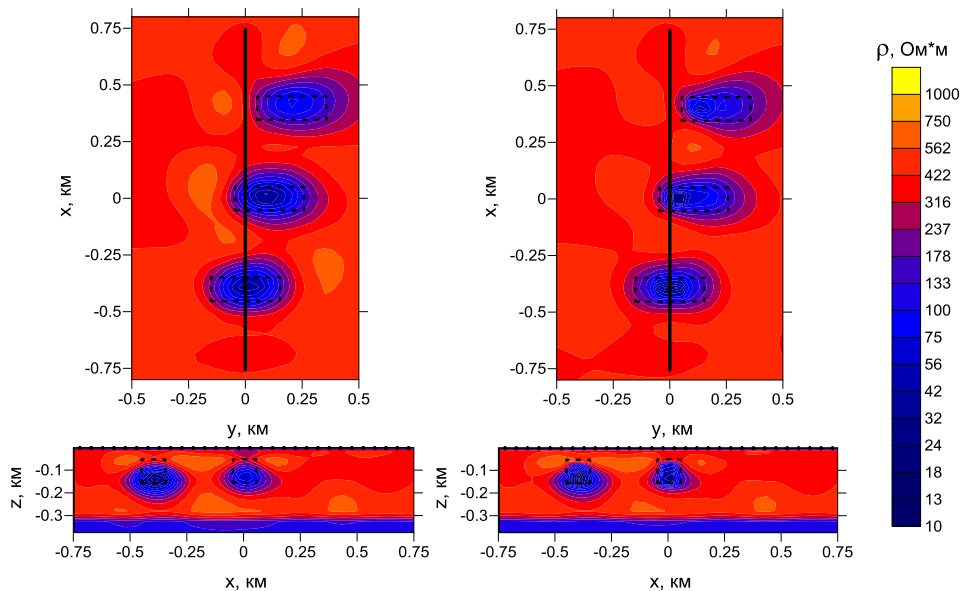


Рис. 7. Результаты 3D инверсии - карта сопротивления на глубине 112.5 м и геоэлектрический разрез вдоль профиля наблюдений (чёрная линия на карте).

Стартовая модель для инверсии - фоновая трёхслойная среда (слева) и три призмы в фоновой трёхслойной среде (справа). Пунктиром показаны истинные положения призм.

Конечно, были рассмотрены относительно простые геоэлектрические модели. При существенных региональных изменениях фонового разреза, более сложной форме изучаемых структур и высоком уровне приповерхностного шума решение задачи становится гораздо более сложным, и может потребоваться задание неоднородностей в стартовой модели.

Приведённый подход не следует рассматривать как универсальный, но в ряде случаев он может существенно повысить эффективность исследований. Речь идёт, в первую очередь, о прикладных исследованиях, при проведении которых, как правило, ограничиваются построением геоэлектрических разрезов по линиям профилей.

Также стоит отметить, что, во-первых, методика «бокового зондирования» позволяет выявить артефакты на разрезах, полученных с помощью 1D и 2D инверсии, которые связаны с 3D эффектами. Во-вторых, методика применима не только к данным АМТЗ, но и к другим модификациям МТ метода, например, РМТЗ (при соответствующем масштабировании глубин и частот).

Дальнейшее развитие данного направления состоит в накоплении опыта с помощью синтетических данных для различных моделей, имитирующих наиболее распространённые геологические ситуации, а также во внедрении методики «бокового зондирования» при исследованиях реальных объектов.

ГЛАВА 4. Совместная интерпретация данных методов вертикального электрического зондирования и зондирования становлением поля в ближней зоне

При решении задач инженерной геофизики изучаются глубины, как правило, до первых сотен метров. В комплексе геофизических методов при изучении этих глубин широко используются различные модификации метода сопротивлений, прежде всего, метод ВЭЗ, в т.ч. его современная модификация - метод электротомографии. За последние десятилетия стал всё шире применяться ещё один метод электроразведки, имеющий принципиально другие физические основы - это метод ЗСБ.

Метод ВЭЗ до конца прошлого века фактически был доминирующим, с помощью которого разрез изучался до первых сотен метров. Он обладает несложной схемой установки, и для измерений этим методом используется простая и недорогая аппаратура. Метод ВЭЗ позволяет получать УЭС, которое является чрезвычайно информативным параметром горных пород. К недостаткам метода относится резкое повышение трудоёмкости измерений при увеличении глубины исследования, а также во время интерпретации данных - проблема определения глубин границ из-за широкой области эквивалентных решений.

Также как метод ВЭЗ, ЗСБ позволяет изучать УЭС горных пород. К преимуществам ЗСБ относятся простая установка и высокая производительность при изучении глубин до первых сотен метров. Аппаратура ЗСБ в связи с рядом особенностей метода значительно сложнее и дороже по сравнению с ВЭЗ. Но основным недостатком метода ЗСБ является то, что измерения на очень маленьких временах становления (примерно до 10 мкс) зачастую искажены собственными процессами в измерительной установке, а значит, верхняя часть разреза (ВЧР) недоступна для изучения (до 2 - 20 метров в зависимости от установки и силы тока). Тем не менее, методы ВЭЗ и ЗСБ имеют значительный общий интервал изучаемых глубин.

Таким образом, комплексирование этих методов между собой могло бы помочь решить недостатки каждого из них. Но при рассмотрении вопроса комплексирования методов ВЭЗ и ЗСБ первое, с чем мы сталкиваемся - уровень кривых кажущегося сопротивления по обоим методам может отличаться в несколько раз. При этом различия бывают столь велики, что их невозможно объяснить частотной дисперсией УЭС. На самом деле возможные различия в данных ВЭЗ и ЗСБ заключаются в использовании каждым из методов разной составляющей ЭМ поля: ВЭЗ - гальванической, ЗСБ - индукционной. Более того, здесь уместно будет вспомнить «принцип информационной дополненности» из 2D магнитотеллурики, в которой, как известно, ЭМ поле разделяется на две части - ТЕ- и ТМ-моду. Первая связана с токами, текущими вдоль структур, то есть с индукционной составляющей поля, вторая - с токами, текущими поперёк структур, то есть с гальванической составляющей поля. Естественно предположить, что выводы для ТЕ- и ТМ-мод относительно их разной устойчивости к 2D аппроксимации реальных структур и чувствительности к различным объектам имеют

гораздо более широкий круг влияния и их можно распространить, в т.ч. на рассматриваемые в этой главе два метода.

Как известно, геологическая среда, представленная в виде горизонтально-слоистой модели, состоит из большого числа слоёв. При решении обратных задач геофизики, чтобы избежать неоднозначности решения, количество слоёв модели сводят к минимальному числу. Только для методов, использующих гальваническую составляющую поля, комбинация слоёв одна, а для методов, использующих индукционную составляющую, может быть совсем другая. В то же время каждая из этих групп методов позволяет определять свои устойчивые параметры разреза. Для первой группы такими параметрами являются продольная проводимость проводящих слоёв

$$S^\Sigma = \sum_i \frac{h_i}{\rho_i} \text{ и поперечное сопротивление высокоомных слоёв } T^\Sigma = \sum_i h_i \times \rho_i.$$

Для второй группы - суммарная продольная проводимость низкоомных слоёв S^Σ и глубина до подошвы высокоомных слоёв $H^\Sigma = \sum_i h_i$. Таким образом, комбинируя методы из обеих групп, можно получить максимум информации о многослойной среде.

Заменяя несколько тонких слоёв реальной геологической среды одним слоем интерпретационной модели, мы переходим к некоторому эквивалентному разрезу. Но для такого перехода необходимо, чтобы в эквивалентной модели параметры S^Σ , T^Σ и H^Σ слоя, заменившего несколько слоёв исходного разреза, были равны сумме соответствующих параметров слоёв исходного разреза. Выполнение этого условия возможно только в том случае, если суммарный слой представить макроанизотропным с

коэффициентом макроанизотропии $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n^\Sigma}{\rho_l^\Sigma}}$, где ρ_n^Σ - сопротивление слоя вкrest напластования, ρ_l^Σ - сопротивление слоя вдоль напластования.

Для гальванической составляющей эквивалентность разрезов обеспечивается двумя параметрами - S^Σ и T^Σ . Для индукционной составляющей - S^Σ и H^Σ . В первом случае сопротивление и мощность суммарного слоя ρ^G и h^G находятся из уравнений:

$$T^\Sigma = h^G \times \rho^G \rightarrow h^G = \sqrt{T^\Sigma \times S^\Sigma} = \sqrt{(h^\Sigma \times \rho_n^\Sigma) \times \left(\frac{h^\Sigma}{\rho_l^\Sigma}\right)} = h^\Sigma \times \lambda,$$

$$S^\Sigma = \frac{h^G}{\rho^G} \rightarrow \rho^G = \sqrt{\frac{T^\Sigma}{S^\Sigma}} = \sqrt{\frac{(h^\Sigma \times \rho_n^\Sigma)}{\left(\frac{h^\Sigma}{\rho_l^\Sigma}\right)}} = \sqrt{\rho_n^\Sigma \times \rho_l^\Sigma} = \rho_m.$$

В этом случае мощность суммарного слоя завышается в λ раз, а его сопротивление равно среднему геометрическому сопротивлений вдоль и вкrest напластования.

Для индукционной составляющей сопротивление и мощность эквивалентного слоя ρ^H и h^H определяются следующим образом:

$$h^H = h^\Sigma,$$

$$S^\Sigma = \frac{h^H}{\rho^H} \rightarrow \rho^H = \frac{h^H}{S^\Sigma} = \frac{h^\Sigma}{\left(\frac{h^\Sigma}{\rho_1^\Sigma}\right)} = \rho_1^\Sigma .$$

Таким образом, мощность суммарного слоя сохраняется, а сопротивление равняется сопротивлению вдоль напластования. То есть, давая информацию о глубинах некоторых геоэлектрических границ, индукционные методы плохо чувствуют высокоомные составляющие разреза, и полученные ими сопротивления в горизонтально-слоистых средах (ГСС) всегда меньше сопротивлений, полученных гальваническим методом.

Получается, построение общего геоэлектрического разреза, удовлетворяющего наблюденным данным обоих методов, будет затруднительно без введения макроанизотропных толщ. В таком случае в модель необходимо будет вводить большое количество тонких слоёв, что значительно снизит устойчивость решения обратной задачи. Во избежание этого правильнее будет присвоить некоторым толщам третий параметр помимо сопротивления и мощности - коэффициент макроанизотропии.

На рис. 8 приведены результаты расчёта прямой задачи ВЭЗ и ЗСБ для трёх моделей. Видно, что модели 1 и 2 для метода ВЭЗ являются эквивалентными, т.к. остались неизменны продольная проводимость второго слоя и поперечное сопротивление третьего. Расхождение между соответствующими кривыми ВЭЗ составило 1%. Однако для метода ЗСБ аналогичное расхождение равно 18,7%. Модель 3 является копией модели 2, за исключением сопротивления третьего слоя. Кривые ЗСБ для этих моделей практически совпали (расхождение 0,47%), тогда как расхождение соответствующих кривых ВЭЗ более 10%. Таким образом, можно сделать вывод о том, что с проблемой эквивалентности в геофизических методах нужно бороться с помощью комплексирования. Другими словами, нужно использовать тот факт, что эквивалентность разрезов в каждом методе происходит по своим параметрам: два разреза, эквивалентные по данным метода ВЭЗ, не будут эквивалентны в методе ЗСБ, и наоборот.

Отсюда появляется необходимость в создании общего функционала невязки для двух рассматриваемых методов. Такие функционалы представлены в небольшом количестве трудов как зарубежных, так и российских геофизиков и приведены в диссертации. А. А. Бобачёвым (Геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова) для исследований в данном направлении была создана версия программы IPI2win, в которой реализован общий функционал невязки в наиболее простом виде:

$$F(p) = \alpha \cdot \sum_{j=1}^{NR} \left(\ln \rho_{k_j}^{OBS} - \ln \rho_{k_j}^T(p) \right)^2 + (1 - \alpha) \cdot \sum_{j=1}^{NT} \left(\ln \rho_{\tau_j}^{OBS} - \ln \rho_{\tau_j}^T(p) \right)^2 ,$$

$$p = \{ \ln h_1, \dots, \ln h_{N-1}, \ln \rho_1, \dots, \ln \rho_N \} ,$$

где p - вектор параметров модели, N - количество слоёв в модели, $\rho_{k_j}^{OBS}$ и $\rho_{k_j}^T$ - наблюденные и теоретические значения кажущегося сопротивления на j -м разносе в методе ВЭЗ, $\rho_{\tau_j}^{OBS}$ и $\rho_{\tau_j}^T$ - наблюденные и теоретические значения кажущегося сопротивления

на j -м времени задержки в методе ЗСБ, NR - количество разносов, NT - количество времён задержки, $0 \leq \alpha \leq 1$ - параметр, контролирующий соотношение вкладов данных ВЭЗ и ЗСБ в функционал. Для автоматического решения обратной задачи используется вариант метода Ньютона минимизации невязки с использованием Тихоновского подхода к регуляризации решения некорректных задач. При регуляризации может использоваться априорная информация о глубинах границ и сопротивлениях слоёв.

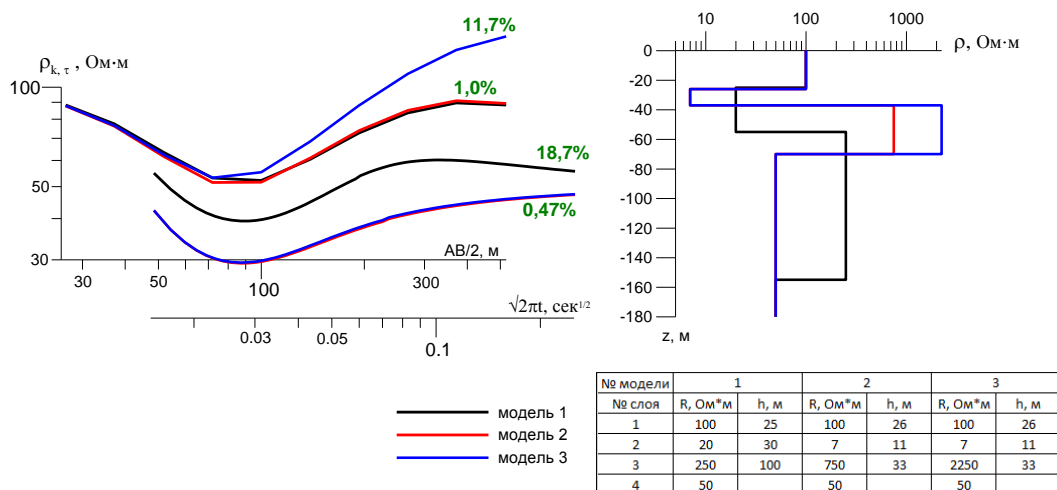


Рис. 8. Три модели, изображённые в виде таблицы и графиков справа, и кривые ВЭЗ и ЗСБ, полученные решением прямой задачи для этих моделей (слева). В процентах указаны невязки между данными относительно модели 2.

Поскольку приведённый общий функционал невязки подразумевает наличие в разрезе только изотропных слоёв, то макроанизотропные толщи могут быть изучены путём их дробления на несколько однородных слоёв разного сопротивления (причём их количество будет явно меньшим, чем в действительности). После определения параметров этих слоёв их следует обратно объединить и с использованием формул, вытекающих из представленных ранее, рассчитать сопротивления суммарной толщи вдоль и вкост напластования и её коэффициент макроанизотропии:

$$h^\Sigma = \sum h_i, \quad \rho_l^\Sigma = \frac{h^\Sigma}{\sum h_i / \rho_i}, \quad \rho_n^\Sigma = \frac{\sum h_i \times \rho_i}{h^\Sigma}, \quad \lambda = \sqrt{\rho_n^\Sigma / \rho_l^\Sigma}.$$

Вспоминая приведённые выше слова о «принципе информационной дополненности», стоит сказать, что при комплексировании методов ВЭЗ и ЗСБ нужно разработать оптимальную стратегию интерпретации, аналогично последовательной частичной инверсии данных ТЕ- и ТМ-моды при МТ исследованиях. А именно в начале интерпретации нужно использовать только данные ЗСБ для устойчивого определения глубин до проводящих слоёв. После этого, сделав дополнительное разбиение, нужно уточнять ВЧР и выявлять высокоомные составляющие в проводниках (при их наличии) по данным ВЭЗ.

В диссертации были рассмотрены четыре простых модели типа Н, К, Q и А с макроанизотропией во втором слое. Исследования показали, что проведение интер-

претации по предлагаемой методике затруднительно только для модели типа А. Это связано с тем, что второй и третий слой модели являются высокоомными относительно первого, и поэтому методу ЗСБ не удаётся достаточно точно восстановить положение геоэлектрических границ. Как следствие, это затрудняет выявление макроанизотропных толщ и определение их параметров. В целом тестирование данной стратегии интерпретации проводилось на 15 моделях, которые полярно отличались друг от друга - от моделей исключительно с изотропными слоями до моделей, состоящих только из макроанизотропных толщ. Рассмотрим одну из двух моделей, представленных в диссертации.

Для модели с одной макроанизотропной толщей (ломаная линия зелёного цвета на рис. 9) в программе IPI2win были решены прямые задачи ВЭЗ и ЗСБ: для ВЭЗ использовалась симметричная установка Шлюмберже с разносами $AB/2 = 1.39 \div 372.8$ м, выполненных с геометрическим шагом 1.39; для ЗСБ - установка «петля в петле» размером 50×50 м², времена измерения 10.5 мкс \div 15.3 мс (геометрический шаг 1.19). Времена до 10 мкс не использовались в расчётах специально, поскольку в полевых данных измерения на них часто искажены, то есть ВЧР в этой модели доступна изучению только методом ВЭЗ. Макроанизотропная толща представлена в виде чередования 9 тонких (по 5 метров) слоёв сопротивлениями 15 и 300 Ом·м.

На первом этапе решения обратной задачи автоматической инверсии подвергаются данные только метода ЗСБ (ползунок в программе устанавливается на значение 100, что соответствует $\alpha = 0$). При этом стартовая модель задаётся как ОПП - количество слоёв в нём, а также их мощности и сопротивление устанавливаются исходя из вида кривой ЗСБ. На рис. 9 приведён результат такой инверсии, где довольно хорошо восстановлены границы глубинной части модели и её сопротивления, за исключением высокоомного предпоследнего слоя, что объясняется плохой чувствительностью метода к изоляторам.

Понять, какие именно слои помимо ВЧР требуют дополнительного разбиения (то есть выявить макроанизотропные толщи), можно с помощью фиксации всех глубин в модели и выполнения инверсии данных только метода ВЭЗ: для однородных слоёв значения сопротивления практически не изменятся, тогда как для макроанизотропных - увеличатся в несколько раз. Итоговое количество слоёв в модели выбирается оптимальным между минимальным числом и маленькими невязками подбора кривых (чаще всего макроанизотропная толща заменяется на три однородных слоя).

На рис. 10 представлен результат совместной инверсии данных ВЭЗ и ЗСБ. Причём на этом этапе при выполнении инверсий вес α чаще всего принимает значения 0.5 \div 0.8, то есть больший вес отдаётся методу ВЭЗ. Невязки подбора получились равными 0.09% и 0.23% для ВЭЗ и ЗСБ соответственно.

Полученные три слоя, которые описывают макроанизотропную толщу, являются её эквивалентным представлением. Поэтому, если рассмотреть разрез по профилю, вдоль которого макроанизотропная толща меняется плавно (по мощности, количеству

прослоев и/или их сопротивлению), то эквивалентный набор слоёв от точки к точке будет вести себя хаотично, а геоэлектрический разрез потеряет в наглядности. Таким образом, необходимо объединять эти слои в один. При этом суммарный слой предлагается описывать тремя величинами, в которых будут отражаться все изменения макроанизотропной толщи в разрезе - мощностью, продольным сопротивлением и коэффициентом макроанизотропии. Получить эти величины несложно, используя приведённые ранее формулы. Для рассматриваемой модели значения этих параметров получились следующие: 42 м, 43 Ом·м и 2.1. Для истинной модели соответствующие величины равны: 45 м, 32 Ом·м и 2.3.

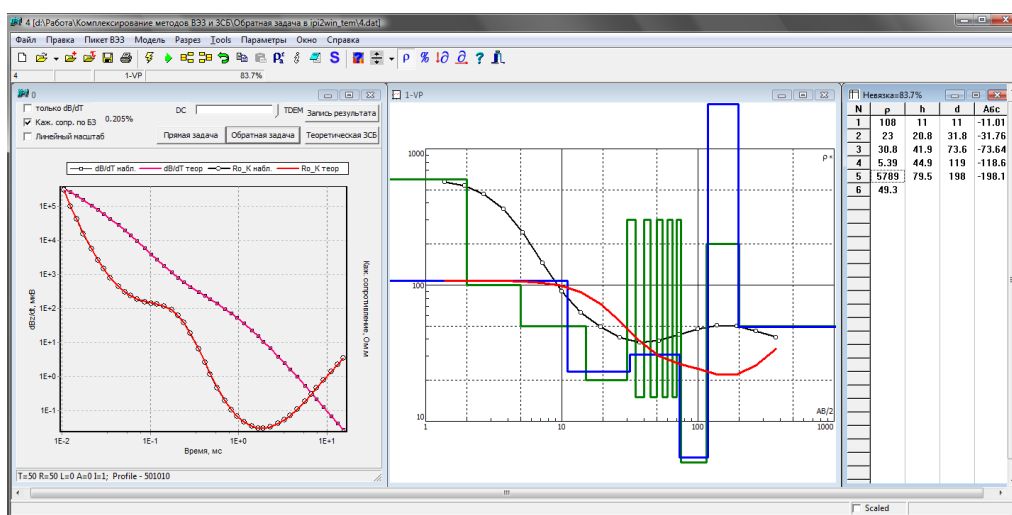


Рис. 9. Результат инверсии данных только ЗСБ (левое окно в программе IPI2win) - модель, показанная ломаной линией синего цвета (зелёного цвета - истинная модель) и значениями в таблице. В центральном окне - «наблюдённая» (чёрная) и теоретическая (красная) кривые ВЭЗ.

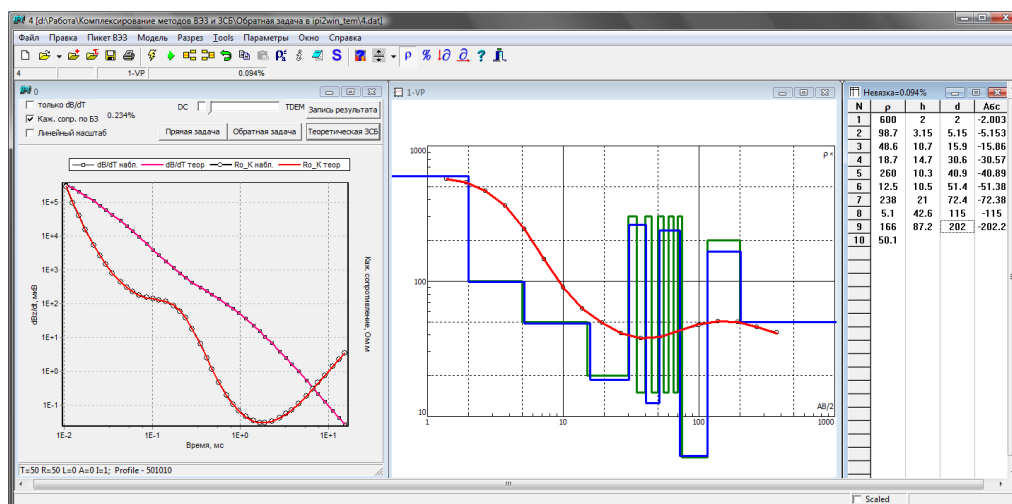


Рис. 10. Результат совместной инверсии ВЭЗ и ЗСБ - модель, показанная ломаной линией синего цвета (зелёного цвета - истинная модель) и значениями в таблице.

Представленная методика совместной интерпретации методов ВЭЗ и ЗСБ была опробована на полевых данных, полученных в 2008 году при выполнении инженерных изысканий под строительство АЭС в Томской области. В районе работ были проведены площадные измерения методами ВЭЗ (симметричная установка Шлюмберже, разносы $AB/2 = 1.39 \div 77.2$ м с геометрическим шагом 1.39) и ЗСБ (установка «петля в петле» размером 50×50 м², времена измерения от 12.6 до 828 мкс с геометрическим шагом 1.19) по сети 400×200 м². Параметры установок и измерений были выбраны таким образом, чтобы методом ВЭЗ была изучена только ВЧР, а не весь диапазон глубин, получаемый в методе ЗСБ. При работе методом ВЭЗ в качестве генератора и измерителя использовались соответственно приборы «Астра-100» и «МЭРИ-24», изготавливаемые ООО «Северо-Запад»; работы методом ЗСБ были выполнены с помощью аппаратуры «ТЕМ-Fast» производства компании АЕМR, Ltd. (Голландия).

На рис. 11 показан окончательный результат совместной интерпретации двух методов. На нём цифрами обозначены коэффициенты макроанизотропии слоя, а цветом отображаются сопротивления слоя вдоль напластования. Причём отсутствие в некоторых местах разреза информации о коэффициенте макроанизотропии означает, что на данном пикете слой удалось интерпретировать как изотропный. Исключение составляют толщи, неизученные методом ВЭЗ: для них невозможно определить коэффициент макроанизотропии, а мощность и сопротивление получены с помощью только метода ЗСБ. На разрезе пунктирная линия проходит по последним слоям, изученным обоими методами, показывая тем самым условный уровень глубинности метода ВЭЗ. Невязки подбора кривых ВЭЗ и ЗСБ по профилю в большинстве точек не превышают 2%.

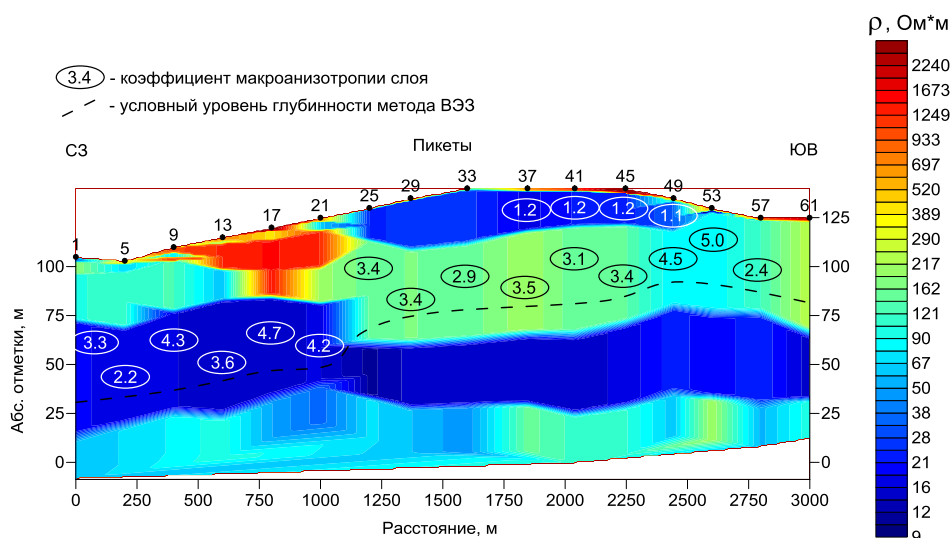


Рис. 11. Геоэлектрический разрез по профилю (Томская обл.).

Вдоль профиля пробурено несколько скважин, что позволило наполнить геоэлектрический разрез геологической информацией (рис. 12). Верхний проводящий слой представлен «линзой» глин и суглинков. Он является практически однородным: лишь на юго-востоке проявляется незначительная макроанизотропия, не превышаю-

щая значения 1.2. Под ним залегает мощная толща, представленная в основном песком и суглинком, неравномерно увлажнённая, с множеством органических осадков. Коэффициент макроанизотропии слоя меняется вдоль профиля и в среднем составляет 3.5. Причём к северо-западу толща сменяется сначала преимущественно на песчаную, затем на суглинистую, что подтверждено не только скважиной 10/2, но и коэффициентом макроанизотропии, который в этой части разреза становится равным 1. Ниже по разрезу располагается слой глин с включениями песков и супесей и прослоями лигнита и других растительных остатков, что известно по данным другой, более глубокой, скважины, располагающейся в районе работ. В большей части профиля глубина исследования методом ВЭЗ не достигала этого уровня (пунктирная линия на рис. 11), что не позволило изучить макроанизотропию этого слоя полностью. В изученной обоими методами части профиля коэффициент макроанизотропии этой толщи составляет в среднем 3.7. Поскольку профильные скважины не доходили до этих глубин, то неоднородность данной толщи однозначно показать нельзя, поэтому на разрезе представлен один из возможных вариантов. В основании разреза залегает песчано-глинистая пачка.

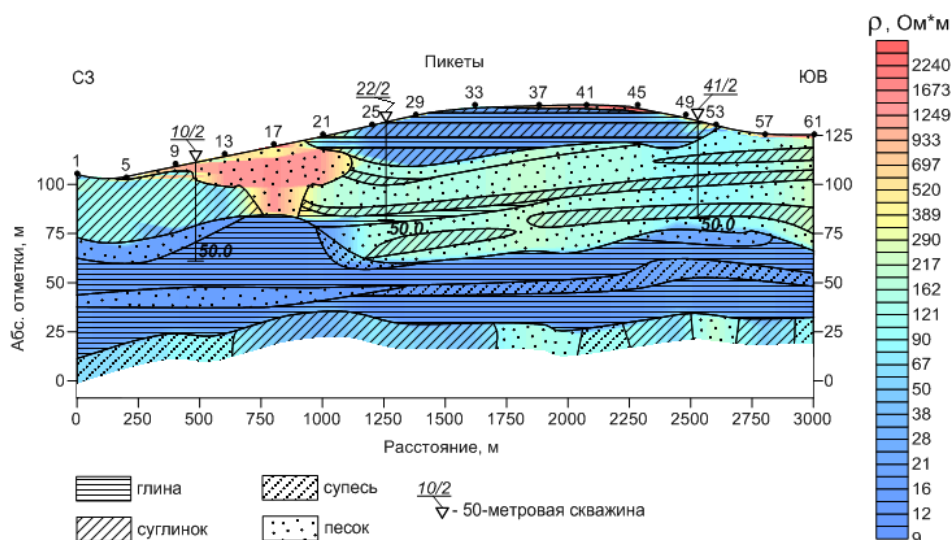


Рис. 12. Геологический разрез по профилю, представленному на рис. 11.

Безусловно, данный комплекс методов не является универсальным. На возможность выявления макроанизотропных толщ и определения их параметров влияет целый ряд факторов, таких как: тип геоэлектрического разреза, контраст сопротивлений внутри макроанизотропной толщи и во вмещающем разрезе, мощность и глубина залегания толщи и др. Поскольку стратегия интерпретации строится на получении по данным ЗСБ некоторых геоэлектрических границ, успешные результаты будут получаться в присутствии в разрезе низкоомных мощных слоёв. При переходе от синтетических данных к полевым применение выработанной стратегии совместной интерпретации ВЭЗ и ЗСБ значительно усложняется, поскольку на величины определяемых параметров разреза (в т.ч. параметров макроанизотропных толщ) сказываются ошибки измерений, а также искажения, вызванные 2D и 3D эффектами. Поэтому успех

применения разработанной методики в некоторых ситуациях будет зависеть от наличия априорной геологической и геофизической информации и опыта интерпретатора.

Дальнейшее развитие работы состоит в программной реализации общего функционала невязки, включающего коэффициент макроанизотропии в качестве третьего параметра слоя. Причём реализовать можно один из двух алгоритмов:

- подробно описанный в главе и заключающийся в разделении макроанизотропной толщи на несколько слоёв, а после определения их параметров в объединении в один суммарный слой с расчётом продольного сопротивления и коэффициента макроанизотропии;
- основанный на решении прямой задачи ВЭЗ для анизотропной модели и привлечении данных ЗСБ для повышения устойчивости решения обратной задачи.

Также данное направление должно развиваться, ориентируясь на переход к 2D интерпретации данных и использование электротомографии вместо метода ВЭЗ.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, представленных в четырёх главах диссертации, можно сделать следующие выводы:

1. Автором указываются, какие методы низкочастотной электроразведки могут применяться для решения конкретных задач инженерной геофизики (табл. 1), а также рассматриваются современные методики проведения исследований. На этой основе можно выбирать оптимальные методы решения различных геологических задач.
2. Перед выполнением инверсий МТ данных важно выполнить подробный их анализ. На его основе создаётся интерпретационная модель, в которой особое внимание следует уделить фоновому строению среды и которая значительно влияет на результат инверсии.
3. Применяя методику «бокового зондирования» для МТ данных, в случае контрастных объектов в квазислоистом разрезе удаётся получить устойчивую 3D модель в некоторой полосе, охватывающей одиночный профиль наблюдений.
4. Совместная интерпретация данных методов ВЭЗ и ЗСБ повышает устойчивость решения обратной задачи и позволяет получать дополнительный параметр ГСС - коэффициент макроанизотропии, что в свою очередь повышает детальность геологической интерпретации геоэлектрического разреза.

Работы по теме диссертации

Статья в журнале, рекомендованном ВАК:

1. Иванов П.В., Пушкарёв П.Ю. Возможности интерпретации магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле, при изучении трёхмерно-неоднородной среды // Физика Земли. 2010. № 9. С. 3-10.

Прочие публикации:

2. Иванов П.В., Алексеев Д.А., Бобачёв А.А., Пушкарёв П.Ю., Яковлев А.Г. Совместная интерпретация данных ВЭЗ и ЗСБ // Материалы докладов V Всероссийской школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна «ЭМЗ». Петергоф, 2011.
3. Иванов П.В., Алексеев Д.А., Бобачёв А.А., Яковлев А.Г. О комплексировании ВЭЗ и ЗСБ // Материалы докладов VII Международной научно-практической конференции и выставки «Инженерная геофизика». Москва, 2011.
4. Иванов П.В. Восстановление трёхмерно-неоднородной модели по результатам интерпретации магнитотеллурических данных, рассчитанных на одиночном профиле // Материалы докладов XVIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». Москва, 2011.
5. Иванов П.В. Программное обеспечение MT_Array для анализа магнитотеллурических данных // Материалы докладов XVII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов». Москва, 2010.
6. Иванов П.В., Пушкарёв П.Ю. Об информативности магнитотеллурических данных по отношению к изменениям электропроводности в стороне от профиля наблюдений // Материалы докладов VI Международной научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика». Геленджик, 2010.
7. Пушкарёв П.Ю., Белов С.В., Иванов П.В., Кошурников А.В., Парамонов А.А., Червинчук С.Ю., Шустов Н.Л. Комплексные геофизические исследования при поиске подземных вод в районе Истмия (Греция) // Материалы докладов IV Международной научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика». Геленджик, 2008.
8. Пушкарёв П.Ю., Иванов П.В. Оценка возможностей трёхмерной инверсии магнитотеллурических данных, полученных на одиночном профиле // Материалы докладов V Всероссийской школы-семинара им. М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна «ЭМЗ». Петергоф, 2011.
9. Pushkarev P.Yu., Ivanov P.V. Possibilities of interpretation of magnetotelluric data obtained on a single profile over 3D structures // Abstracts of International workshop on EM sounding in memory of professors Mark N. Berdichevsky and Peter Weidelt. Moscow-Zvenigorod, 2010.
10. Pushkarev P.Yu., Ivanov P.V. Possibilities to investigate off-profile resistivity variations using MT data: a synthetic study // Abstracts of 20th EMI Workshop. Giza, Egypt, 2010.
11. Pushkarev P.Yu., Koshurnikov A.V., Shustov N.L., Ivanov P.V., Sileva D.S. Electromagnetic methods in engineering, hydrogeological and permafrost studies // Abstracts of 19th EMI Workshop. Beijing, China, 2008.