

На правах рукописи

Оборнев Иван Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МТЗ НА
ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОННЫХ ПАЛЕТОК**

Специальность: 25.00.10 - Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013 г.

Работа выполнена на кафедре Информатики и геоинформационных систем
Российского государственного геологоразведочного университета
имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Бобровников Леонид Захарович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Петров Алексей Владимирович
(МГРИ-РГГРУ)

доктор физико-математических наук,
Александров Павел Николаевич
(ЦЭМИ ИФЗ РАН)

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур
ОИВТ РАН

Защита диссертации состоится 12 декабря 2013 г. в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д 212.121.07 при Российском государственном
геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе по адресу: 117997,
Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, МГРИ-РГГРУ, ауд. 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ.

Автореферат разослан 11 ноября 2013 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-
математических наук

А. Д. Каринский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Работа посвящена разработке методов решения обратной задачи (ОЗ), которые позволяют повысить эффективность геолого-геофизической интерпретации данных магнитотеллурических зондирований (МТЗ) на основе применения нейросетевых (НС) палеток (обратных операторов) общего и корректирующего типов.

Традиционные методы интерпретации МТ-данных сталкиваются со значительными трудностями, которые связаны с нелинейностью и некорректностью многомерных обратных задач геоэлектрики. Несмотря на бурное развитие средств измерения МТ-поля и вычислительные мощности современных компьютеров, которые доступны любому геофизику-интерпретатору, в методах интерпретации по-прежнему широко применяются классические одномерные $1D$ или сильно сглаженные и малопараметрические двумерные ($2D$) и трехмерные ($3D$) модели геоэлектрических сред.

Метод МТЗ имеет свои ощутимые преимущества, которые связаны с глубиной проникновения и естественным (бесплатным) характером источника МТ-поля. Сегодня на вооружении у геофизиков-практиков имеется ряд мобильных измерительных станций (например, «Phoenix Geophysics»), которые могут записывать МТ-поле в диапазоне от десятков тысячных долей секунд до часов и суток в зависимости от методики съёмки. Это позволяет с большой точностью и детальностью изучать как строение верхней части разреза, так и глубинное распределение хорошо проводящих зон земной коры и верхней части кристаллического фундамента.

Таким образом, на сегодняшнем уровне развития измерительной и вычислительной техники для интерпретации большинства реальных геофизических сред актуальным является использование $2D$ и $3D$ физико-геологических моделей (ФГМ). Другой актуальной задачей современной магнитотеллурики становится разработка новых подходов к интерпретации МТ-данных с использованием последних достижений в методах вычислений на основе применения нейронных сетей и параллельных алгоритмов.

В диссертационной работе для повышения эффективности интерпретации предлагается использовать НС-палетки универсального (первое приближенное экспресс-решение) и корректирующего типов (поэтапное уточнение результата инверсии) при решении обратных задач МТЗ в классах параметризованных $2D$ геоэлектрических разрезов. Данный двухэтапный (или многоэтапный) подход снижает ошибку инверсии в десятки раз и тем самым повышает эффективность интерпретации в целом.

Цель диссертационной работы

Повышение точности, достоверности и производительности методов интерпретации данных МТЗ на основе построения обратных операторов - НС-палеток общего и корректирующего типов в рамках эффективно параметризованных классов $2D$ геоэлектрических сред.

Основные задачи исследования

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка численных методов и программного обеспечения для создания эффективно параметризованных геоэлектрических классов $2D$ сред (алгоритм и компьютерная программа *GeoPaint*).
2. Создание интерполяционного алгоритма гладкой параметризации геоэлектрических сред на основе монотонных сплайнов, которые устраняют возможные искажения не геологического характера, связанные с применением математического аппарата сплайнов (алгоритм и программный модуль *MonoSpline*).
3. Построение набора НС-палеток (обратных НС-операторов) универсального и корректирующего назначения для решения многопараметрических задач инверсии МТ-данных (алгоритм и компьютерные программные модули *НейроПалетка 2.0*, *КорректПалетка*).
4. Построение единого программного комплекса на основе разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения для применения многоэтапной инверсии МТ-данных (алгоритм и компьютерный программный комплекс *ГеоНейрон 2.0*).

Научная новизна

Научная новизна исследований состоит в следующем:

1. Разработаны методы *эффективной* параметризации $2D$ неоднородных геоэлектрических разрезов (*GeoPaint*) с учетом устранения искажений и ложных экстремумов при сглаживании на основе *монотонных сплайнов* (*MonoSpline*).
2. Разработаны методы, алгоритмы и программа (*НейроПалетка 2.0*) построения *универсальных* обратных НС-операторов для многократной инверсии различных МТ-данных в классе многопараметрических ФГМ.
3. Создан алгоритм и необходимое программное обеспечение (*КорректПалетка*) для построения специальных *корректирующих* НС-операторов, которые позволяют уточнять результаты первичной экспресс-интерпретации. Экспериментально доказано, что корректирующие НС-операторы различных типов позволяют уменьшить ошибку инверсии в десятки раз.
4. Показано, что с помощью сочетания *универсальных* и *корректирующих* обратных НС-операторов можно решать задачи инверсии МТ-данных с высокой степенью детальности для широкого набора классов геоэлектрических сред (комплекс *ГеоНейрон 2.0*).

Защищаемые положения:

1. Созданная компьютерная программа *GeoPaint* и использование монотонной сплайн-процедуры *MonoSpline* позволяют обеспечить построение эффективно параметризованных классов ФГМ, в рамках которых можно обеспечить практическую устойчивость решения обратной задачи МТЗ.
2. Сконструированные и обученные универсальные обратные НС-операторы - *НейроПалетки* обеспечивают решение многопараметрических задач инверсии $2D$ МТ-данных большой размерности.
3. Разработанная методика и программный комплекс *ГеоНейрон 2.0* для проведения двухэтапной НС-инверсии, включающей в себя экспресс-инверсию - *НейроПалетка* и последовательное применение корректирующих НС-операторов - *КорректПалетка*,

позволяют в десятки раз повысить точность формализованной интерпретации МТ-данных в классах эффективно параметризованных сред.

Практическая ценность

Полученный в ходе исследований программный комплекс *GeoНейрон 2.0*, включающий компьютерную программу *GeoPaint*, программные модули: *MonoSpline*, *НейроПалетка 2.0*, *КорректПалетка* и другие вспомогательные утилиты, позволяет эффективно проводить НС-инверсию при интерпретации МТ-данных. Используемые в программном комплексе современные достижения в области интерполяционных, нейросетевых и параллельных алгоритмов с применением MPI и GPU технологий обеспечивают повышение скорости, точности и достоверности результатов процедур интерпретации.

Нейросетевой алгоритм решения обратной задачи был проверен на многочисленных двумерных модельных примерах. Апробация алгоритма проводилась на натуральных данных по электроразведочным полевым работам методом МТЗ в Краснодарском крае по субмеридиональному профилю Новороссийск-Славянск–Елизаветовка (региональный профиль №3 Кубанский) в районе Западно-Кубанского краевого прогиба (по данным И.С. Фельдмана). С использованием разработанной методики проведен анализ чувствительности ФГМ для определения методов измерения в районе месторождения Голицыно (по данным Л.З. Бобровникова). Программный комплекс *GeoНейрон 2.0* внедрен в геофизическую научно-производственную фирму - ООО ЕМГео (генеральный директор И.С. Фельдман).

Апробация результатов и публикации

Основные положения диссертационной работы докладывались:

на 3-х Международных конференциях в МГРИ-РГГРУ «Новые идеи в науках о Земле» в 2009, 2011 и 2013 годах; на 3-х Всероссийских Школах-семинарах по ЭМ зондированию Земли в 2009, 2011 и 2013 годах; на 2-х сессиях Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского в 2012 и 2013 годах; на 3-х международных конференциях: (2012): IV Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, Академгородок; (2012): X Международный геофизический научно-практический семинар "Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых", Санкт-Петербург; (2012): Четвёртой Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН, академика Европейской академии наук Л.Д. Кудрявцева, Москва.

Результаты представлены в четырех научных статьях, которые опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, пяти сборниках трудов научных конференций и в восьми тезисах докладов.

Личный вклад автора

Автором модернизирован и дополнен исследовательский программный комплекс *GeoНейрон 2.0*, в который включены авторские модули: *GeoPaint*, *MonoSpline*, *НейроПалетка 2.0*, *КорректПалетка* и различные связующие модули обработки результатов. На основе разработанной методики оценки чувствительности ЭМ-поля было построено несколько новых классов ФГМ с эффективной параметризацией. На расчетном и иллюстративном материале показано, что в рамках эффективно параметризованной среды устойчивость обратной задачи существенно повышается. Предложенная в работе автором

методика построения корректирующих НС-операторов на основе первого приближения позволяет повысить точность решения в десятки раз. Диссертантом разработан алгоритм массового моделирования с применением суперкомпьютерной вычислительной системы для построения базы данных эталонных решений прямой задачи, что позволило существенно сократить время получения результатов исследований.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 155 страниц машинного текста, 22 таблицы, 42 рисунка, а также список литературы из 120 наименований. Диссертационная работа выполнена в период учёбы в аспирантуре МГРИ-РГГРУ.

Благодарности

Автор глубоко благодарен научному руководителю, д.т.н., проф. Л.З. Бобровникову и научному консультанту, к.ф.-м.н. М.И. Шимелевичу за внимание, неоценимую помощь и руководство во время написания работы, доценту Е.А. Оборневу за огромный труд и наставления по ходу всей работы, генеральному директору геофизической научно-производственной фирмы ООО ЕМГео к.г.-м.н. И.С. Фельдману за предоставленные материалы полевых измерений, Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку работ (гранты № 11-07-00662, 13-05-01135), Российской Академии Наук за использование ресурсов суперкомпьютерного кластера МВС-6000IM МСЦ РАН.

Содержание работы

Введение

Дана общая характеристика работы и показана актуальность выбранной темы исследования. Формулируется цель и основные задачи. Выписываются защищаемые положения и подчеркивается научная новизна выбранной темы исследования. В завершении поясняется практическая ценность результатов, их апробация и личный вклад автора.

Глава 1. Обзор методов решения обратных задач геоэлектрики.

Традиционные методы решения обратной задачи МТЗ основаны на минимизации функционала невязки с помощью различных стратегий варьирования неизвестных параметров ФГМ. В обзоре рассматриваются четыре основных типа алгоритмов для регуляризованной 2D инверсии, имеющие программные реализации: OCCAM [Parker, 1994], Non-Linear Conjugate Gradients (NLCG) [Rodi and Mackie, 2001], Rapid Relaxation Inversion (RRI), [Smith and Booker, 1991], Reduced Basis OCCAM's Inversion (REBOCC), [Siripunvaraporn and Egbert, 1999]. Монографии [Жданов, 2007; Светов, 2008; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Дмитриев, 2012; Жданов, 2012] посвящены подробному изложению фундаментальных методов и подходов к решению обратной задачи геоэлектрики. Современный обзор этого направления приводится в работе [Siripunvaraporn, 2012].

В разделе «**Параметризация геоэлектрических сред**» дается анализ состояния проблемы параметризации геоэлектрических сред в обратных задачах, который опирается на работы М.Н. Бердичевского, В.И. Дмитриева, М.С. Жданова, Ив.М. Варенцова, М.И. Шимелевича, Е.А. Оборнева.

В разделе **«Интерполяционные сплайн-функции»** рассматривается проблема присутствия ложных выбросов и осцилляций в интерполирующих кривых распределения геоэлектрических параметров в исследуемой области. Данные особенности не характерны для исходного набора опорных точек [Оборнев и др, 2010] и не связаны со строением среды. Показывается, что в этом случае целесообразно использовать интерполяционные функции, обеспечивающие условие монотонности между опорными точками [Akima, 1970], которые широко применяются в задачах изогеометрической аппроксимации кривых и поверхностей [Квасов, 2006].

Аппроксимационные подходы в геофизике. Отмечается, что в многочисленных работах В.Н. Страхова рассматриваются вопросы, связанные с построением различного рода аппроксимаций при решении прямых и обратных задач гравиметрии, магнитометрии и геодезии [Страхов, 1998; Страхов, 2001]. Аппроксимационные направления в геофизических методах развивались также в работах В.И. Аронова, М.С. Жданова, Б.С. Светова, М.И. Шимелевича и других исследователей.

Нейронные сети. Концептуальные основы применения нейросетевой технологии при решении задач анализа, обработки и интерпретации геофизических данных изложены в работе [Raiche, 1991]. Нейронные сети лишены многих недостатков, присущих традиционным методам, что делает их применение для решения обратной задачи очень перспективным [Шимелевич и др., 2001, Poulton, 2001]. Подробный обзор геофизических примеров использования этого метода представлен в работе [Sandham, Leggett, 2003]. Особенно интенсивно данный метод развивается за рубежом в гравиметрии [Taylor&Vasco, 1990], аэромагнитной съемке [Pearson et al., 1990], сейсмике [McCormack, 1991], каротаже [Wieneretal, 1991], геоэлектрике на постоянном токе [Poulton, 1992]. Первые результаты применения нейронных сетей для решения обратных задач МТЗ (инверсии МТ-данных) были представлены в работах [Hidalgo et al., 1994; Спичак, Попова, 1998; Shimelevitch, Osborne, 1998].

Применение **НС-методов в обратных задачах математической физики** рассмотрены в работах [Павлов, 1994; Доленко, 2002; Васильев, 2007; Шугай, 2006; Васильев, 2007; Гужва, 2011].

В итоговом разделе **«Применение нейросетей при интерпретации различных геофизических данных»** приводится анализ современного состояния проблемы НС-инверсии геофизических данных, оцениваются преимущества и недостатки данного подхода.

Глава 2. Основные принципы моделирования 2D прямой задачи в классах параметризованных сред. Программы GeoPaint и MonoSpline.

Решение прямой задачи (ПЗ) или физико-геологическое моделирование лежит в основе интерпретации вне зависимости от применяемого метода решения обратной задачи. В оптимизационных методах решение ПЗ используется для вычисления невязки на каждой итерации оптимизационной схемы, а при аппроксимационном нейросетевом подходе - для расчета базы данных (БД) эталонных примеров. При решении прямой задачи в основном используются численные методы, основанные на решении интегральных уравнений (В.И. Дмитриев, М.С. Жданов), конечно-разностных (М.Н. Юдин, И.М. Варенцов, Е.Ю. Фоменко) или конечно-элементных аппроксимациях (М.И. Эпов, Э.П. Шурина) дифференциальных операторов.

В развиваемом нейросетевом подходе, связанном с аппроксимацией обратного оператора, решение прямой задачи рассматривается в рамках некоторого заданного

параметризованного класса ФГМ. Для построения эталонного множества, на котором обучается НС-палетка, требуется многократное решение прямой задачи в заданном классе. Это накладывает определенные требования на процессы параметризации и решения исследуемой задачи. В работах [Дмитриев, Кокотушкин, 1971; Страхов, 1978; Шимелевич, 1988; Варенцов, 2005; Шимелевич, Оборнев, 2007] рассматривались различные примеры параметризации $2D$ сред.

В разделе 2.1 «Физико-геологическое моделирование задачи МТЗ» перечисляются особенности магнитотеллурического поля в $2D$ неоднородной среде. Дается математическая постановка задачи для случая E и H поляризованных полей. Приводится описание численной реализации процесса $2D$ моделирования МТ-поля методом конечных разностей и процедура формирования матрицы решения краевой задачи.

В разделе 2.2 «Параметризация геоэлектрических сред» кратко изложены физические, математические, информационные, геофизические и интерпретационные условия эффективного решения обратной задачи (ОЗ). Приводятся базовые определения и принципы, на которых основаны алгоритмы параметризации геоэлектрических разрезов. Основным понятием, лежащим в основе процедуры параметризации сред, является *функция параметризации* $f_k(s_1, \dots, s_{N_k}, r)$ заданного класса ФГМ, которая определяет правило пересчета вектора интерпретационных макропараметров (рис. 1) $s = (s_1, \dots, s_{N_k})$ ФГМ в значения удельной электропроводности (уд. эл.) среды $\sigma(r)$ в точках $r(y, z)$ исследуемой области Ω [Шимелевич, 1988]:

$$\sigma(r) = f_k(s_1, \dots, s_{N_k}, r), \quad r \in \Omega, \quad (1)$$

что оправдывает ее название как «функции параметризации» класса ФГМ.

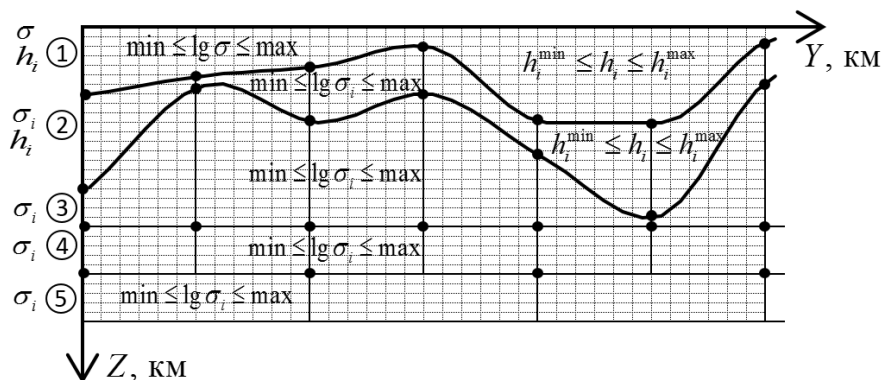


Рис.1. Схематический пример параметризации класса геоэлектрических разрезов. Модель включает два слоя (см. обозначения цифрами 1, 2 в кружках слева) с параметрами в виде мощностей и уд. эл., переходный слой (3) и блочную макросетку проводимостей (4, 5). Значения уд. эл. заданы в узлах макросетки $h(y_i)$ (черные точки), мощности слоев - в точках пересечения границ с вертикальными делениями по оси y_i . В первом слое уд. эл. задана одним числом σ , в остальных случаях - множеством значений для всех блоков $\sigma(y_i)$.

Рассматриваются различные типы и функции параметризации, соответствующие разнообразным физико-геологическим моделям сред.

Простейшим, и вместе с тем достаточно общим, примером параметризации и задания модельного класса разрезов является представление распределения уд. эл. среды в виде ряда по заданной системе функций $\phi_i(r)$: $\sigma(r) = f_\phi(s_1, \dots, s_N, r) = \sum_1^N s_i \phi_i(r)$, $r \in \Omega$. Таким образом, основным конструктивным элементом при построении функции параметризации для любого класса ФГМ является разработка системы базисных функций $\phi_i(r)$. В качестве $\phi_i(x, y, z)$ при численных расчетах логично использовать хорошо развитый аппарат различных полиномов, сплайнов и других интерполирующих функций. Макропараметрами среды $s = (s_1, \dots, s_{N_k})$ в этом случае являются системы опорных точек, заданных на дискретной сетке задачи.

Далее в этом разделе рассматриваются особенности параметризации геоэлектрических разрезов и основные принципы построения модельных геоэлектрических классов: иерархический (вертикальный), территориальный (горизонтальный), априорный (уточняющий). Подробно анализируются базовые элементы параметризации: микросетка уд. эл. модели, макросетка параметров, слой с четкими и нечеткими (размытыми) криволинейными границами, блочно-слоистая комбинированная модель. Для корректного решения ПЗ исследуются типы параметризации переходных зон между аномальными и краевыми областями 2D разреза. Дается описание и иллюстрация применения базовых типов параметризации для построения специальных моделей геоэлектрических сред, которые связаны с разломными, разрывными, флексурными, линзовидными и куполообразными геологическими структурами.

Важнейшей характеристикой проводимой параметризации среды является ее детальность, которая интегрально определяется общим числом параметров, а локально - минимальным размером области однородности (например, ячейки сетки). Опираясь на понятие чувствительности в работах [Дмитриев, 2012; Шимелевич и др., 2012; Шимелевич, 2013], производится выбор минимального размера макропараметра на основе оценки величины его вклада в наблюдаемые ЭМ-поля в соответствии с критерием [Дмитриев, 2012, Шимелевич, 2013]:

$$\|\Delta s\| / \|\Delta e\| \geq C, \quad \|\Delta e\| \neq 0, \quad (2)$$

где $\|\Delta e\| = |e' - e''| / (e^{\max} - e^{\min})$, $\|\Delta s\| = |s' - s''| / (s^{\max} - s^{\min})$ - нормированные значения изменений характеристик поля и векторов параметров среды соответственно; $e' = e'(s')$, $e'' = e''(s'')$ - расчетные характеристики ЭМ-поля, соответствующие набору параметров s', s'' . Условием чувствительности измеряемого отклика в поле от искомого параметра является значение константы C , заданной априорно из требования максимальной детализации исследуемой среды. Более подробно этот вопрос и технология применения данного правила рассматривается в главе 3.

В разделе 2.3 «Программа *GeoPaint* и алгоритм монотонного сплайна *MonoSpline*» отражен личный вклад автора, связанный с разработкой алгоритмов монотонного сплайна и созданием программы *GeoPaint* (рис. 2). Программа написана в среде разработки VB.NET с возможностью включения внешних расчетных модулей на алгоритмическом языке Фортран. В программе *GeoPaint* доступны следующие режимы работы: создание структуры нового модельного геоэлектрического класса, исследование особенностей поведения границ слоев и других геологических объектов в зависимости от выбора весового параметра сплайн-процедуры, построение функции параметризации, визуализация результатов, ручное и

автоматическое моделирование параметров геоэлектрических разрезов в рамках заданного класса.

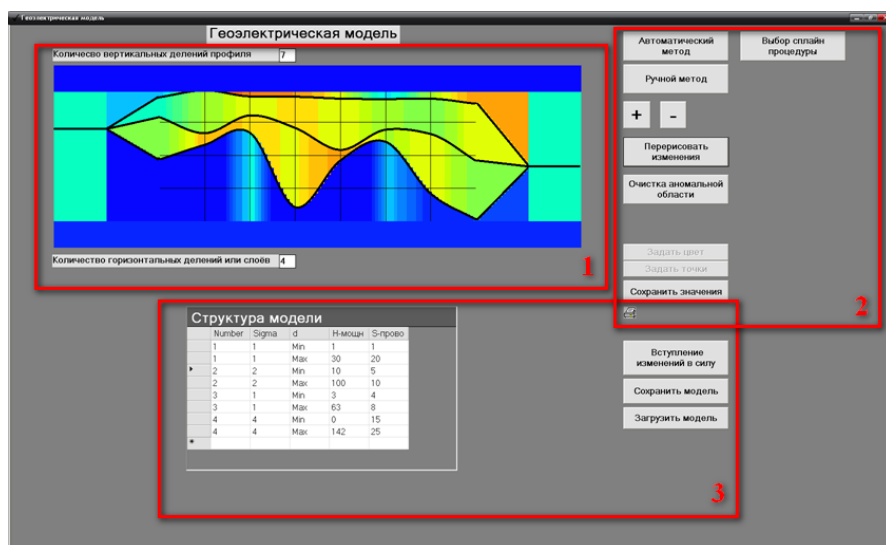


Рис. 2. Основные области рабочего окна программы *GeoPaint*:
 1) графического отображение ФГМ,
 2) визуального интерфейса программы,
 3) таблицы описания структуры эффективно параметризованного геоэлектрического класса ФГМ.

Алгоритм монотонного сплайна основывается на исследовании нарушения монотонности и коррекции базовых функций Эрмита в процессе интерполяции. Приводится схема алгоритма и примеры использования процедуры *MonoSpline*.

Для проверки работоспособности алгоритма *MonoSpline* была разработана специальная тестовая модель, представляющая собой геоэлектрический разрез, состоящий из трех слоёв с криволинейными границами, где уд. эл. внутри слоя не меняется. На рис. 3 приведены примеры работы двух различных сплайн-процедур: стандартной эрмитовой и *MonoSpline*.

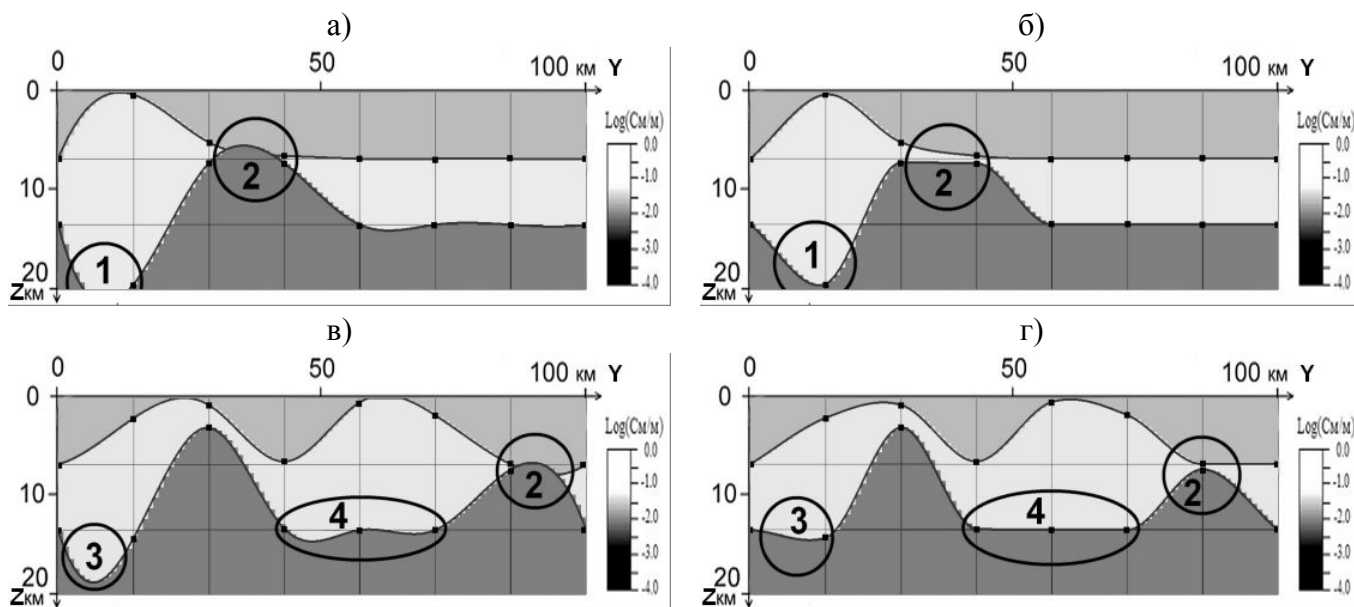


Рис. 3. Примеры интерполяции криволинейных границ для схематической трехслойной модели. а), в) результат интерполяции с помощью стандартной сплайн процедуры, б), г) результат интерполяции с помощью монотонных сплайнов. Области (1), (2), (3), (4) (цифры в кружочках на рисунках) выделены участки с особенностями: (1) - выход «исчезновение» за границы рассматриваемой области; (2) - нарушение «прорывание» границы слоя; (3) - ложный экстремум; (4) - волновой эффект.

В разделе 2.4 «Схема алгоритма решения прямой задачи для формирования БД \mathfrak{R}_k эталонных примеров» приводится схема алгоритма решения прямой задачи для формирования БД эталонных примеров на множестве допустимых значений в эффективно параметризованном геоэлектрическом классе ФГМ.

Глава 3. Методы НС-инверсии в параметризованных классах геоэлектрических разрезов. Алгоритм и принципиальная схема программы *НейроПалетка 2.0*.

Вопросы существования, единственности и устойчивости обратной магнитотеллурической задачи подробно рассмотрены в работах [Дмитриев, 2012; Жданов, 2012; Бердичевский, Дмитриев, 2009; Светов, 2008; Жданов, 2007]. Показано, что для 2D случая существование решения ОЗ МТЗ вытекает из возможности физического моделирования и измерения МТ-поля, а единственность доказана в теоремах П. Вайдельта, А.Л. Гусарова, В.И. Дмитриева. Степень устойчивости решений зависит от свойств оператора задачи и ряда других причин, главной из которых является неизбежная погрешность, возникающая при измерении МТ-поля и в процессе обработки МТ-данных.

Для преодоления неустойчивости приближенных решений задачи применяются методы регуляризации алгоритмов инверсии [Дмитриев, 2012]. Классические методы регуляризации, эффективные на практике при решении линейных обратных задач, встречаются со значительными сложностями при решении нелинейных задач большой размерности, особенно в условиях недостатка априорной информации. Результаты, представленные в диссертационной работе, являются дальнейшим развитием аппроксимационного подхода [Шимелевич и др., 2003; Шимелевич, Оборнев, 2007], для которого характерной особенностью является то, что вопрос исследования устойчивости предшествует процессу решения. Основная идея данного метода состоит в том, чтобы перед решением ОЗ разработать универсальный заведомо устойчивый в заданном классе параметризованных геоэлектрических сред «решатель» обратной задачи – нейросетевую палетку, которую можно применять для любых сред из заданного класса ФГМ. Таким образом, повышение точности и устойчивости решения ОЗ достигается за счет построения эффективно параметризованных геоэлектрических классов сред и конструирования универсальных и корректирующих НС-палеток, которые дают устойчивые результаты решения ОЗ, что в целом повышает эффективность интерпретации данных метода МТЗ.

В разделе 3.1 «НС-метод решения обратной задачи геоэлектрики» раскрывается суть НС-метода решения обратной задачи МТЗ.

Обратная задача электромагнитных зондирований в заданном *модельном конечно-параметрическом классе сред* сводится к решению операторного уравнения Грода относительно вектора параметров $s = (s_1, \dots, s_N)$, которые определяют строение исследуемой среды Ω :

$$A_{N_k} s = e(r, \omega, \sigma), \quad (3)$$

где $e = (e_1, \dots, e_M)$ – вектор данных характеристик ЭМ-поля в точках пространственной $r(y, z=0)$ и частотной ω сети измерений на поверхности Земли, который зависит от распределения уд. эл. $\sigma(y, z)$ в Ω ; A_{N_k} – нелинейный оператор решения прямой задачи для параметризованной среды.

Суть аппроксимационного подхода к решению ОЗ заключается в том, что обратное отображение для уравнения (3) в рассматриваемом k -ом классе сред заменяется аппроксимирующей конструкцией, и приближенное интерполяционное решение s^* ищется в виде (Шимелевич, Оборнев, 1998; Шимелевич и др., 2003; Шимелевич, Оборнев, 2007):

$$s^* = \Psi_k^{App}(a_1, \dots, a_J, e_1, \dots, e_M), \quad (4)$$

где Ψ_k^{App} - функция-аппроксиматор, которая задана в аналитическом виде и зависит от числовых параметров a_j , определяемых в процессе ее построения (обучения) на основе экспериментального или расчетного набора *эталонных примеров решений прямых задач*. С помощью построенного аппроксиматора Ψ_k^{App} , играющего в данном случае роль *приближенного обратного отображения* \tilde{A}^{-1} задачи (3), приближенное решение s^* для рассматриваемого k -го класса разрезов может быть представлено в аналитическом виде (4) для любой правой части $e \in R^M$, что и является основным достоинством данного подхода.

Нейросетевой метод является представителем аппроксимационной группы методов, при этом в качестве универсального аппроксиматора используется нейросетевая функция $\Psi_k(e)$ специального типа, которую в теории распознавания образов принято называть трехслойным персептроном [Уоссермен, 1992] или приближенным обратным *НС-оператором*:

$$\Psi_k(e) = g(V^k g(W^k e)), \quad (5)$$

где $g(x)$ - нелинейная функция одной переменной заданного вида (например, функция сигмоидного типа $g(x) = 1/(1 + e^{-x})$); V^k, W^k - матрицы весовых коэффициентов, которые определяются в процессе обучения нейросети; индекс k подчеркивает тот факт, что значения элементов матриц зависят от рассматриваемого класса сред G_k . С помощью НС-оператора приближенное решение системы (4) записывается в виде: $s^* = g(V^k g(W^k e))$.

По найденному вектору параметров s^* в соответствии с (3) вычисляется невязка синтеза, а в соответствии с (1) - искомое распределение уд. эл. $\sigma^*(r)$ в среде.

Обученная и протестированная нейросеть Ψ_k в совокупности с *эталонными ошибками инверсии* Δs_k и *невязки синтеза* Δe_k в геофизическом смысле отражает понятие **НС-палетки** - $\Pi_k(\Psi_k; \Delta s_k; \Delta e_k)$. Время подготовки БД эталонных примеров и обучение НС-оператора может потребовать десятки и сотни часов процессорных вычислений, но применение НС-палетки занимает доли секунд на обычном персональном компьютере.

Далее в главе подробно рассматривается схема построения базы данных обучения нейросети на основе эталонного множества, алгоритм обучения и тестирования НС-аппроксиматора. Приводится блок-схема программы *НейроПалетка 2.0*, разработка которой входит в основные задачи исследования, защищаемые положения и относится к личному вкладу автора.

В разделе 3.2 «**Повышение устойчивости НС-инверсии за счет рационального выбора регуляризирующих факторов при обучении НС-оператора**» рассматривается ряд факторов, которые влияют на сходимость процедуры обучения, основанного на модифицированном градиентном методе «обратного распространения ошибки». В качестве таких факторов исследуется: рациональный выбор размера обучающего множества P ,

оптимальный размер нейросетевой конструкции L , выбор числа слоев и функции активации на слоях нейросети, а также анализ точки останова процесса обучения τ .

В разделе 3.3 «Повышение эффективности НС-инверсии в классе ФГМ» выбираются оптимальные параметры аппроксимации, основанные на физических и математических особенностях задачи: оптимальный размер входного вектора M и учет регулярной структуры класса ФГМ. В данном разделе вводится новое понятие «*корректирующей палетки*», которое получается на основе первого приближенного решения.

НС-палетка $\Pi_k(\Psi_k; \Delta s_k; \Delta e_k)$ является *универсальной* по отношению к входным данным, так как может быть построена заранее, и она не «привязана» к конкретной правой части уравнения (3). С её помощью вычисляется приближенное решение s^* обратной задачи для любой правой части e (3) за доли секунд – *экспресс-инверсия*. Это решение можно рассматривать как априорную информацию или первое приближение, которое найдено в рамках выбранного параметризованного класса G_k геоэлектрических сред. Дальнейшее уточнение решения s^* строится на основе *корректирующих палеток* (многоэтапная инверсия), которые зависят от конкретной правой части (3), что требует дополнительных временных затрат на их построение.

Корректирующая палетка является усовершенствованной модификацией обычной базовой или территориальной палетки [Оборнев Е.А., 2007] и позволяет уменьшить ошибку получаемого приближенного решения. Идея заключается в построении последовательности НС-операторов на сужающихся подмножествах допустимых решений $S \supset S_1 \supset S_2 \dots$ [Шимелевич, 2013].

Подробно рассматривается алгоритм построения *корректирующих палеток*, разработка которого составляет один из пунктов *защищаемых положений*.

Глава 4. Программный комплекс *ГеоНейрон 2.0*. Примеры НС-инверсии МТ-данных.

В разделе 4.1 «Программный комплекс *ГеоНейрон 2.0*» отражена практическая ценность диссертационной работы и личный вклад диссертанта, связанные с построенным программным комплексом *ГеоНейрон 2.0*. Данный комплекс является развитием и модернизацией комплекса *ГеоНейрон* [Оборнев Е.А., 2007] и включает в себя авторские программные модули: *GeoPaint*, *MonoSpline*, *НейроПалетка 2.0*, *КорректПалетка* и различные вспомогательные утилиты подготовки и обработки результатов. *ГеоНейрон 2.0* позволяет эффективно проводить НС-инверсию при интерпретации МТ-данных и решать весь ряд прикладных задач, который связан с НС-методом. Используемые в программном комплексе современные достижения в области интерполяционных, нейросетевых и параллельных алгоритмов (MPI и GPU технологии) позволяют повысить производительность и точность результатов НС-инверсии.

Программы и модули (рис. 4), предназначенные для получения и анализа результатов НС-инверсии, имеют графический интерфейс для ОС Windows. Командные скрипты связывают их с блоками входных параметров для запуска в среде Linux.

В разделе 4.2 приводятся многочисленные синтетические примеры работы НС-метода инверсии для модельных 2D МТ-данных из различных параметризованных классов сред.

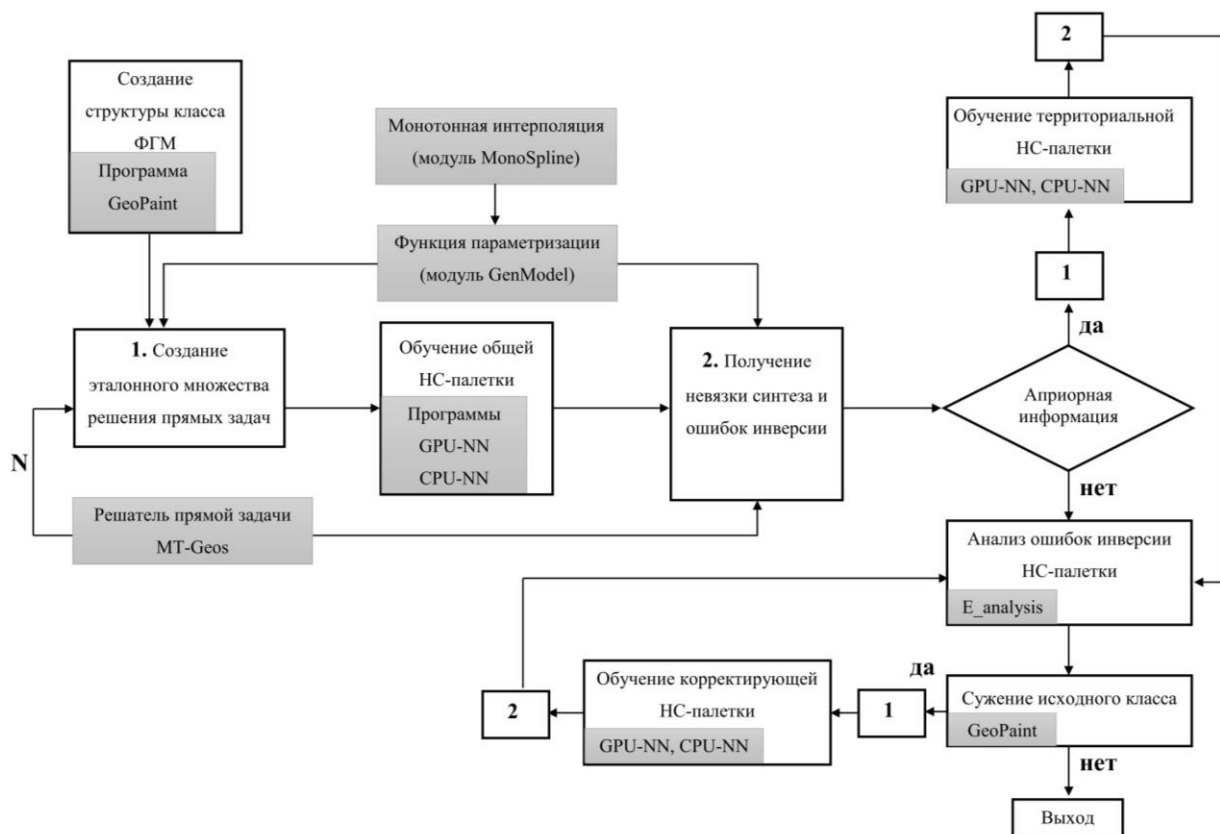


Рис. 4. Схема взаимосвязи блоков программного комплекса *GeoНейрон 2.0*. Цифрами показаны повторяющиеся в схеме блоки.

В частности, рассматривается пример НС-инверсии для специально построенного класса сред G_1^{2D} , который представляет собой блочный тип параметризации верхней части разреза с предельно заданной детальностью (до глубин 1,4 км). Работа универсальной НС-палетки Π_1^{2D} , рассчитанной для этого класса сред, была проверена на конкретных моделях 2D-M0 и 2D-M3.

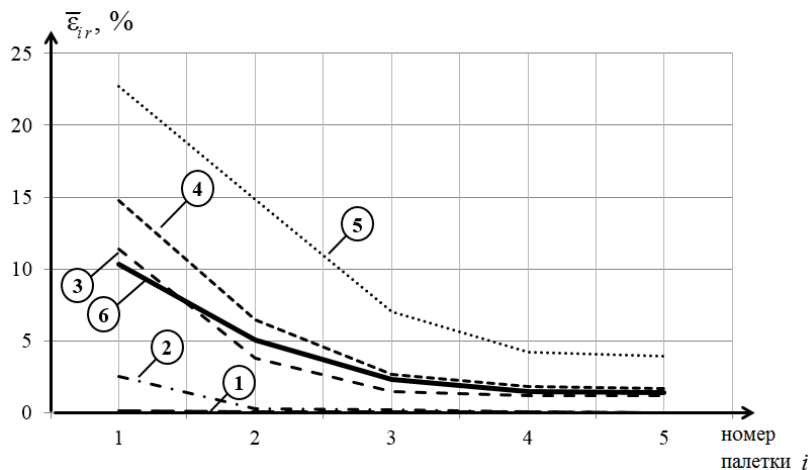


Рис. 5. Графики ошибок инверсии $\bar{\epsilon}_{ir}$ модельных данных построены с помощью универсальной Π_1^{2D} и серии корректирующих Π_i^{2D-M0} , $i = 2, 3, 4, 5$ НС-палеток для различных ярусов блочной модели 2D-M0; по горизонтали отложены порядковые номера палеток $i = 1, 2, 3, 4, 5$. Цифрами в кружочках обозначены номера r ярусов сетки модели (большим

номерам соответствуют более глубокие ярусы), линия графика с номером б) - среднее значение ошибки инверсии $\bar{\varepsilon}_{i,r}$ по всем ярусам.

Результаты применения НС-палетки Π_1^{2D} и серии корректирующих НС-палеток Π_i^{2D-M0} , $i=2,3,4,5$ к синтетическим расчётным данным для модели 2D-M0 (базовый представитель класса) приведены на рис. 5.

Анализ ошибок показывает, что в результате применения последовательности корректирующих НС-палеток Π_i^{2D-M0} , $i=2,3,4,5$ к данным модели 2D-M0 ошибки инверсии уменьшаются и выходят на некоторый приемлемый для практики уровень.

На рис. 6 а представлена исходная модель 2D-M3 из этого же класса G_1^{2D} . Она представляет собой неоднородную верхнюю часть разреза. Результат применения универсальной палетки Π_1^{2D} представлен на рис. 6 б в виде найденного геоэлектрического разреза, который является первым приближением (1 этап инверсии) для построений последующих корректирующих НС-палеток (рис. 6 в-д). Значения ошибок $\bar{\varepsilon}_{i,r}$ НС-инверсии данных модели 2D-M3 для пяти ярусов блочной макросетки и различных этапов применения универсальной и корректирующих НС-палеток приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения ошибок $\bar{\varepsilon}_{i,r}$ НС-инверсии и невязок синтеза δ_i модели 2D-M2

| Ошибки $\bar{\varepsilon}_{i,r}$ НС-инверсии, % | | | | | |
|---|-------------------|------|------|------|---|
| № яруса сетки | Номер палетки i | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | $\bar{\varepsilon}_{1,r} / \bar{\varepsilon}_{4,r}$ |
| 1 | 0,13 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 1,3 |
| 2 | 1,29 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 12,9 |
| 3 | 5,48 | 1,97 | 0,78 | 0,56 | 9,8 |
| 4 | 6,85 | 3,08 | 1,42 | 1,14 | 6,0 |
| 5 | 17,61 | 7,46 | 2,74 | 2,10 | 8,4 |
| среднее | 6,27 | 2,55 | 1,03 | 0,80 | 7,8 |
| Невязки синтеза δ_i , % | | | | | |
| | 13,29 | 4,22 | 2,37 | 2,29 | 5,8 |

Анализ величин ошибок инверсии из табл. 1 в зависимости от номера этапа и визуальный анализ результатов инверсии (рис. 6 б-д) показывают существенное повышение точности результатов. При этом отношение ошибок инверсии на первом и последнем этапе применения палеток составляет $\varepsilon_1/\varepsilon_4 > 10$, а невязка синтеза уменьшается примерно в шесть раз.

Далее в разделе приводятся другие примеры НС-инверсии модельных данных. Приведенные примеры НС-инверсии 2D модельных данных показывают, что результаты, полученные НС-палеткой универсального вида, могут быть существенно улучшены с помощью применения серии корректирующих НС-палеток.

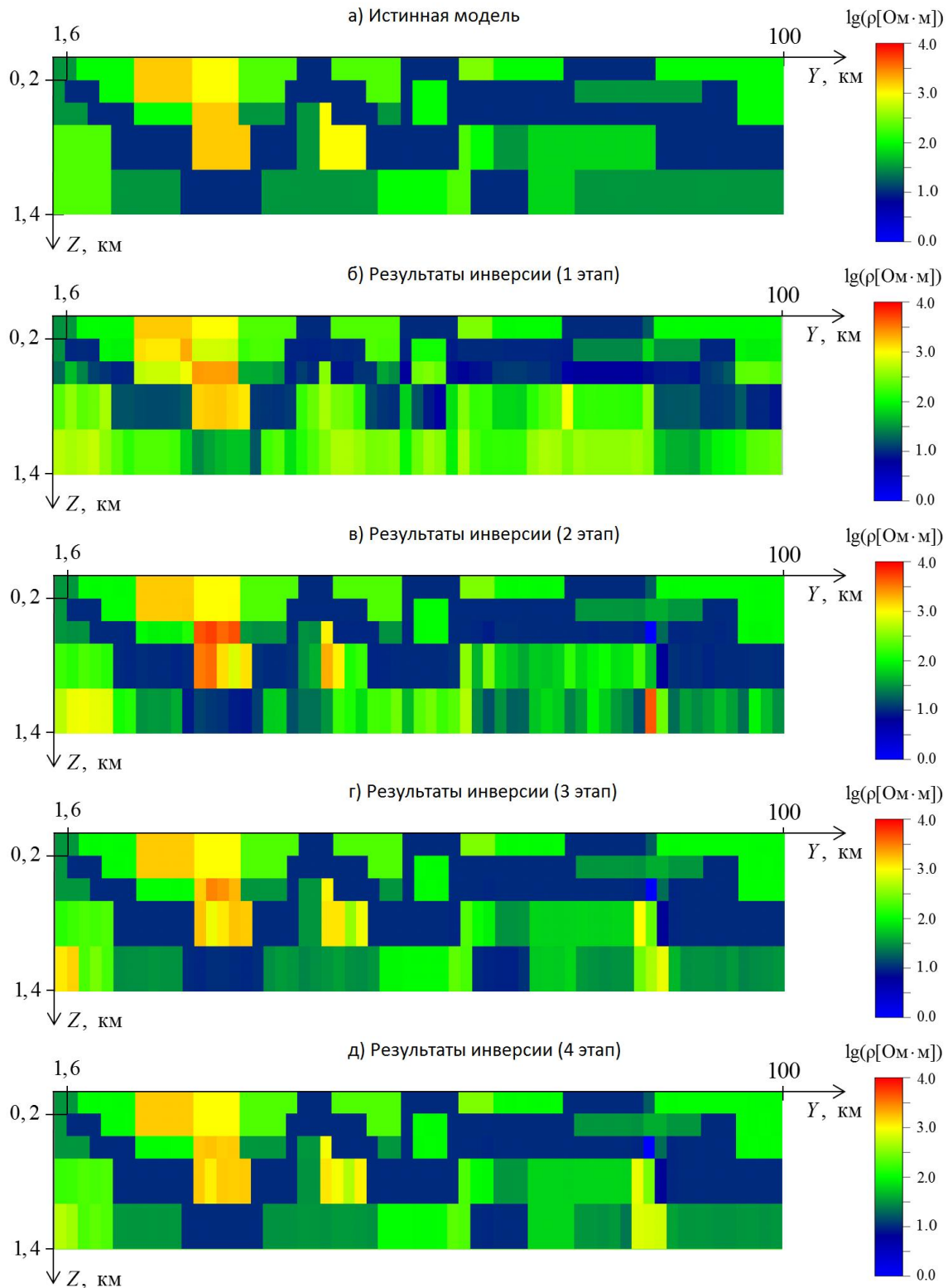


Рис. 6. Исходные данные и результаты инверсии модели 2D-M3, представляющей собой сложно построенную верхнюю часть разреза; а – исходная модель 2D-M3, б - результат применения универсальной палетки Π_1^{2D} ; в, г, д - результаты инверсии по серии корректирующих НС-палеток Π_i^{2D-M3} , $i = 2, 3, 4, 5$.

В разделе 4.3 на основе разработанной методики проведен анализ чувствительности параметров априорно заданного класса ФГМ для уточнения и выбора методики измерения в районе месторождения Голицыно. Для апробации НС-метода построены территориальные

палетки с учетом априорной информации о регионе (Енисей-Хатангский прогиб, Северо-Пясинский регион).

В разделе 4.4 приводятся результаты применения двухэтапной НС-инверсии на натуральных данных по электроразведочным полевым работам методом МТЗ в Краснодарском крае на субмеридиональном профиле Новороссийск-Славянск–Елизаветовка (региональный профиль №3 Кубанский по данным И.С. Фельдмана) в районе Западно-Кубанского краевого прогиба.

Заключение и выводы

Результаты проведенных исследований и численных экспериментов позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Для повышения эффективности интерпретации данных МТЗ на основе нейросетевых технологий решение обратной задачи необходимо рассматривать в рамках эффективно параметризованных классов ФГМ.
2. Эффективная параметризация класса ФГМ строится на основе компромисса между показателем чувствительности МТ-поля и необходимой детальностью исследуемой среды.
3. При построении параметризованных классов ФГМ с плавным изменением свойств по горизонтали целесообразно использовать технологию монотонных сплайнов, что приводит к повышению устойчивости результатов инверсии.
4. НС-оператор Ψ , построенный для заданного параметризованного класса ФГМ, в совокупности с эталонными ошибками инверсии и невязками синтеза представляет собой универсальную электронную НС-палетку $\Pi(\Psi, \Delta s, \Delta e)$, позволяющую проводить быструю «экспресс» инверсию МТ-данных в заданном классе сред.
5. Устойчивость НС-метода инверсии обеспечивается рядом регуляризирующих параметров, определяемых в процессе обучения НС-оператора: размер входного вектора - M , объем обучающего множества - P , сложность НС-конструкции - L , точка останова процесса обучения - τ .
6. Основное преимущество НС-палетки $\Pi(\Psi, \Delta s, \Delta e)$ - скорость решения ОЗ (доли секунды), возможность многократного применения и устойчивость инверсии в рамках класса ФГМ.
7. Многоэтапные корректирующие НС-палетки позволяют существенно (в 5-10 раз) улучшить результаты инверсии, но требуют дополнительных вычислительных ресурсов.
8. Классический нейросетевой метод инверсии в сочетании с технологией корректирующих палеток является эффективным инструментом интерпретации многомерных данных МТЗ в неоднородных средах.

Список основных публикаций по теме диссертации

Статьи по перечню ВАК:

1. Оборнев Е.А., Шимелевич М.И., **Оборнев И.Е.** Разработка алгоритмов параметризации геоэлектрических сред на основе монотонных сплайнов в задачах электромагнитных зондирований // Изв. вузов, Геология и разведка. 2010. №6. С. 55-58.
2. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Численные методы оценки степени практической устойчивости обратных задач геоэлектрики // Физика Земли. 2013. №3. С. 58-64.
3. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Численные методы оценки достоверности результатов интерпретации данных электромагнитных зондирований // Записки горного института. СПб, 2014 (в печати).
4. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Модифицированный нейросетевой метод решения обратной задачи МТЗ // Изв. вузов, Геология и разведка, 2013. №3. С. 46-52.

Прочие публикации:

5. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Численные методы оценки степени устойчивости обратных задач геоэлектрики в конечно-параметрических классах сред // Материалы Пятой всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли-ЭМЗ-2011. СПб.: СПбГУ, 2011. Т.2. С.139-141.
6. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Априорные оценки степени практической неоднозначности решений обратных задач геоэлектрики // Материалы 39-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского. Воронеж, 2012. С. 283-286.
7. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Численные методы оценки достоверности результатов интерпретации данных электромагнитных зондирований // Материалы X Международного геофизического научно-практического семинара "Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых". СПб, 2012. С. 66-70.
8. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.** Повышение эффективности аппроксимационного нейросетевого метода инверсии в обратных задачах геоэлектрики // Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Москва, ИФЗ РАН, 28 января – 1 февраля 2013. М., 2013. С. 376-379.
9. Шимелевич М.И., Оборнев Е.А., **Оборнев И.Е.**, Родионов Е.А. Аппроксимационно-итерационный метод решения обратной задачи геоэлектрики с использованием нейронных сетей // Тезисы докладов Четвёртой Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН, академика Европейской академии наук Л.Д. Кудрявцева. Москва, РУДН, 25 марта – 29 марта 2013. М., 2013. С. 474-475.