МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Епишкин Дмитрий Викторович

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СИНХРОННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2018

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

Научный руководитель ***Яковлев Андрей Георгиевич***
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты ***Поспеев Александр Валентинович***
доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБУН Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Лаборатория геологии нефти и газа, ведущий научный сотрудник

Рыбин Анатолий Кузьмич
доктор физико-математических наук, ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке, директор

Файнберг Эдуард Борисович
доктор физико-математических наук, профессор, Центр геоэлектромагнитных исследований ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН», заместитель директора

Защита диссертации состоится «16» мая 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 1, ГЗ МГУ, геологический факультет, ауд. 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: http://istina.msu.ru/dissertations/98893390/

Автореферат разослан «___» апреля 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, д. ф.-м. н., доц. В. А. Шевнин

Общая характеристика работы

Актуальность

Метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ) активно используется при решении множества различных геологических задач. Его популярность обусловлена высокой информативностью, относительной дешевизной, развитым аппаратом анализа и интерпретации. При этом метод МТЗ является экологически чистым методом, использующим естественное электромагнитное поле Земли в качестве источника. С каждым годом геологические задачи, для решения которых используется метод МТЗ, становятся всё сложнее. Соответственно повышаются и требования к точности получаемых данных. Таким образом, создание алгоритмов обработки, устойчивых к различным шумам, было и остаётся чрезвычайно важной задачей. В том числе важно развивать алгоритмы обработки с использованием синхронных наблюдений (метод удалённой базы).

На сегодняшний день при выполнении масштабных проектов методом МТЗ требуется оперативно обрабатывать большие объёмы синхронных данных. Необходимо вырабатывать новые подходы к работе с этими данными, развивать инструментарий.

Степень разработанности проблемы

Начиная с 50-х годов происходило становление метода МТЗ, развивалась теория обработки и интерпретации магнитотеллурических (МТ) данных. На первых этапах (50-е – 60-е годы) обработка производилась вручную. С развитием цифровой техники появилась возможность создания компьютерных алгоритмов обработки, основанных на спектральном анализе и узкополосной фильтрации. Первые компьютерные системы обработки МТ-данных появились в начале 70-х годов. Значения передаточных функций на отдельных частотах получались путём решения переопределённых систем методом наименьших квадратов. Однако такие алгоритмы давали неудовлетворительный результат при наличии сильно зашумлённых участков записи. В начале 1980-х годов в ходе попыток улучшить качество обработки был разработан и опробован метод удалённой базы, получивший в отечественной литературе название «схема Гэмбла - Безрука». Во второй половине 1980-х годов начали бурно развиваться робастные, устойчивые к шумам методы обработки. Метод удалённой базы в сочетании с робастными статистическими процедурами получил широкое распространение и в разных модификациях успешно применяется по настоящее время.

Начиная с 1980-х годов опубликовано большое количество работ, посвящённых вопросам обработки МТ-данных. Однако, несмотря на это, до сих пор существует ряд направлений, в которых требуется проведение дальнейших исследований. Необходимо развивать алгоритмы обработки устойчивые к сильным, изменяющимся по уровню с течением времени шумам. Отдельного внимания требуют вопросы, связанные с использованием удалённых баз при обработке магнитотеллурических и магнитовариационных данных. Также актуальной проблемой является адаптация существующих алгоритмов обработки к различным модификациям методов электроразведки, использующих естественное электромагнитное поле Земли.

Цели и задачи

Целью работы является развитие методов анализа и обработки больших массивов синхронных магнитотеллурических данных и изучение возможностей и пространственных ограничений метода удалённой базы.
Задачами исследования являются:

1) Изучение существующих алгоритмов обработки МТ-данных. Оценка положительных и отрицательных сторон этих алгоритмов.
2) Разработка алгоритма обработки МТ-данных. Включение в алгоритм как проверенных существующих, так и новых процедур.
3) Тестирование разработанного алгоритма обработки на синтетических и на экспериментальных данных.
4) Создание алгоритма обработки данных МТЗ, получаемых на мелководье по новой предлагаемой технологии
5) Оценка эффективности метода удалённой базы в разных широтах и на разных расстояниях при измерениях в разных частотных диапазонах
6) Развитие инструментария анализа и обработки больших массивов МТ-данных.

Научная новизна

Автором созданы новые процедуры определения весовых коэффициентов спектральных оценок, предложен способ одновременного использования электрического и магнитного поля удалённой базы, что позволяет в ряде случаев эффективнее бороться с шумами. Тщательно изучены возможности и ограничения метода удалённой базы при работе в разных широтах. Выявлены особенности поведения МТ полей в разных частотных диапазонах. Предложена новая система тестирования алгоритмов обработки МТ-данных на основе синтетических данных. Разработана

технология проведения МТЗ на мелководье и создан алгоритм обработки магнитотеллурических данных применительно к данной технологии.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в повышении качества результатов, получаемых при анализе и обработке МТ-данных, и, следовательно, увеличении достоверности итоговой геологической информации. Благодаря созданию ряда дополнительных инструментов для анализа данных стало возможно более эффективно осуществлять обработку больших массивов синхронных данных.

Новая технология проведения МТЗ на мелководье также имеет большое практическое значение и открывает новые возможности при изучении шельфовых зон.

Оценены границы применимости метода удалённой базы, доказана возможность использования стационарных удалённых баз в средних широтах на больших расстояниях (до 1000 километров) в широком диапазоне частот (от 300 Гц до 0.001 Гц).

Методология и методы исследования

При реализации описываемых в работе алгоритмов и ряда вспомогательных программ использовались среды программирования Visual Studio 2015 и Matlab. При тестировании алгоритмов использовались данные, полученные с помощью аппаратуры Phoenix Geophysics, МЭРИ ПРО, МЭРИ АКВА, LEMI, Metronix. Опробование на реальных данных активно проводилось ООО «Северо-Запад» в течении 2015-2017 годов. На этапе разработки технологии проведения МТЗ на мелководье было выполнено численное моделирование в программе NWMT2D (А.Е. Каминский).

Защищаемые положения

1) Применение перекрёстного взвешивания, индивидуальных процедур расчёта весов при оценивании различных передаточных функций, а также использование как электрического, так и магнитного поля удалённой базы при проведении спектрально-статистической обработки МТ-данных позволяет эффективно оценивать полный набор передаточных функций в присутствии электромагнитных шумов различного типа
2) При обработке магнитотеллурических данных в диапазоне частот от 1 кГц до 1 Гц (поле грозовой природы) эффективно использование удалённых баз, расположенных на расстояниях до 2-4 тысяч километров в пределах одного полушария (северного или южного).

В диапазоне частот от 1 Гц до 0.001 Гц (поле магнитосферно-ионосферной природы) использование удалённых баз возможно на расстояниях до 1-2 тысяч километров в умеренных и экваториальных широтах, в полярных широтах это расстояние уменьшается до первых сотен километров

3) Предложенный в работе алгоритм обработки позволяет получать качественные результаты при морских магнитотеллурических зондированиях на мелководье

Степень достоверности и апробации

Все представленные в работе результаты основаны на большом объёме экспериментальных данных, полученных с помощью современного высокоточного сертифицированного геофизического оборудования. Полученные результаты не противоречат данным, представленным в независимых источниках по данной тематике. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных конференциях и семинарах. По тематике диссертации автор имеет 5 работ в реферируемых журналах, включённых в список ВАК.

Структура работы

Диссертация содержит список сокращений, введение, пять глав, заключение, список литературы из 96 наименований, состоит из 133 страниц текста и 90 иллюстраций.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н., доценту Яковлеву Андрею Георгиевичу за научное руководство, помощь в написании работы и предоставленную возможность участвовать в многочисленных геофизических проектах и полевых работах. Автор глубоко признателен к.ф.-м.н. Алексееву Дмитрию Александровичу за помощь на первых этапах разработки алгоритма обработки МТ-данных, Алексановой Елене Дмитриевне, к.г.-м.н. Пальшину Николаю Алексеевичу, к.ф.-м.н Соколовой Елене Юрьевне за консультации, обсуждения и помощь в написании работы, Зорину Никите Игоревичу за полезные советы по оформлению. Также автор выражает благодарность коллективу кафедры геофизических методов исследования земной коры за ценные замечания и пожелания по содержанию и оформлению работы. Автор благодарит Яковлева Дениса Васильевича и Андреева Михаила Александровича за плодотворную совместную работу при разработке программного комплекса EPI-KIT.

Основное содержание работы

Введение

Во введении изложены актуальность, цели, задачи, научная новизна и практическая значимость диссертации, освещена краткая история развития и разработанность проблемы, описаны используемые методы исследования и сформулированы основные защищаемые положения.

Глава 1. Основные подходы к оцениванию передаточных функций (обзор)

Целью обработки МТ-данных является получение передаточных операторов (функций), связывающих компоненты МТ-поля в частотной области. Горизонтальные компоненты электрического и магнитного поля в точке наблюдения связаны следующим соотношением:

$$\begin{cases} E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega) \cdot H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega) \cdot H_y(\omega) \\ E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega) \cdot H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega) \cdot H_y(\omega) \end{cases}, \quad (1)$$

Здесь ω – частота (далее мы будем опускать этот символ, помня о том, что все выкладки происходят в частотной области), E_x, E_y, H_x, H_y– спектры соответствующих компонент поля на данной частоте, величины Z_{ij} представляют собой компоненты тензора импеданса.

Другими важными операторами являются матрица Визе-Паркинсона (W), теллурический тензор (T), горизонтальный магнитный тензор (M):

$$H_z = W_{zx}H_x + W_{zy}H_y, \quad (2)$$

$$\begin{cases} E_x = E_x^R\, T_{xx} + E_y^R\, T_{xy} \\ E_y = E_x^R\, T_{yx} + E_y^R\, T_{yy} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_x = H_x^R\, M_{xx} + H_y^R\, M_{xy} \\ H_y = H_x^R\, M_{xy} + H_y^R\, M_{yy} \end{cases}, \quad (4)$$

где верхний индекс R обозначает, что компонента поля измерена в некоторой базовой точке.

Получение спектральных оценок

Для получения частотных характеристик передаточных операторов, необходимо перейти от записей временных рядов компонент поля к их спектрам, то есть вычислить преобразование Фурье.

Существует ряд возможных подходов к спектральному анализу. Одним из широко распространённых, и в том числе рассматриваемым в работе является метод WOSA (Welch Overlapped Section Averaging). Суть метода

заключается в вычислении оконного преобразования Фурье в скользящем окне определённой формы и последующем осреднении получаемых результатов.

Под оконным преобразованием Фурье понимают интеграл вида

$$S_x(\tau,\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} X(t)W(t-\tau)e^{-i\omega t}dt\ , \qquad (5)$$

где W- оконная функция, равная нулю (или имеющая малые значения) вне некоторого временного отрезка. Поскольку некоторый отрезок записи представляет собой не весь исследуемый сигнал, а лишь отдельную его реализацию, то результатом оконного преобразования Фурье является не спектр исходного сигнала, а спектр произведения сигнала и оконной функции. Для расчета преобразования (5) используют алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ).

<u>Оценивание компонент тензора импеданса</u>

Поскольку результаты измерения любых физических величин содержат шумы, то для надежной оценки искомых передаточных функций необходимо использовать результаты нескольких (как можно большего числа) независимых измерений и решать получившуюся переопределённую систему тем или иным способом.

Пусть на каждой частоте мы имеем N независимых записей (сегментов одной записи) и соответствующих спектральных оценок E_x^i, E_y^i, H_x^i, H_y^i. Тогда, применяя метод наименьших квадратов (МНК) для системы (1), получаем следующую вариационную задачу:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N}\left(E_x^i - Z_{xx}\,H_x^i - Z_{xy}\,H_y^i\right)\cdot\left(E_x^{i\,*} - Z_{xx}{}^*\,H_x^{i\,*} - Z_{xy}{}^*\,H_y^{i\,*}\right) = min \\ \sum_{i=1}^{N}\left(E_y^i - Z_{yx}\,H_x^i - Z_{yx}\,H_y^i\right)\cdot\left(E_y^{i\,*} - Z_{yx}{}^*\,H_x^{i\,*} - Z_{yy}{}^*\,H_y^{i\,*}\right) = min \end{cases}, \quad (6)$$

где * - комплексное сопряжение.

Решение данной системы в матричном виде записано ниже:

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E_x H_x{}^*} & \overline{E_x H_y{}^*} \\ \overline{E_y H_x{}^*} & \overline{E_y H_y{}^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{H_x H_x{}^*} & \overline{H_x H_y{}^*} \\ \overline{H_y H_x{}^*} & \overline{H_y H_y{}^*} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (7)$$

где верхнее подчёркивание означает алгебраическую сумму по всем i.

Из построения системы (6) видно, что при нахождении Z_{xx} и Z_{xy} минимизируется невязка, обусловленная присутствием шумов в компоненте

E_x, а при нахождении Z_{yx} и Z_{yy} – невязка, обусловленная присутствием шумов в компоненте E_y. Можно решать и другую вариационную задачу, минимизируя влияние шумов в других компонентах электромагнитного поля. Например, если переписать первое уравнение из (6) в виде:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{E_x^i}{Z_{xx}} - H_x^i - \frac{Z_{xy}}{Z_{xx}}H_y^i\right)\cdot\left(\frac{E_x^{i\,*}}{Z_{xx}^{\,*}} - H_x^{i\,*} - \frac{Z_{xy}^{\,*}}{Z_{xx}^{\,*}}\,H_x^{i\,*}\right) = min\ , (8)$$

то мы получим решение, отвечающее минимальной ошибке в компонентах Z_{xx} и Z_{xy} по причине шумов в компоненте H_x. Аналогично, минимизируя ошибку в компонентах Z_{yx} и Z_{yy} по причине шумов в компоненте H_y, можно переписать и второе уравнение системы. Решая образованную таким образом систему, получаем ответ:

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E_xE_x^{\,*}} & \overline{E_xE_y^{\,*}} \\ \overline{E_yE_x^{\,*}} & \overline{E_yE_y^{\,*}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \overline{H_xE_x^{\,*}} & \overline{H_xE_y^{\,*}} \\ \overline{H_yE_x^{\,*}} & \overline{H_yE_y^{\,*}} \end{bmatrix}^{-1} \qquad (9)$$

В связи с тем, что в большинстве случаев электрическое поле бывает зашумлено сильнее магнитного, данная оценка оказывается менее надёжной, чем (7) Однако в ряде случаев она может оказаться полезной.

<u>Робастные М-оценки</u>

Метод наименьших квадратов оказывается устойчив в случае нормально распределённого шума. Если же в данных отдельные оценки выбиваются из нормального распределения, то решение становится смещённым. Метод М-оценок решает данную проблему путём минимизации суммы менее быстро возрастающих функций остатков вместо минимизации суммы квадратов:

$$\sum_{i=1}^{N}\chi(r_i) = \sum_{i=1}^{N}\chi\left(E_x^i - Z_{xx}\,H_x^i - Z_{xy}\,H_y^i\right) = \min\ . \qquad (10)$$

Здесь $\chi(t)$ называется *функцией потерь* и выбирается таким образом, чтобы *функция влияния* $\psi(t) = \frac{d\chi(t)}{dt}$ была непрерывна и ограничена. В результате получается следующая система уравнений:

$$\sum_{i=1}^{N}\psi(r_i) = \sum_{i=1}^{N}\psi\left(E_x^i - Z_{xx}\,H_x^i - Z_{xy}\,H_y^i\right)H_k^i = 0\,, \quad k = x, y\ . \quad (11)$$

В качестве функции потерь может использоваться выпуклая неотрицательная функция с минимумом в точке t=0. Например:

$$\chi(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2 |t| < t_0 \\ t_0|t| - \frac{1}{2}t_0^2 |t| \geq t_0 \end{cases}, \qquad (12)$$

где t_0 – настраиваемая константа.

М-оценка может быть получена путём итерационного решения системы методом взвешенных наименьших квадратов. В качестве начального приближения выбирается решение, полученное с помощью классического МНК с единичными весами. Затем вычисляются невязки, определяется масштабный коэффициент, и строятся новые веса, с которыми система решается ещё раз. Новая оценка тензора импеданса используется для вычисления новых остатков. Процесс повторяется до сходимости.

<u>Отбраковка по когерентности</u>

Одним из критериев отбраковки спектральных оценок, отвечающих сильно зашумленным участкам записи, является уровень когерентности - мера линейной связи нескольких случайных величин.

Значение когерентности может варьироваться в диапазоне от 0 до 1. Близость значений коэффициентов когерентности к единице означает, что изучаемая система близка к линейной, а входные и выходные сигналы не искажены влиянием шумов. Напротив, малые значения коэффициентов когерентности указывают на присутствие шумов во входных и/или выходных сигналах и/или нелинейность самой системы.

Коэффициенты когерентности (или их трансформанты) могут выступать в роли весов при расчете спектральных плотностей.

<u>Метод удалённой базы</u>

При определении $[\boldsymbol{Z}]$ из уравнений (7) или (9), результаты получаются статистически несмещенными только в том случае, когда магнитное поле не содержит помех. Если же помехи в магнитном поле присутствуют, то при вычислении авто- спектров будут получаться завышенные значения.

Одним из способов борьбы с данной проблемой является метод удалённой базы - использование коррелируемых временных рядов, получаемых на некотором расстоянии от точки наблюдения.

В классическом случае обработки с удаленной базой импеданс оценивается как

$$\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E_x H_x^{R^*}} & \overline{E_x H_y^{R^*}} \\ \overline{E_y H_x^{R^*}} & \overline{E_y H_y^{R^*}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{H_x H_x^{R^*}} & \overline{H_x H_y^{R^*}} \\ \overline{H_y H_x{}^*} & \overline{H_y H_y^{R^*}} \end{bmatrix}^{-1}, \qquad (13)$$

где H_y^R и H_y^R – горизонтальные компоненты поля, измеренные на удаленной базе. Кросс- и авто- спектры могут быть найдены как в рамках классического метода наименьших квадратов, так и с использованием рассмотренных выше робастных М-оценок.

Глава 2. Особенности предлагаемого алгоритма обработки

Предлагаемый в работе алгоритм включает в себя как хорошо известные статистические процедуры, так и ряд новых процедур, разработанных автором с целью лучшего подавления помех, свойственных магнитотеллурическим записям.

На первом этапе выполняется предобработка, целью которой является подготовка исходных временных рядов к спектральному анализу. Проводится удаление сильных импульсных помех, не коррелируемых по разным компонентам поля, удаление ступеней, фильтрация промышленных частот (50 или 60 Гц с кратными частотами).

Далее выполняется преобразование Фурье в скользящих окнах разной длины, рассчитываются массивы спектральных оценок. Для каждой используемой при спектральном анализе длины окна выбирается шаг его движения. Окно движется по временному ряду и для каждого его положения, выполняется умножение на оконную функцию и производится преобразование Фурье. Использование оконной функции уменьшает эффект рассеивания спектральной энергии на соседние частоты.

Далее для расчёта интересующих нас передаточных функций используются методы линейной регрессии с применением робастных статистик и метода удалённой базы. Обработка ведётся независимо на каждой частоте.

<u>Перекрёстные М-оценки</u>

Одной из новых, предлагаемых автором процедур, являются перекрёстные М-оценки, особенность которых заключается в параллельном итерационном решении двух систем:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} w_i{}^1 \, (Ex_i - ZxxHx_i - ZxyHy_i)^2 = min \\ \sum_{i=1}^{N} w_i{}^1 \, (Ey_i - ZyxHx_i - ZyyHy_i)^2 = min \end{cases} \qquad (14)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} {w_i}^2 \left(\frac{E_x^i}{Z_{xx}} - H_x^i - \frac{Z_{xy}}{Z_{xx}} H_y^i \right)^2 = min \\ \sum_{i=1}^{N} {w_i}^2 \left(\frac{E_y^i}{Z_{yy}} - H_y^i - \frac{Z_{yx}}{Z_{yy}} H_x^i \right)^2 = min \end{cases} \quad (15)$$

На первом шаге веса ${w_i}^1$ и ${w_i}^2$ принимаются равными 1. После каждого решения систем для каждого набора спектральных оценок i вычисляются невязки и по ним определяются новые веса $w = {w_i}^1 {w_i}^2$, которые используются на следующей итерации.

<u>Использование электрических каналов удалённой базы</u>

Следующей особенностью является возможность использования электрических каналов удаленной базы одновременно с магнитными.

Пусть мы имеем N спектральных оценок каждой компоненты поля. ${E_x}^i, {E_y}^i, {H_x}^i, {H_y}^i$ - магнитные и электрические компоненты в точке наблюдения, а $E_x^{R^i}, E_y^{R^i}, H_x^{R^i}, H_y^{R^i}$ - магнитные и электрические компоненты в базовой точке и $i = \overline{1, N}$

На первом шаге проводится классическая обработка с удаленной базой (уравнение 13). Причём каждый элемент матриц в правой части уравнения получается путём осреднения попарных произведений спектральных оценок с использованием весов ${w_i}^a$, полученных при использовании робастных процедур:

$$\overline{AB^*} = \sum_{i=1}^{N} {w_i}^a A_i B_i^* \ . \quad (16)$$

Далее используются удаленные электрические каналы для подавления шума в локальных электрических каналах. Для этого рассчитывается теллурический тензор, связывающий электрическое поле в локальной и базовой точках:

$$\begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{E_x E_x^{R^*}} & \overline{E_x E_y^R} \\ \overline{E_y E_x^{R^*}} & \overline{E_y E_y^{R^*}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{E_x^R E_x^{R^*}} & \overline{E_x^R E_y^{R^*}} \\ \overline{E_y^R E_x^{R^*}} & \overline{E_y^R E_y^{R^*}} \end{bmatrix}^{-1} . \quad (17)$$

Полученные при этом веса ${w_i}^b$ используются для повторного расчёта авто- и кросс- спектров в уравнении (13) следующим образом:

$$\overline{AB^*} = \sum_{i=1}^{N} {w_i}^a \, w_i^b \, A_i B_i^* \, . \qquad (18)$$

Данная процедура повторяется несколько раз до сходимости. С каждым разом веса ${w_i}^a$ и ${w_i}^b$ уточняются. Далее эти веса используются для финального расчёта тензора импеданса.

Описанный подход хорошо работает по причине локальности электрических шумов. Шум в электрических каналах может присутствовать одновременно на базовой и локальной точке, но он редко коррелирует на этих точках. Таким образом мы легко можем его обнаружить и убрать, сделав веса ${w_i}^b$ зашумленных оценок маленькими.

Специфика процедур оценивания различных передаточных функций

Разработанный алгоритм можно применять к расчету всех основных передаточных функций: тензора импеданса, матрицы Визе-Паркинсона (типпера), теллурического и магнитного тензоров. В каждом случае весовые функции подбираются так, чтобы обеспечить максимальное подавление шума в соответствующих компонентах МТ-поля. Для каждой передаточной функции имеются свои особенности обработки о чём подробно написано в работе.

Так, например, при оценивании теллурического тензора для лучшего определения весовых функций дополнительно используются магнитные поля рядовой и базовой точки. При проведении опытных работ (Казахстан, 2014) было установлено, что включение в обработку магнитных каналов существенно улучшает качество оценивания.

Программный комплекс EPI-KIT

На основе реализованных автором алгоритмов был разработан программный комплекс, позволяющий оперативно анализировать и обрабатывать большие объёмы данных. Программа состоит из нескольких крупных модулей, сконцентрированных на решении отдельных задач, возникающих при работе с первичными МТ-данными (разнообразной информацией о записи, временными рядами, калибровками). Также имеется ряд дополнительных утилит, облегчающих работу оператора и обработчика МТЗ.

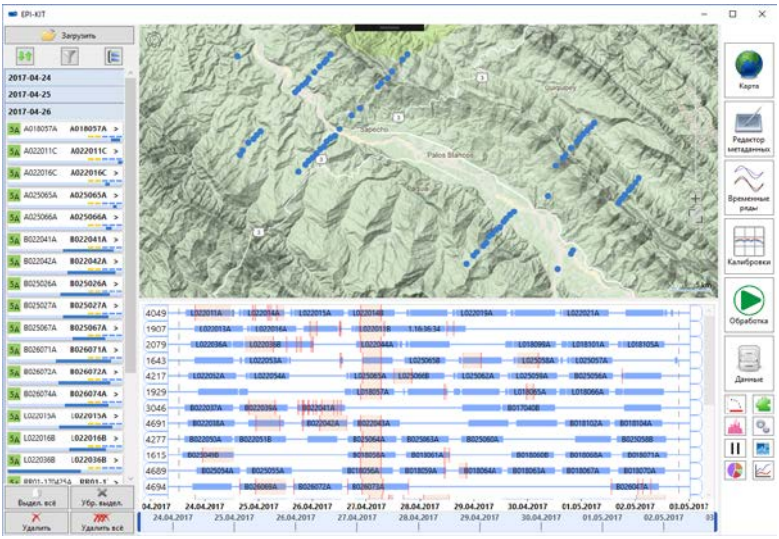

Рис. 1. Модуль «Карта» программы EPI-KIT

Глава 3. Тестирование разработанных алгоритмов на синтетических и экспериментальных данных

<u>Тестирование на синтетических данных</u>

Для оценки эффективности предлагаемых автором алгоритмов обработки были созданы наборы синтетических временных рядов. За основу бралось реально измеренное магнитное поле. Задавалась передаточная характеристика одного из типичных геоэлектрических разрезов. Электрическое поле вычислялось на основании магнитного.

Далее к полученным таким образом временным рядам добавлялся постоянный белый шум, случайные ступени, периодически возникающий белый шум и коррелируемая помеха. Затем проводилась обработка с применением различных алгоритмов и оценивалось качество результатов.

По результатам тестирования на синтетических данных были сделаны следующие выводы:

1. При наличии постоянного шума в электрических каналах наиболее эффективен метод наименьших квадратов. При наличии постоянного шума в магнитных каналах наиболее эффективна отбраковка по когерентности.
2. При наличии периодического шума в электрических каналах эффективны М-оценки. При наличии периодического шума в магнитных каналах при слабом зашумлении эффективны

перекрёстные М-оценки, при сильном зашумлении – отбраковка по когерентности.

3. Обработки с использованием удалённой базы улучшает качество обработки при условии низкого уровня шума в используемых полях на этой базе. Алгоритм Remote E+H показывает лучший результат в условиях помех одновременно в электрических и магнитных каналах.

<u>Тестирование на экспериментальных данных</u>

Описываемый в данной работе алгоритм использовался при обработке полевых данных в ряде крупных проектов, выполненных компанией ООО «Северо-Запад», и хорошо себя зарекомендовал. Алгоритм применялся в ходе региональных работ в Бразилии (2014 год), работ на региональном профиле 1-СБ (Россия, 2015 год), в нескольких проектах в Иране (2015 – 2016 год), при переобработке данных на региональном профиле 8-ДВ (Россия, 2016 год), в двух крупных проектах в Боливии (2017 год) и в некоторых других проектах.

Далее приводится сравнение результатов обработки в программах SSMT и EPI-KIT (одноточечная обработка) для одной из точек регионального профиля 8-ДВ. При использовании предлагаемого в работе алгоритма удаётся повысить качество получаемых частотных зависимостей (рис. 2).

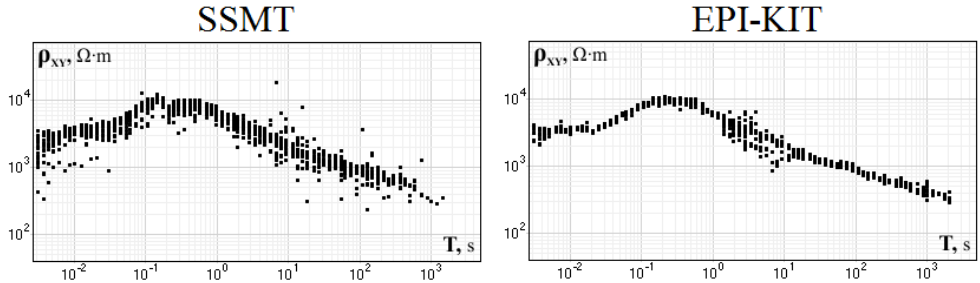

Рис. 2. Кажущееся сопротивление и фазы главных компонент тензора импеданса. Сравнение обработок в программах SSMT (алгоритм Remote H) и EPI-KIT (алгоритм Remote E+H)

Алгоритм Remote E+H оказывается эффективен при наличии в электрическом и магнитном поле шума разной природы. В подтверждение этого на рис. 3 приводятся сравнения обработок SSMT (алгоритм Remote H) и EPI-KIT (алгоритм Remote E+H).

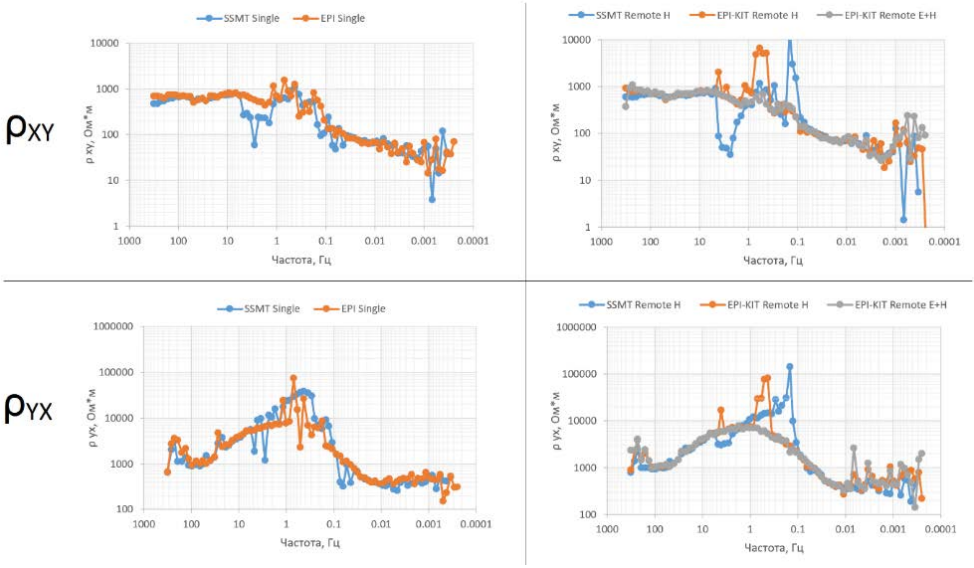

Рис. 3. Сравнение результатов обработки в программах SSMT и EPI-KIT. Профиль 8-ДВ, точка 5. Алгоритмы Single, Remote H, Remote E+H

Глава 4. Границы применимости метода удалённой базы

Применение метода удалённой базы возможно, когда поля в точке наблюдения и на удалённой базе линейно связаны, т.е. выполняются следующие соотношения:

$$\boldsymbol{E}^R(\omega) = [\boldsymbol{T}](\omega)\boldsymbol{E}(\omega) \quad (19)$$

$$\boldsymbol{H}^R(\omega) = [\boldsymbol{M}](\omega)\boldsymbol{H}(\omega) \quad (20)$$

где $[\boldsymbol{T}](\omega)$ – теллурический тензор, $[\boldsymbol{M}](\omega)$ – горизонтальный магнитный тензор.

Распространённым критерием линейной связи между полями является множественная когерентность, которая и используется в работе как основной параметр для анализа.

С увеличением расстояния между локальной и базовой точкой линейная связь между полями будет теряться и в какой-то момент станет настолько малой, что использование данной базы потеряет смысл.

Для определения расстояний, на которых присутствует линейная связь в области низких частот, (≈0.001 герц) были использованы синхронные временные ряды горизонтальных компонент магнитного поля для 115 обсерваторий сети «Intermagnet». Была рассчитана когерентность для

каждой пары обсерваторий. Длительность наблюдения полей составила 1 месяц. Результаты расчётов приведены на рис.4.

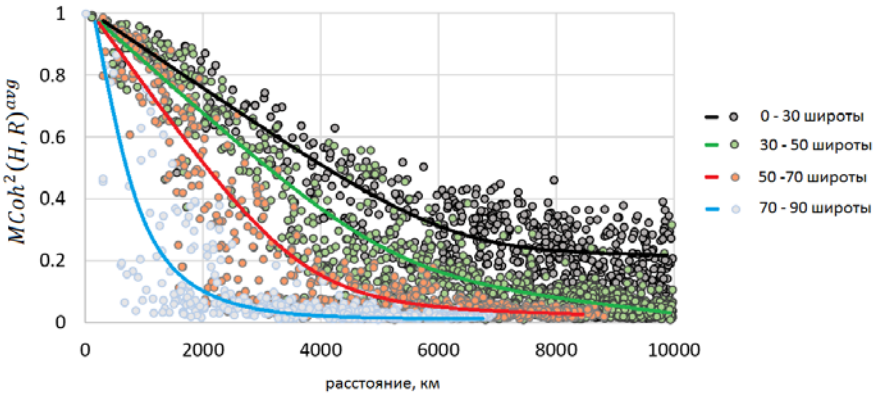

Рис. 4. Зависимость $MCoh^2(H,H^R)^{avg}$ от расстояния между точками наблюдения. 0.001 Гц.

При изучении пространственной когерентности МТ-полей в диапазоне частот от 0.001 до 300 Гц использовался большой объём полевого материала, полученного компанией «Северо-Запад» в период с 2000 по 2016 год (более 80 тысяч точек МТЗ и АМТЗ) (рис. 5).

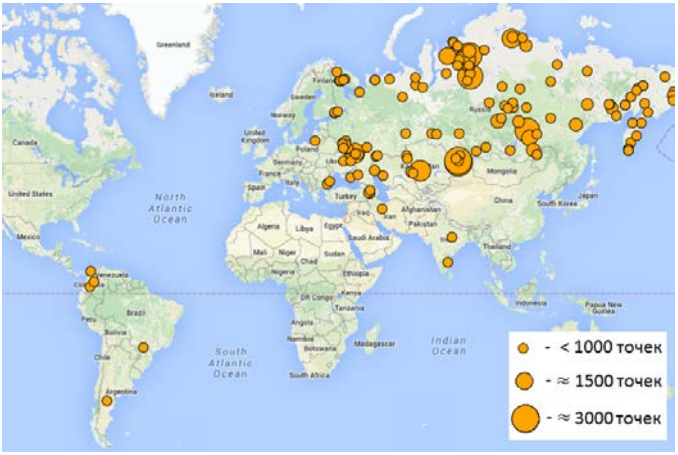

Рис. 5. Схема расположения точек МТЗ, выполненных компанией «Северо-Запад» с 2000 по 2016 годы

Расчеты, выполненные для трёх пар областей, измерения электромагнитных полей в которых выполнялись одновременно (Бразилия-Колумбия, Иран-Алтай и Восточный – Западный Таймыр), показали, что широтная зависимость наблюдается не только на низких, но и на высоких частотах из рассматриваемого диапазона. Однако на высоких частотах она обратная – в экваториальных широтах когерентность полей убывает быстрее, чем в умеренных и полярных (рис. 6).

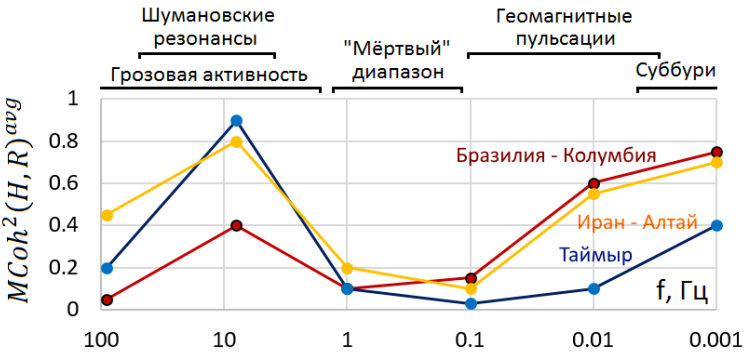

Рис. 6. Зависимость $MCoh^2(H,H^R)^{avg}$ от частоты для разных регионов

Большой объем экспериментальных данных, полученных на Таймыре, в Горном Алтае и Забайкалье, позволил провести детальный анализ для средних и высоких широт (рис. 7). При измерениях в приполярных широтах уже на расстояниях порядка 1000 километров пропадает линейная связь на частотах ниже 1 герца (значения когерентности менее 0.2). В умеренных и низких широтах линейная связь на этих же частотах сохраняется на расстоянии в несколько тысяч километров.

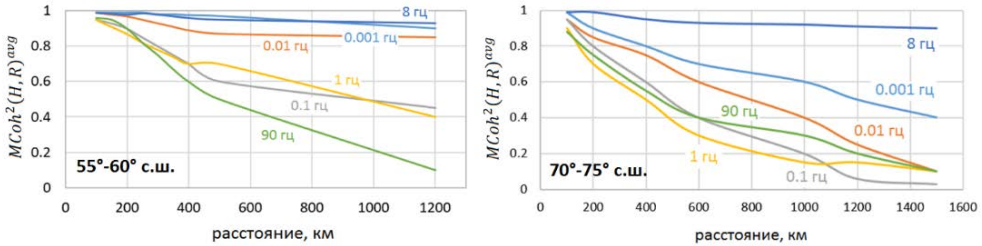

Рис. 7. Зависимость $MCoh^2(H,H^R)^{avg}$ от расстояния для разных частот в двух регионах

Для оценки применимости метода удалённой базы был введён специальный критерий. Результаты его расчёта для двух широтных диапазонов приведены на рис. 8. Значения большие или близкие к 1 говорят о возможности применения удалённых баз на данном расстоянии. Из полученных зависимостей понятно, что удалённую базу в высоких широтах имеет смысл располагать на расстояниях не более первых сотен километров.

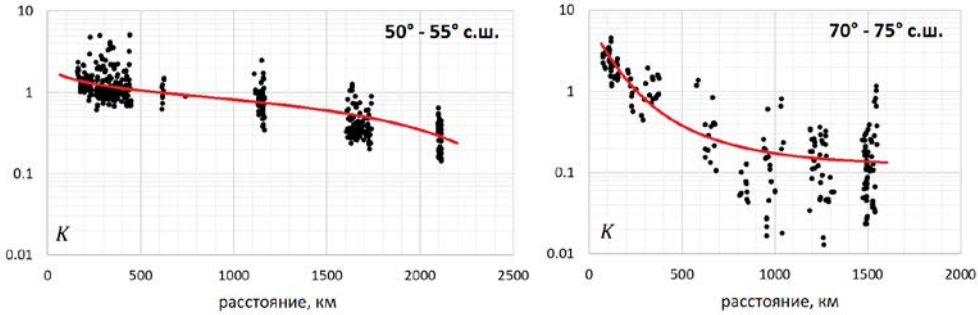

Рис. 8. Значения критерия применимости удалённой базы для двух широтных областей в зависимости от расстояния на частоте 1 герц

Таким образом, на основании большого массива данных получены зависимости когерентности МТ полей от расстояния, частотного диапазона и широты наблюдения. Выяснено, что в высоких широтах быстро пропадает когерентность между полями на низких (< 1 герца) частотах, сохраняясь при этом в диапазоне Шумановских резонансов. В умеренных широтах когерентность сохраняется на расстоянии первых тысяч километров как для низких, так и для высоких частот. В экваториальных широтах наблюдается быстрый спад когерентности на высоких частотах, в связи с близостью источника. На низких же частотах когерентности убывают медленно и начиная с расстояния порядка 10 тысяч километров выходят на постоянное значение равное 0.2.

В результате проведённого исследования можно сделать вывод, что при проведении МТЗ удалённая база может быть расположена на расстояниях порядка нескольких сот километров в 70-х широтах и на расстояния порядка 1000 километров в умеренных широтах, что подтверждено полевыми примерами. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения создания стационарных базовых точек.

Глава 5. Обработка данных морских МТЗ в шельфовой зоне

На данный момент известно достаточно много примеров успешного проведения морского МТЗ на больших глубинах (сотни метров и километры). Мелководное МТЗ до сих пор не получило широкого распространения в связи с возникающими при его проведении трудностями: сильным уровнем помех, связанным с течениями и поверхностными волнами и низкой производительностью при использовании существующих методик. В попытке преодолеть вышеописанные трудности автором была создана и протестирована новая технология МТЗ для проведения работ на малых глубинах (рис 9). Технология имеет следующие особенности:

- измеряется только одна компонента электрического поля (E_x). При этом теряется часть информации о разрезе, однако становится легко раскладывать длинные измерительные линии и повышается уровень полезного сигнала
- длина измерительных линий составляет от 50 до 100 метров, измерения проводятся с частым шагом (от 50 до 300 метров)
- отдельные электрические измерительные линии объединяются в единую косу, которая может достигать длины в 1 километр и более. Раскладка косы происходит с непрерывно движущегося вдоль профиля судна
- магнитное поле одновременно измеряется в нескольких точках на дне (в непосредственной близости от электрических измерительных линий) и на суше (недалеко от участка работ). Магнитное поле на дне используется как основное. Магнитное поле на суше используется в качестве удалённой базы. Как на суше, так и на море измеряются две горизонтальные компоненты магнитного поля (H_x, H_y)

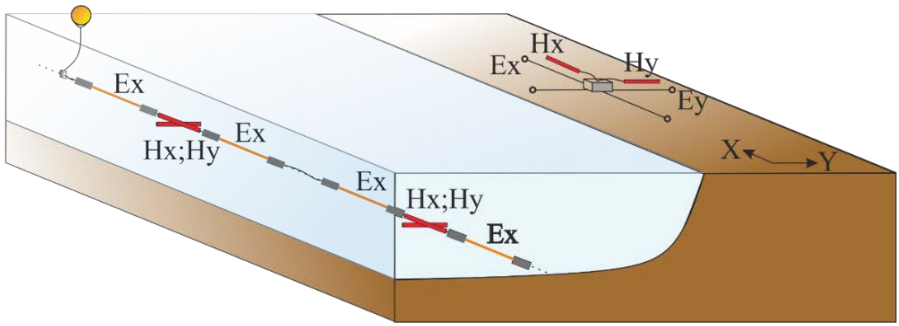

Рис. 9. Общая схема проведения измерений методом МТЗ в прибрежной зоне

Численное моделирование

Для оценки возможностей описанной выше схемы измерения на первом этапе автором были проведены численные моделирования. Рассматривалась типичная для арктического шельфа, геоэлектрическая модель (рис. 10): слой мерзлоты, выклинивающийся при удалении от берега, с присутствующими в нём таликами.

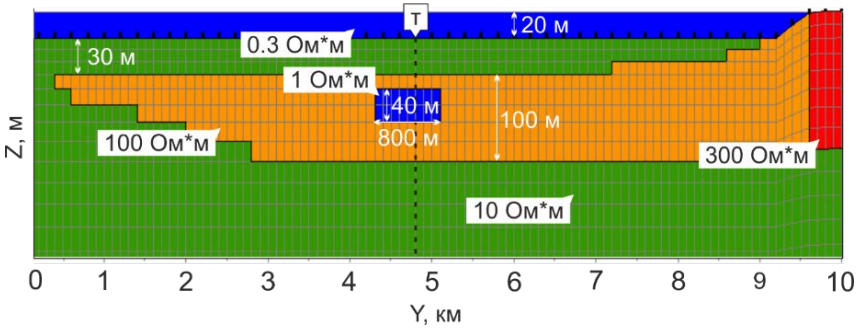

Рис. 10. Тестовая геоэлектрическая модель. Глубина моря – 20 метров

Наравне с вышеописанной моделью были проведены расчёты ещё для двух моделей, отличающихся от первой глубиной моря. В одной из этих моделей глубина моря уменьшена с 20 до 5 метров, во второй модели водный слой отсутствовал.

На основании численного моделирования в работе сделаны следующие выводы: при измерениях в море различия между TE и TM модами меньше, чем в случае измерений на суше; при измерениях на дне моря возрастает чувствительность магнитных полей к неоднородностям; на глубинах моря, близких к глубинности изучения вклад электрических и магнитных полей сопоставим; кривые для TE и TM моды оказываются близки к локально-нормальным, хотя следует отметить, что TE мода чуть более информативна.

Алгоритм обработки

Большое внимание было уделено созданию графа обработки получаемых данных. За основу был взят алгоритм для обработки наземных данных, описанный ранее. Однако, было учтено, что измеряются не все компоненты магнитотеллурического поля. Также, вводились поправки за неточность азимутов расстановки датчиков магнитного поля на дне. Величина поправок определялась по критерию максимальной когерентности между ортогональными компонентами электрического и магнитного поля.

В связи с отсутствием GPS сигнала на дне не было возможности поддерживать точную синхронизацию приборов в течении длительности всей записи и фазовые характеристики были искажены. По этой причине также необходимо было вводить поправки за рассинхронизацию.

<u>Полевые испытания</u>

Летом 2017 года в Краснодарском крае были проведены опытно методические работы. Данные, измеряемые в море оказались по качеству сопоставимы с сухопутными, о чём свидетельствует сравнение когерентностей полей на суше и на море. Когерентность морских измерений, уступает когерентности сухопутных полей на частотах выше 10 герц. Однако на более низких частотах она не уступает когерентности между полями на сухопутной точке и даже оказывается выше на отдельных частотах.

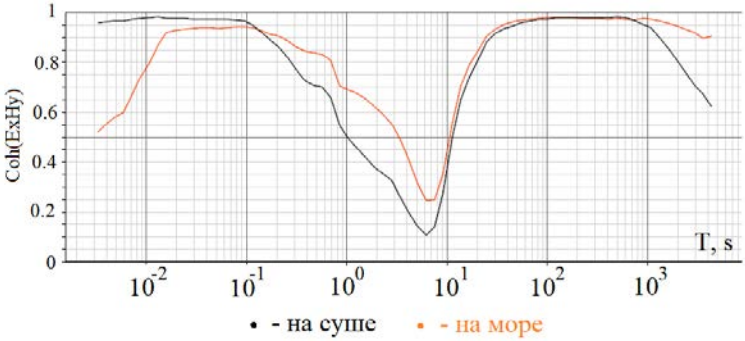

Рис. 11. Сравнение когерентностей полей на суше и на море

Пример кривой кажущегося сопротивления при последующем проведении производственных работ на Карском море показан на рис. 12.

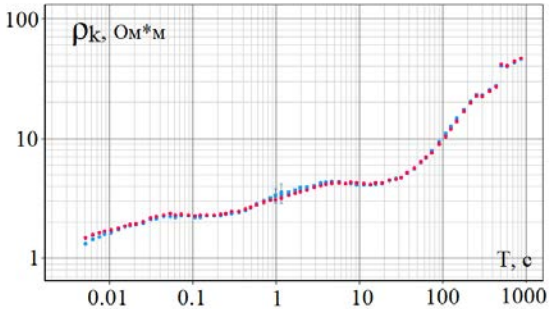

Рис. 12. Пример кривой кажущегося сопротивления, полученной при выполнении работ на Карском море

Заключение

Создание алгоритмов анализа и обработки магнитотеллурических данных является актуальной задачей в связи с увеличением объёмов работ методом МТЗ и повышением требований к качеству получаемых результатов. Автором были разработаны алгоритмы обработки синхронных массивов магнитотеллурических данных и создан ряд инструментов анализа, позволяющих проводить оценку качества данных и эффективно обрабатывать большие объёмы данных.

Особенностью разработанных автором алгоритмов обработки является использование перекрёстного взвешивания и возможность задействования электрических каналов удалённой базы одновременно с магнитными. Перекрёстное взвешивание позволяет повысить качество получаемых результатов в случае сильных помех в магнитном поле. Использование электрических каналов удалённой базы позволяет бороться с шумами в электрическом поле.

Тестирование предложенных алгоритмов на синтетических и реальных данных показало их эффективность как при хорошем качестве данных, так и в случае сильного уровня помех как в магнитном, так и в электрическом полях. Алгоритмы активно используется при обработке больших массивов полевых данных в компании «Северо-Запад».

Выполнено исследование по оценке эффективности использования удалённых баз, находящихся на разном расстоянии от точек наблюдения. Получены зависимости когерентности МТ полей от расстояния, частотного диапазона и широты наблюдения. Выяснено, что в высоких широтах быстро пропадает когерентность на низких (< 1 герца) частотах, сохраняясь при этом в диапазоне Шумановских резонансов. В умеренных широтах когерентность сохраняется на расстоянии первых тысяч километров как для низких, так и для высоких частот. В экваториальных широтах наблюдается быстрый спад когерентности только на высоких частотах.

Для оценки применимости удалённых баз, расположенных на разных расстояниях, введён критерий, который показал, что база может быть расположена на удалении порядка нескольких сот километров в 70-х широтах и на удалении порядка 1000 километров в умеренных широтах, что подтверждено полевыми примерами. Полученные результаты представляют интерес с точки зрения создания стационарных базовых точек.

Разработана технология выполнения морских МТЗ на мелководье, позволившая получать качественные данные при измерениях на небольших глубинах (первые десятки метров). Для обработки морских данных предложенный автором основной алгоритм был модифицирован с учётом

особенностей технологии измерения и с учётом особенностей аппаратуры. Технология была опробована в ходе опытно-методических работ. Позднее были выполнены производственные работы с применением данной технологии.

Развитие метода МТЗ в будущем должно быть связано с прогрессом в аппаратуре, что приведёт к увеличению количества синхронных измерений, и расширению их частотного диапазона. Параллельно с развитием аппаратуры будут совершенствоваться и методы работы с получаемыми МТ-данными. Таким образом, в ближайшем будущем тема останется актуальной, и можно надеяться, что данная работа будет полезна тем, кто продолжит работу в этой области.

Основные работы автора по теме диссертации, опубликованные в журналах, входящих в перечень Scopus, Web of Science или RSCI:

1. **Епишкин Д. В.**, Яковлев А.Г. О границах применимости метода удалённой базы при магнитотеллурических зондированиях // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2016. №4. С. 40 – 46.

2. **Епишкин Д.В.** Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Геофизика. 2016. №2. С. 51 – 61.

3. Зорин Н.И. **Епишкин Д.В.**, Яковлев А.Г. Магнитотеллурический метод вызванной поляризации // Геофизика. 2016. №2. С. 51 – 61.

4. **Epishkin D.V.** Improving Magnetotelluric Data-Processing Methods // Moscow University Geology Bulletin. 2016. №71. P. 347 – 354.

5. Zorin N., **Epishkin D.**, Yakovlev A. A telluric method for natural field induced polarization studies // Journal of Applied Geophysics. 2016. №135. P. 486 – 494.

Официально зарегистрированные программы для ЭВМ:

Программа обработки данных магнитотеллурических зондирований EPI-KIT (регистрационный номер 2015614527)