

На правах рукописи



Маловичко Михаил Сергеевич

**Электромагнитные геометрические зондирования
с донными косами
при поисках углеводородов на мелководье**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поиска полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Петров Александр Аркадьевич

Официальные оппоненты:

Ермохин Константин Михайлович,
доктор технических наук (ООО «Теллур-СПб», Заместитель генерального директора по научной работе)

Коротяев Сергей Маратович,
доктор физико-математических наук (ЦГЭМИ ИФЗ РАН, заведующий лабораторией Морских электромагнитных исследований)

Ведущая организация: ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН»

Защита состоится 22 октября 2014 г. в 16-00 на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета:  — Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Морские геометрические зондирования применяются на поисковой стадии геологоразведочных работ для снижения рисков бурения структур, оконтуренных сейсморазведкой (Edwards, 2005; Пальшин, 2009; Constable, 2010; Hesthammer et al., 2010). Главным поисковым признаком являются зоны повышенного удельного электрического сопротивления (УЭС), которые, в условиях низкоомных морских разрезов, служат индикаторами наличия углеводородов (УВ) (рассмотрение эффекта вызванной поляризации применительно к задачам поиска УВ выходит за рамки настоящей работы). Присутствие УВ в поровом пространстве снижает водонасыщенность и повышает УЭС породы, в результате чего крупные коммерчески значимые скопления УВ могут быть выявлены измерениями с поверхности.

При малой глубине моря (от 0 до 100-200 м) широкое распространение получили, фактически, только два вида методов: буксируемые установки (стримеры) для измерения в частотной или временной областях; и многоразностные многочастотные зондирования с донными автономными приёмниками, известные как *controlled-source electromagnetics – CSEM*¹ и которые в настоящей работе, вслед за (Ваньян, 1997), называются *геометрическими зондированиями*. Буксируемым системам (Ziolkowski and Wright, 2007; Vekeen et al., 2009; Li and Constable, 2010; Anderson and Mattsson, 2012; и др.) присущ общий недостаток, связанный с высоким уровнем шумов, а также ограничения, накладываемые осадкой судна-источника и изрезанностью береговой линии. К недостаткам классических геометрических зондирований с автономными донными регистраторами (Cox, 1981; Srnka, 1986), а также их адаптациям для мелководных нужд (Shantsev et al, 2010), относятся высокая стоимость оборудования (в т.ч. специализированных судов) и невозможность выполнять измерения при глубинах моря менее 30÷50 м из-за помех, связанных с волнением моря.

В настоящей работе рассматривается новая методика геометрических зондирований дипольно-осевой установкой с автономными донными приёмными линиями (косами) и поверхностной питающей линией (Петров и др., 2010). Методика позволяет экономически эффективно выполнять съёмку мелководных акваторий с изрезанной

¹ Существуют также аббревиатуры MCSEM, fCSEM, SBL и др.

береговой линией в условиях высокого уровня шумов и строить модели электропроводности разреза. Это даёт возможность использовать электропроводность в комплексной геолого-геофизической интерпретации и повышать качество прогноза месторождений УВ на мелководных площадях, ранее не доступных для подобного изучения. Вместе с тем, это направление появилось относительно недавно и возможности его применения для нефтегазопроисковых задач во многом не изучены. Таким образом, **актуальность темы исследования** определяется необходимостью дальнейшего развития методики электромагнитных зондирований в мелководных условиях и изучения возможности применения таких измерений для задач поиска нефти и газа в связи с практической потребностью в подобных работах при том, что существующие технологии обладают существенными недостатками.

Целью работы является развитие методов электроразведки в условиях мелководных акваторий и транзитных зон применительно к задачам поиска нефти и газа.

Задачами работы являлись:

1. определение возможностей донной дипольно-осевой установки с донными косами при зондировании мелководных акваторий;
2. определение структуры шумов в первичных данных;
3. создание графа обработки данных с учётом специфики измеряемых сигналов;
4. проверка работоспособности метода для поиска УВ в реальных геологических условиях.

В ходе проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены следующие **новые научные результаты**:

1. обоснована технология регистрации сигналов донными приёмными косами, позволяющая зондировать мелководные акватории и достигать приемлемого отношения сигнал/шум;
2. изучена спектральная и вероятностная структура шумов, возникающих при донной регистрации кабельными системами в мелководных условиях;
3. разработан граф обработки сигналов в частотной области с учётом специфики измерений;
4. путём математического моделирования и анализа полевых данных определена эффективность описываемой технологии для

расчленения комплексов ГП и оценки перспективности целевых интервалов на нефть и газ в некоторых геологических условиях;

5. построена модель электропроводности месторождения им. В.Филановского и получены новые детали его строения.

Выделяя основные научные результаты, можно сформулировать следующие **защищаемые положения**:

1. геометрическое зондирование с поверхностным возбуждением и донным приёмом позволяет эффективно строить модель электропроводности разреза в условиях мелководных акваторий, труднодоступных для других методов электроразведки;
2. разработанный алгоритм обработки данных учитывает структуру шумов и эффективен при обработке полевых измерений в условиях высокого уровня помех, характерного для мелководных измерений;
3. геометрические зондирования с донными косами на основании независимой от сейсморазведки информации - значений электропроводности горных пород - позволяют делать выводы о наличии углеводородов в поровом пространстве и повысить достоверность прогноза крупных скоплений нефти и газа при комплексной интерпретации геолого-геофизических данных.

Практическая значимость выполненного исследования заключается в следующем:

1. оценена эффективность рассматриваемой методики в различных условиях;
2. получены новые данные о структуре шумов в сигналах, записанных донными косами на мелководье;
3. создан граф обработки первичных данных, учитывающий структуру шумов и специфику измеряемых сигналов, который в настоящее время встроен в программу массовой обработки полевых данных;
4. на примере реального месторождения показано, как данные мелководных геометрических зондирований позволяют строить модель электропроводности разреза и, в итоге, повышать точность нефтегазового прогноза;
5. получены новые детали геологического строения мест. им.В.Филановского.

Личный вклад

1. Путём теоретического анализа сигналов и математического моделирования исследованы возможности метода в различных условиях;
2. Выполнен анализ шумов в первичных измерениях для различных глубин моря.
3. Разработан и реализован на C++ граф обработки первичных данных, включённый в программу массовой обработки полевых данных.
4. Изучен применяемый аппаратно-методический комплекс (шумовые свойства парка регистраторов, стабильность генератора тока, точность системы позиционирования и т.д.).
5. Программно реализован алгоритм одномерной минимизации данных геометрических зондирований с донными косами.
6. Выполнен набортный контроль качества массивов данных, полученных в Каспийском и Чёрном морях в 2008-2011 гг.
7. Выполнена камеральная обработка массивов полевых измерений, полученных в Каспийском, Чёрном, Баренцевом, Азовском, Северном морях и у берегов Калифорнии с 2004 по 2013 гг. и обобщены результаты.
8. Выполнена инверсия данных и геологическая интерпретация материалов с участка в Каспийском море.

Апробация результатов исследования

Основные результаты работы были представлены на международной конференции «Проблемы геокосмоса» (Петергоф, 2008), на международной школе-семинаре по электромагнитным методам (EMS-09, Москва, 2009), на международной школе-семинаре «Геофизика 2009» (Петергоф, 2009), 8-м Международном геофизическом научно-практическом семинаре “Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых” (Санкт-Петербург, 2010), Школе семинаре ЭМЗ-2011, также доложены на кафедре Физики Земли СПбГУ.

Автор имеет на данную тему 3 опубликованные работы в журналах, рекомендованных ВАК, подготовленных лично и в соавторстве, 1 патент и 5 докладов на научных конференциях.

Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемых источников (133 наименования включая 23 электронных ресурса). Работа изложена на 151 странице, включая 99 рисунков.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. А.А.Петрову. Автор благодарит д.ф.-м.н. А.В.Тулупова, под руководством которого автор многие годы работал в ЗАО ЕММЕТ, и весь коллектив этой организации. Автор благодарит сотрудников компании Лукойл к.г.-м.н. С.В. Делию, к.г.-м.н. А.Г. Алексеева, и сотрудника компании Роснефть Н.К. Мясоедова за возможность использовать некоторые материалы в этой работе. Автор глубоко признателен всем специалистам, с которыми он работал и на мнение которых опирался при работе над диссертацией: к.т.н. Е.Д.Лисицыну, В.Э. Кясперу, к.г.-м.н. А.Б.Кочерову, PhD Н.Б.Явичу, к.ф.-м.н. Н.Ю.Боброву, к.ф.-м.н. В.Г. Магурину, д.ф.-м.н. Л.Ф. Московской, к.г.-м.н. М.Б. Сергееву, к.г.-м.н. Ю.Э. Петровой, В.А. Синкевичу, Д.Б. Ефремову, PhD J.M.Singer, PhD S.E.Hallinan, PhD C.Scholl, D.M.Watts, F.Miorelli, д.г.-м.н. С.В. Аплонову, к.г.-м.н. А.К. Сараеву, д.т.н. К.М. Ермохину, к.ф.-м.н. С.С. Крылову, д.г.-м.н. К.В. Титову, д.ф.-м.н. В.И. Дмитриеву, д.т.н. И.Н. Модину, д.ф.-м.н. Ю.П. Ампилову, М.Ю. Токареву и к.ф.-м.н. П.Ю. Пушкарёву.

Краткое содержание работы

Во **введении** рассматриваются основные этапы развития морской электроразведки и терминологические аспекты. Отмечается, что морская электроразведка активно развивалась в СССР, особенно во второй половине XX в. (Назаренко, 1957; Маловицкий и др., 1977; Вишняков и др., 1983; и др.).

Глава 1 посвящена обзору моделей залежи УВ и современного состояния морской электроразведки. В **разделе 1.1** приведено описание применяемых геоэлектрических моделей залежи УВ. Обычно используемая модель основана на том факте, что наличие УВ в поровом пространстве снижает водонасыщенность породы и, как следствие, повышает её УЭС (Archie, 1942; Hashin and Shtrikman, 1963; Sen et al., 1981; и др.). Суммарное повышение УЭС продуктивного интервала, часто

состоящего из нескольких продуктивных пластов, может быть достаточным для выявления измерениями на морском дне. Модели такого рода получили широкое практическое распространение, т.к. связь между УЭС и параметрами ГП хорошо изучена теоретически, лабораторно; начальная модель месторождения может быть построена на основании данных каротажа и изучения керна; появляется возможность пересчитать значения УЭС в содержание УВ по тому или иному закону (Weitemeyer et al., 2005; Schwalenberg et al., 2005). Известны примеры совместной инверсии данных электроразведки и сейсморазведки непосредственно в параметры ГП (Hoversten et al., 2008). Рассмотрение моделей, предполагающих наличие над залежью УВ области вторичных изменений ГП (Сейфулин и др., 1986; Сёмин и др., 1998; Корольков, 1987; Sternberg, 1991; Pirson, 1982; He et al., 2010 и др.) выходит за рамки настоящей работы, хотя имеются впечатляющие примеры их применения (Легейдо, 1996).

В разделе 1.2 приведен обзор современных методов морской электроразведки с активным источником. При поисках УВ используется преимущественно горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ), что связано с простотой реализации такого источника при достаточной мощности. Поле ГЭЛ возбуждает две моды электрического поля ТЕ и ТМ, что создаёт предпосылки для высокой разрешающей способности (Chave and Cox, 1982). Наиболее широко применяется метод CSEM в варианте глубоководных геометрических зондирований с придонным источником (Constable and Srnka, 2007). Известны модификации этой методики для работы малых глубинах (Shantsev et al., 2010), предусматривающие поверхностное возбуждение. Другая широко применяемая группа методов связана с использованием буксируемых систем (т.н. стримеров) (Anderson and Mattson, 2012; Veeken et al, 2009; Li and Constable, 2010 и др.). Общий недостаток всех стримеров - донных, поверхностных и заглублённых - связан с высоким уровнем шума и невозможностью работать на акваториях с изрезанной береговой линией. Приводится описание некоторых методик, которые не получили широкого распространения либо находятся в стадии разработки (например, донные станции для регистрации E_z во временной области (Barsukov et al., 2005) и ряд других). Отмечается, что обширная группа разработок ориентирована на исследование верхней части разреза для поиска газогидратов или решения

инженерных задач (Рыбакин, 1986; Weitemeyer et al, 2009; Chave et al, 1992; Модин, 2010; и ряд других).

Глава 2 посвящена методическим вопросам геометрических зондирований на мелководье и теоретическому изучению возможностей таких измерений. В **разделе 2.1** описан аппаратно-методический комплекс для мелководных измерений, рассматриваемый в этой работе. Поле возбуждается горизонтальной электрической линией (ГЭЛ), буксируемой по поверхности воды (рис.1).

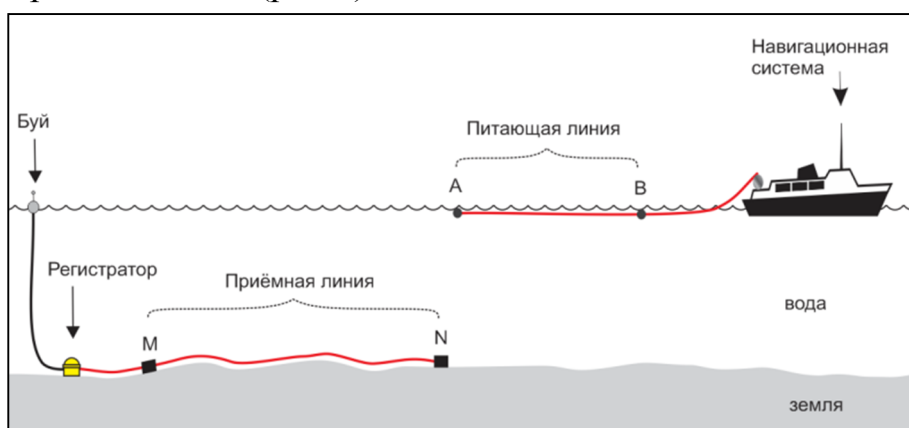


Рисунок 1. Принципиальная схема установки.

Возбуждение поля на поверхности моря не уступает по эффективности придонному источнику при глубине моря менее 300 м. Позиционирование источника осуществляется спутниковой системой навигации, а не гидроакустической системой. Это значительно повышает точность привязки, которая в настоящее время является одним из основных источников ошибки при выполнении измерений с придонным источником (Constable, 2010). Форма питающего тока – меандр с 50% скважностью и ведущей частотой 0,0625 Гц (также обрабатываются несколько нечётных субгармоник). Система приёма состоит из автономных регистраторов соединённых с донными линиями (косами) длиной 500 м. Непрерывно записывается разность потенциалов ΔU . Использование длинных приёмных линий снижает влияние помехи, связанной с волнением моря (волновой помехи) до приемлемого уровня и делает возможным выполнение измерений в условиях крайнего мелководья.

В **разделе 2.2** рассмотрены основные уравнения (п.2.2.1), асимптотические представления дальней/ближней зоны (п.2.2.2), проблема «воздушной волны» (п.2.2.3), предельные случаи по отношению к глубине моря (п.2.2.4); затронут вопрос об использовании понятия кажущегося

удельного сопротивления в морской геоэлектрике (п.2.2.5) и рассмотрены понятия TE и TM мод поля (п.2.2.6). Показано, что разные части кривых геометрического зондирования находятся в разных зонах источника: ближней, промежуточной и дальней (Ваньян, 1997). Отмечено, что проблема "воздушной волны" (Løseth et al., 2007; Chandola et al., 2007; Weiss, 2007; Chen and Alumbaugh, 2011; и др.), которая в полевых измерения на мелководье проявляется как выход амплитудных кривых на неинформативную асимптотику $1/r^3$ (r -разнос), а фазовых - на константу, может быть объяснена выходом в дальнюю зону источника. Представляется, что выбор достаточно низкой частоты возбуждающего поля (0,01-0,2 Гц) необходим при геометрическом зондировании мелководных акваторий из-за необходимости снизить влияние той части первичного поля, которое распространяется в воздушном пространстве и маскирует отклик от нижнего полупространства. При этом ослабляется роль индукционной моды поля и, за счёт снижения вклада горизонтального скин-эффекта, уменьшается разрешающая способность данных.

В разделе 2.3 приводится краткий обзор некоторых программ и подходов, которые успешно применялись для моделирования или инверсии данных морской геоэлектрики (например, Спичак, 1983; Druskin et al., 1994; Oldenburg et al., 2005; Commer et al., 2004; Zach et al., 2008; Abubakar et al., 2008; Mackie et al., 2007; Li and Key, 2007; Иванов и др., 2007; Nechaev et al., 2008; Персова и др., 2013; Dmitriev et al., 2012; Zhdanov et al., 2011; Петров, 1992; и ряд других). Рассматриваются прямая и обратная 2.5D задачи конечно-разностного (КР) пакета Otze (Yavich and Scholl, 2012), которые был использован для инверсии данных в этой работе. Поиск компонент гармонического электромагнитного поля \mathbf{E} и \mathbf{H} формулируется как решение системы дифференциальных уравнений в частных производных относительно пространственных Фурье-образов $\hat{\mathbf{E}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$ на плоскости XZ с краевыми условиями на границе расчётной области. Задача сводится к нахождению $\hat{\mathbf{E}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$ в конечном числе точек, расположение которых относительно введённой КР сетки определяется по (Yee, 1996). Замена дифференциальных операторов их КР аналогами сводит задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений. Параметры генератора КР сетки выбирались так, чтобы обеспечивалось совпадение 1D и 2D решений с точностью <2%. Решение регуляризованной обратной задачи (Тихонов и Арсенин, 1979)

выполнялось итеративно методом наискорейшего спуска с адаптивной регуляризацией. В стабилизатор закладывались требования горизонтальной и вертикальной гладкости, близости к стартовой модели, а также линии разрыва этих требований вдоль некоторых границ.

В разделе 2.4 приведены результаты 1D, 2D и 3D моделирования, в ходе которого инвертировались синтетические данные, выполненного для оценки возможности метода в некоторых часто встречающихся геологических ситуациях.

Для 1D моделирования автором была реализована программа обращения, основанная на минимизации Тихоновского функционала с адаптивной регуляризацией. Вмещающая среда была построена на основе каротажа с северного шельфа Охотского моря. Залежь моделировалась слоем мощностью 100 м и УЭС 100 Омм. Моделирование выполнялось для нескольких глубин залегания залежи в диапазоне 0,5÷3 км. Показано, что глубин 2 км залежь может быть уверенно восстановлена.

2D моделирование выполнялась в пакете Otze. Вмещающая среда была создана на основании скв. Магадан-1 (Охотское море) с благоприятными для электроразведки условиями: низкое УЭС вмещающих толщ (первые Омм) и отсутствие высокоомных пород. Залежь моделировалась двумерным включением шириной 5 км, УЭС $\rho=100$ Омм. Моделировались различные мощности и глубины залегания залежи. Установлено, что в данных условиях инверсия надёжно выявляет залежь при глубине залегания не более 1,7 км (рис. 2).

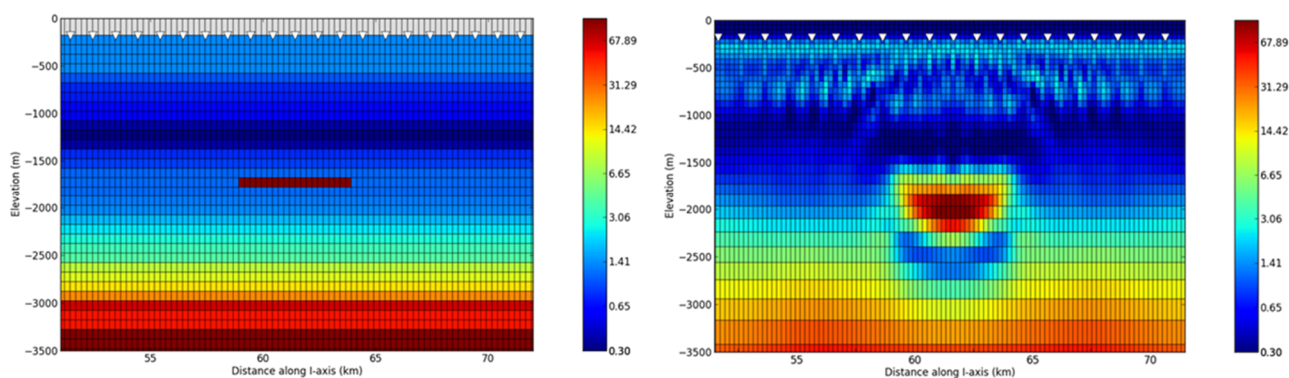


Рисунок 2. Один из результатов 2D моделирования. Истинная модель (слева) и результат сглаживающей инверсии (справа).

Для 3D моделирования синтетические данные, рассчитанные методом объёмных интегральных уравнений (автор реализации – А.А.Петров) обращались в пакете Otze как в 2D, так и в 3D варианте. Истинная модель представляла собой вмещающую горизонтально-

слоистую среду, в общих чертах повторяющую строение средней части вала Шатского (Чёрное море): глинисто-песчаная олигоцен-четвертичная толща, подстилаемая карбонатными и карбонатно-терригенными породами от эоцена до верхней юры. Целевые объекты моделировались трёхмерными вставками 3x3x0,1 км. Подобная модель сложна для электроразведки из-за резкого скачка УЭС во вмещающей среде. Установлено, что двумерная инверсия трёхмерных данных не позволяет в данных условиях восстановить разрез с приемлемой точностью. Основной результат получен при трёхмерной инверсии. Ниже приведен один из результатов 3D инверсии, при котором поиск был ограничен интервалом глубин, соответствующему второму и третьему слоям вмещающей среды. В результате инверсии геометрия аномальных объектов была удовлетворительно восстановлена (рис. 3).

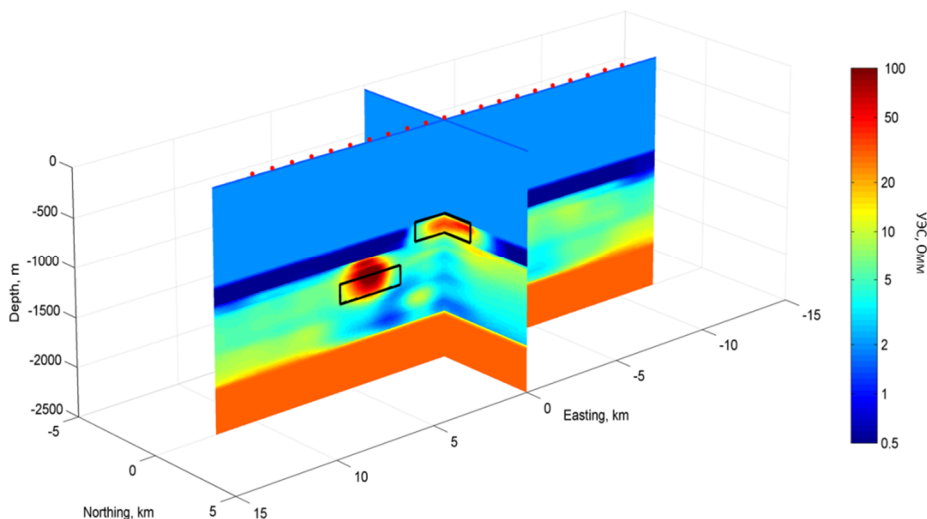


Рисунок 3. Один из результатов 3D инверсии. Прямая и обратная задачи - трёхмерные. Чёрная линия – истинное положение тел.

Резюмируется, что, несмотря на сниженную разрешающую способность данных из-за вынужденного снижения частоты возбуждения, обсуждаемые измерения, выполняемые на нескольких частотах, содержат достаточно информации для построения УЭС разреза на мелководье и, таким образом, доказывається **защищаемое положение 1**.

Глава 3 посвящена обработке полевых данных. В **разделе 3.1** приведены основные результаты изучения шумов. Изучение спектральной и вероятностной структуры шумов было выполнено на полевых данных, записанных в разные годы в акваториях Чёрного, Каспийского, Азовского, Баренцева, Северного морей и побережья Калифорнии. Роль промышленных шумов незначительна. Основными шумами являются:

шумы аппаратуры; магнитотеллурические (МТ) шумы; волновая помеха. При глубине моря более 1 км точность измерений определяется аппаратными шумами и точностью навигационных данных. Когда глубина моря составляет менее 1 км, основную роль играют МТ шум. При глубине моря менее нескольких десятков метров резко возрастает уровень волновой помехи. Основные виды шумов продемонстрированы на рис. 4, где приведена оценка спектральной плотности \sqrt{G} разности потенциалов ΔU , записанные на различных глубинах.

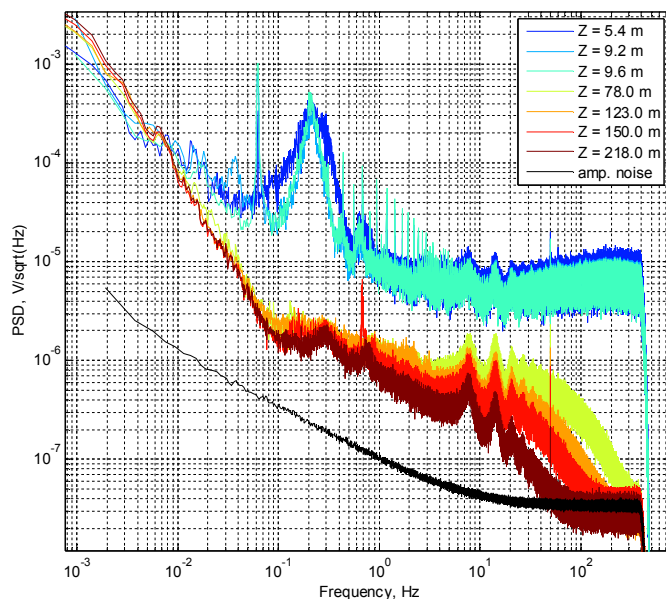


Рисунок 4. Спектральная плотность шума, записанного на различных глубинах.

На мелководье в диапазоне 0.1-1 Гц доминирует некогерентная составляющая, обусловленная волновой помехой. Выше и ниже этого диапазона доминирует когерентный МТ шум. Шумы аппаратуры и электродов существенно ниже внешних шумов во всём диапазоне глубин.

Была выполнена серия расчётов, в которых исследовались вероятностные свойства шума при разных глубинах моря (Маловичко, 2008). Эмпирическая гистограмма аппроксимировалась нормальным распределением. Для этого решалась задача максимального правдоподобия:

$$L(\mathbf{m}) = \rho(\chi^2(\mathbf{m})) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $L(\mathbf{m})$ - функция правдоподобия, $\mathbf{m} = \{E, \sigma\}$ - вектор параметров распределения (математическое ожидание и СКО), $\rho(\chi^2)$ - плотность распределения хи-квадрат. Оценки находили итерационно методом Ньютона-Рафсона. В глубоком море ($h > 500$ м) распределение шума приближается к нормальному, удовлетворяя формальным критериям согласия, таким как критерий хи-квадрат, при уровнях значимости $\alpha > 0.95$,

что согласуется с (Behrens, 2005). При малых глубинах моря закон распределения шума значительно отличается от нормального. Установлено, что отклонение формы распределения от нормального возникает не за счёт большого количества резко выделяющихся отсчётов, а из-за низкочастотных помех, которые приводят к сильной корреляции соседних отчётов. В результате робастные методы обработки зачастую не приводят к качественному улучшению результатов. В то же время высокий уровень внешних помех снижает требования к точности измерительной аппаратуры.

В разделе 3.2 исследуется шумовой порог, достижимый в результате обработки данных. Используя полученные в предыдущем разделе спектральные оценки, шумовой порог был оценен величиной $10^{-15} \text{ В}/(\text{Ам}^2)$ для глубин моря более 100 м (нормировано на длину приёмника и источника). Указано, что при глубинах менее 30-50 м фактический шумовой порог обычно составляет $10^{-13} \text{ В}/(\text{Ам}^2)$.

В разделе 3.3 описан алгоритм обработки первичных данных. Алгоритм включает вычисление амплитуд сигнала на нескольких фиксированных частотах по отрезкам исходного временного ряда, оценку ошибки, нормализацию на ток. Длина отрезков выбирается так, чтобы с учётом скорости судна она была равна длине питающей линии. На малых разносах длина отрезков уменьшается. Из каждого отрезка удаляется тренд. Перед выполнением дискретного преобразования Фурье (ДПФ) сигнал сворачивается с окном для уменьшения растекания спектра. Было выбрано 3-членное окно Блэкмана-Харриса (Harris, 1978), которое обеспечивает сильное подавление максимального бокового

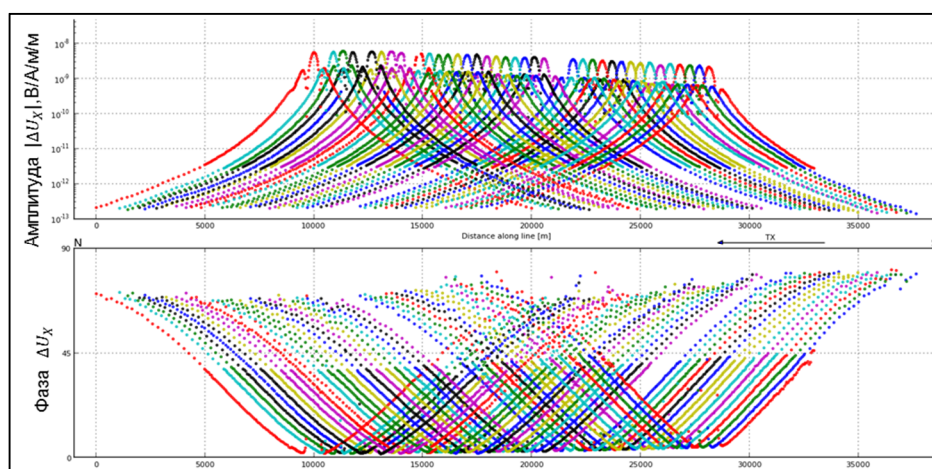


Рисунок 5. Обработанные кривые геометрических зондирований вдоль одного из профилей на частоте 0,0625 Гц (вал Шатского, Чёрное море).

лепестка(-67dB), приемлемую ширину главного лепестка (эффективная ширина 1,71), затухание уровня боковых лепестков (-6дБ/октава), а также простое замкнутое выражение для генерации его коэффициентов. Окно уменьшает влияние концевых интервалов на результаты оценивания, поэтому отрезки выбираются с перекрытием 50%. Для выбранного окна коэффициент корреляции при перекрытии 50% составляет 9,6%, поэтому результаты обработки соседних окон можно считать статистически независимыми. Для подавления выбросов к временному ряду итерационно применяются робастные веса. Для этого на каждой итерации вычисляется ДФП от взвешенного ряда:

$$y_w = \bar{y} + w \cdot (y - \bar{y}), \quad (2)$$

где y_w - взвешенный временной ряд, \bar{y} - сумма ряда Фурье, коэффициенты которого получены на предыдущей итерации, w - веса. Для генерации весов использованы идеи, развитые в работе (Chave and Thomson, 2004) применительно к обработке магнитотеллурических данных. На первом этапе итерационно вычисляются веса Хьюбера (Хьюбер, 1984) и параметр масштаба, что обеспечивает устойчивое определение стартового значения. На втором этапе параметр масштаба фиксируется и к невязке итерационно применяются режекторные веса.

Проблема оценки неопределённости результатов обработки осложнена существенной нестационарностью изучаемого процесса и наличием его единственной реализации. Рассмотрены различные подходы к решению этой задачи (Behrens, 2005; Zach and Frenkel, 2010; Myer et al., 2012; и др.). На основании анализа реальных данных делается вывод, что лучшее практическое решение основано на анализе распределения разности повторных наблюдений с учётом изменяющейся геометрии системы аналогично (Myer et al., 2012).

Разработанный алгоритм успешно использовался для обработки полевых данных, полученных в Каспийском и Чёрном морях в 2008-2011 гг. Типичный шумовой порог на частоте 0,0625 Гц составляет 10^{-13} В/(А · м²), что позволяет уверенно регистрировать сигнал до разносов 10 км (рис. 5).

Приведённые результаты и опыт практического использования разработанного графа показывают, что он эффективен для обработки сигналов мелководных геометрических зондирований и учитывает специфику данных, что доказывает **защищаемое положение 2**.

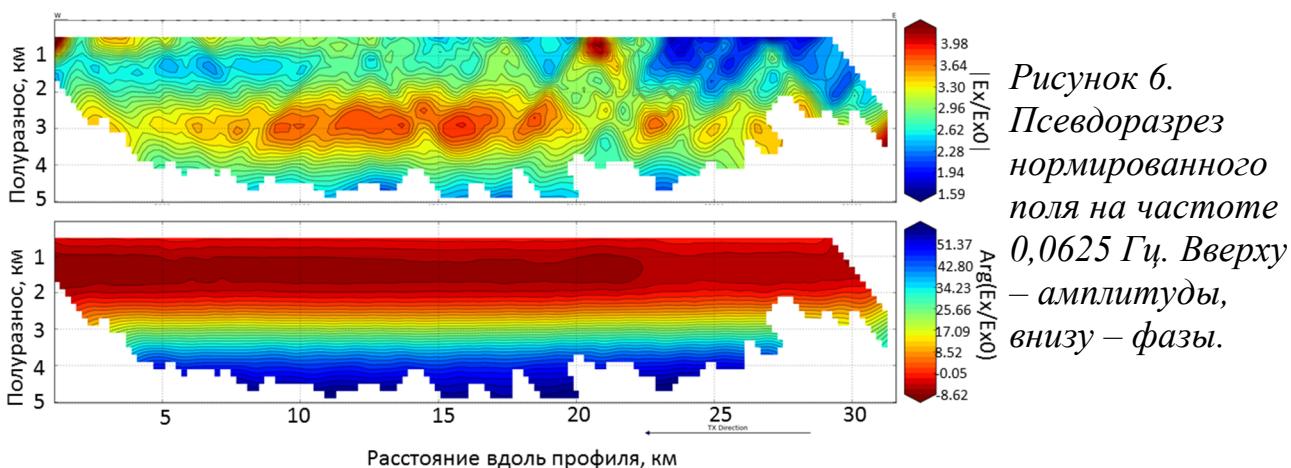
Глава 4 посвящена изучению возможности метода для решения практических нефтегазопоисковых задач на примере тестовых работ, выполненных на месторождении им. В. Филановского (Каспийское море). В **разделе 4.1** приведено физико-географическое описание объекта. Месторождение представляет собой складку размерами 40x4 км (Бочкарёв и др., 2010). MZ-KZ осадочный чехол сложен преимущественно терригенно-осадочными породами за исключением толщи эоцен-верхнемеловых ($K_1 - P_2$) карбонатов мощностью ок. 300 м. УЭС по разрезу составляет в среднем 1-3 Омм, повышаясь в $K_1 - P_2$ карбонатах до 5 Омм. Из четырёх залежей УВ на каротаже ясно проявлена наиболее крупная газонефтяная залежь в породах неокома, фиксируемая скачками УЭС до 100-200 Омм. Глубина воды на участке составила от 6 до 16 м.

В **разделе 4.2** приводится описание методики и аппаратуры выполнения работ. Глубина воды на участке составила от 6 до 16 м. Длина профиля - 26,5 км, общее количество точек, на которых были записаны кондиционные данные – 62.

В **разделе 4.3** анализируются первичные данные и описываются процедуры обработки. Обработка выполнена на пяти частотах – 1/16Гц, 3/16Гц, 5/16Гц, 7/16Гц и 9/16 Гц. Основным источником шума на частотах 3/16, 5/16 Гц и 7/16 служила волновая помеха. Точки с высоким уровнем помех удалены вручную. МТ помеха также заметно проявлена в данных. Систематические ошибки в измерения на малых разносах внесены ошибками в геометрии системы, поэтому из данных были удалены точки на разносах менее 2 км (на рис. 6).

В **разделе 4.4** рассмотрено построение опорной геоэлектрической модели по данным электрического каротажа. Разрез был разделён на 7 укрупнённых геоэлектрических слоёв, УЭС которых задавалась на основании эффективного продольного сопротивления (Хмелевской, 1970) $\rho_l = H/S$, где H – суммарная мощность интервала, S – поперечная проводимость интервала.

В **разделе 4.5** рассматривается 1D инверсия, выполненная в пакете CGG CSEM SUITE (реализация-F.Miorelli) методом сопряжённых градиентов с выбором шага, предобуславливанием и адаптивной регуляризацией на основе идей, изложенных в (Rodi and Mackie, 2001). Финальные модели уверенно отражают лишь верхнюю часть разреза. Ниже глубины 1 км теряется преобладание УЭС на соседних пикетах.



В разделе 4.6 рассматривается вид целевой функции, использованной при инверсии и другие настройки пакета Otze (см. выше). Решение регуляризованной 2,5D обратной задачи (Тихонов и Арсенин, 1979) выполнялось итеративно методом наискорейшего спуска с адаптивной регуляризацией. В стабилизатор закладывались требования горизонтальной и вертикальной гладкости, близости к стартовой модели, а также линии разрыва этих требований вдоль некоторых границ.

В разделе 4.7 приведены результаты 2D инверсии. В результате сглаживающей инверсии, стартующей с однородного полупространства с УЭС 2 Ом (Оккамовская инверсия), получена модель, хорошо соответствует общим геологическим представлениям (рис.7).

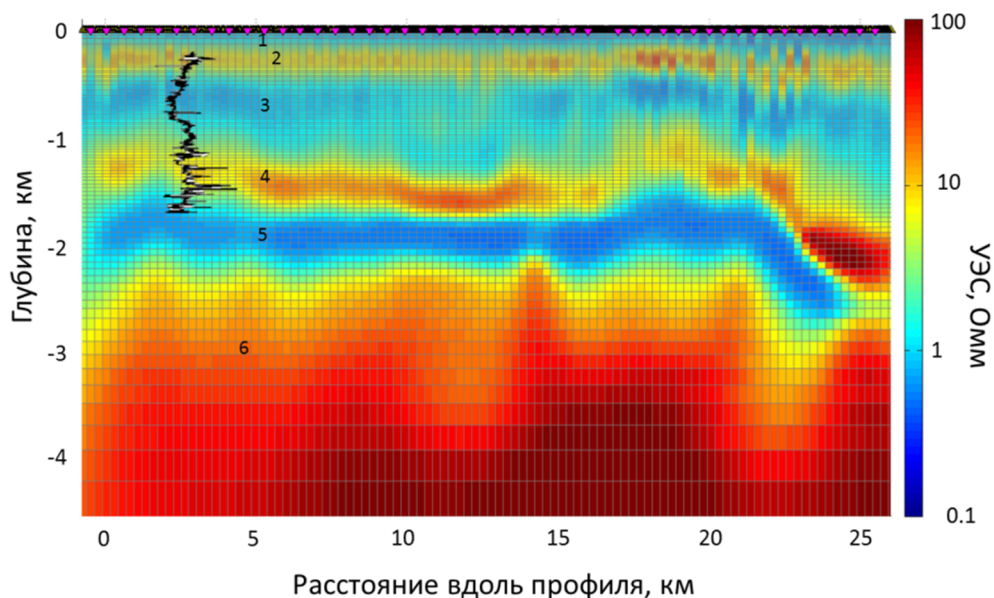


Рисунок 7. Модель электропроводности участка работ вдоль профиля, полученная в результате свободной Оккамовской инверсии. Цифры – комплексы пород, выделенные в результате интерпретации. А и Б – локальные аномалии.

В диапазоне глубин 1-2 км существуют два потенциальных источника повышенного УЭС: $K_1 - P_2$ карбонаты и залежь неокомовского возраста, а профиль целиком находится в контуре залежи, поэтому связь слоя 4 с неокомовской залежью не может быть однозначно доказана в рамках Оккамской инверсии. Вместе с тем, в отсутствии других источников высокого УЭС (карбонатов, солей и т.п.) повышение УЭС служит прямым индикатором УВ.

Для устранения этой неопределённости была выполнена инверсия с использованием априорной информации в стартовой модели: границ слоёв опорной геоэлектрической модели и электрического каротажа. Эта процедура условно названа «калибровкой» инверсии. Модель, полученная в результате 2D инверсии с априорной информацией (рис.8) уверенно сопоставляет высокоомный слой с продуктивным интервалом.

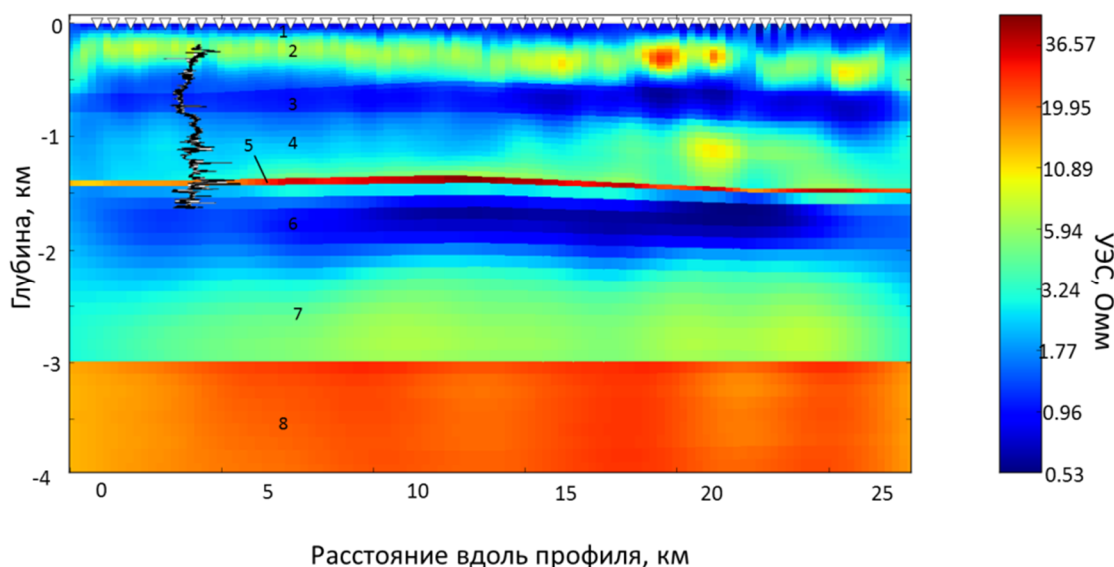


Рисунок 8. Модель электропроводности участка работ вдоль профиля, полученная с учётом границ слоёв и каротажной диаграммы. Цифры – комплексы пород, выделенные в результате интерпретации. А и Б – локальные аномалии.

Карбонаты $K_1 - P_2$ также фиксируются некоторым повышением УЭС. В результате «калибровки» была устранена неоднозначность интерпретации, неразрешимая в рамках Оккамской инверсии и продуктивный слой был выделен на фоне вышележащих $K_1 - P_2$ карбонатов. Дополнительная информация, внесённая электромагнитными данными, состоит в том, что было получено распределение УЭС вдоль

всего профиля, в то время как для калибровки использовался каротаж УЭС на одном пикете.

Приведённые результаты демонстрируют, что расчленение комплексов горных пород и, в некоторых случаях, оценка типа флюидонасыщения, может быть выполнена на основании модели электропроводности, построенной по данным мелководных геометрических зондирований, что доказывает **защищаемое положение 3**.

Заключение

В работе рассмотрены геометрические зондирования в мелководной зоне. Показано, что малая глубина воды накладывает ряд ограничений на параметры измерений, ухудшает разрешающую способность измерений и приводит к высокому уровню шумов. Тем не менее, метод может с успехом применяться для выявления скоплений УВ на мелководном шельфе. Геометрические зондирования эффективны для изучения терригенно-осадочных комплексов с относительно крупными объектами поиска. Изучение спектральных и вероятностных свойств шума позволило создать граф обработки полевых данных, который был с успехом использован для обработки материалов, полученных на акваториях Чёрного и Каспийского морей в 2008-2011 гг. На примере месторождения им. В.Филановского продемонстрированы основные приёмы интерпретации геометрических зондирований. Показано, что метод позволяет строить модели электропроводности в мелководных акваториях, на основании значений электропроводности выделять комплексы горных пород и, в рамках комплексной интерпретации, прогнозировать наличие скоплений УВ в целевых интервалах.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Патенты:

1. Method for marine electrical survey of oil-and-gas deposits: patent USA 8076942 / E.D. Lisitsyn, A.V. Tulupov, V.E. Kyasper, **M.S. Malovichko**, A.A. Petrov.- application no.201000226205; US classification:324/365, 324/362, 324/357; international classification: G01V3/02;publication date: 09.09.2010; issue date 13.12.2011.

Публикации из списка ВАК:

2. А.А. Петров, **М.С. Маловичко**, А.Б. Кочеров, Е.Д. Лисицын. Опыт применения электромагнитных зондирований при поисках

углеводородов в транзитной зоне каспийского моря//Геофизика.-2010.-№ 2.-с.60-64.

3. **М.С. Маловичко.** Сравнение статистических свойств устанавливаемых электрических полей при морских измерениях// Геофизика.-2008.-№5.-с.59-64.
4. Н.Ю. Бобров, А.Б. Кочеров, **М.С. Маловичко**, А.А. Петров, М.Б. Сергеев. Морские электромагнитные зондирования с донными станциями на шельфе Черного моря // Геофизика.-2013.- №4.-с.2-9.

Доклады:

5. **М.С. Маловичко**, «Применение донных измерительных систем при электромагнитных зондированиях транзитной зоны» // Геофизические методы исследования Земли и её недр: Материалы VII Международной научно-практической конкурс-конференции «Геофизика-2009.-ISBN 978-5-98340-249-2.-СПБ.: Соло,2010.-146 с.
6. **М.С. Маловичко**, Н.Ю. Бобров, А.А. Петров, А.Б. Кочеров, А.В. Студитская. Электромагнитные зондирования с контролируемым источником для поисков углеводородов на мелководном шельфе // Материалы V всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли «ЕМЗ-2011»: в 2-х книгах: Книга 2.-ISBN 978-5-98340-255-3.-СПБ.: СПбГУ, 2011.-495 с.
7. **М.С. Маловичко.** Применение современных электроразведочных методов при поисках месторождений углеводородного сырья в условиях континентального шельфа // 8-й Международный геофизический научно-практический семинар «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» в Санкт-Петербургском Горном Институте 8-10 апреля 2010 г., г. Санкт-Петербург.
8. Е.Д. Лисицын, **М.С. Маловичко**, А.А. Петров. Электромагнитные зондирования в зоне предельного мелководья //Материалы IV всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли «ЕМЗ-2009».- ISBN 978-5-91682-2.-М.:ИФЗ РАН, 2009.-215 с.
9. **M.S. Malovichko.** Comparison of statistical characteristics of marine-measured transient fields // 7th International conference “Problems of Geocosmos”.-St.-Petersburg, Petrodvorets, 26-30 May 2008.