

На правах рукописи



Пономаренко Иван Александрович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ
ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель:	Муравина Ольга Михайловна доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»
Официальные оппоненты:	
Ведущая организация:	

Защита диссертации

С диссертацией можно ознакомиться

Отзывы на автореферат,

Автореферат разослан « » _____

Ученый секретарь диссертационного совета,

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диссертационная работа посвящена развитию метода системного анализа комплексных геофизических данных. Увеличение точности и объемов геофизических наблюдений, необходимость решения все более разнообразных и сложных геологических задач, с одной стороны, и развитие компьютерных технологий, с другой, создают предпосылки для привлечения в практику обработки и интерпретации геофизической информации новых методов комплексного анализа данных, способных повысить информативность геофизических исследований. Метод группового учета аргументов (МГУА) – это метод машинного обучения, базирующийся на идеях синергетики о самоорганизации сложных систем. МГУА является альтернативой традиционному регрессионному анализу и нейросетевому моделированию, которые в настоящее время широко используются в практике геолого-геофизических исследований. В отличие от методов регрессионного анализа МГУА использует не априорно заданную структуру модели, а создает и анализирует многоуровневое множество вариантов модельных уравнений, которые различаются не только численными коэффициентами, но и структурой и набором компонентов-факторов. Подобно нейронным сетям все модели формируются на обучающей последовательности, а оптимальная модель выбирается по минимальным значениям внешних критериев, рассчитываемых на тестовых данных, не участвующих в процедуре формирования моделей. В процедуре формирования и выбора модели используется многорядная селекция, т.е. фактически реализуется генетический алгоритм. МГУА позволяет избежать недостатков нейронных сетей, элементы обработки в которых ограничены аналогией с нейронами, в то время как в МГУА используются различные типы более мощных полиномиальных функциональных элементов. МГУА использует проверенные критерии оптимизации для автоматического определения размера и связности сети, а также элементов и коэффициентов для оптимальной модели, тем самым не только существенно оптимизируя

процесс моделирования, но и минимизируя вмешательство пользователя: самые значимые входные параметры выбираются автоматически, а полученная стохастическая зависимость имеет полиномиальный вид. Это расширяет возможности геологического истолкования полученных результатов и позволяет сравнивать вновь полученные модели с уже существующими. МГУА успешно зарекомендовал себя при решении естественно-научных, социальных и экономических задач, как в России, так и за рубежом: в англоязычных публикациях метод получил название Group Method of Data Handlin (GMDH). Несмотря на постоянно возрастающую популярность использования МГУА в различных сферах, в практике геолого-геофизических работ применение МГУА фактически ограничено исследованиями кафедры геофизики ВГУ. Первые попытки привлечения метода для анализа петрофизических данных и данных каротажа продемонстрировали его перспективность при работе с геолого-геофизической информацией. В работе был выполнен анализ МГУА с позиций его применения в геофизической практике, и было показано, что теория метода не противоречит основным методологическим принципам интерпретации геофизических данных. В дальнейшем МГУА был использован для решения широкого круга задач, часть из которых рассматривается в настоящей работе

Таким образом, диссертационное исследование направлено на развитие перспективного метода системного анализа геолого-геофизической информации. Создание и программная реализация алгоритма, адаптированного к работе с геолого-геофизическими данными, разработка практических приемов применения метода при изучении коллекторских свойств разреза, включение МГУА в качестве составляющего элемента в новый стохастический способ учета рельефа местности в комплексе с методом эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition (EMD)) для анализа геофизических полей, разработка

методологии обобщения и анализа петрофизической информации на основе МГУА является актуальным и современным исследованием.

Степень разработанности темы. Статистические способы оценки геофизических и петрофизических параметров широко используются в геофизической практике. Основы статистического подхода, предложенные А.А. Никитиным, А.В. Петровым и др., получили развитие в работах В.Н. Глазнева, П.И. Балка, А.С. Долгаля, Д.Ф. Калинина и др.

МГУА предложен академиком А.Г. Ивахненко в 1980-ые гг. В последние десятилетия в связи с развитием информационных технологий метод активно развивается и применяется в различных научных и прикладных сферах (экология, метеорология, гидрогеология и др.) как в России, так и за рубежом. Результаты применения метода показывают его эффективность при структурно-параметрической идентификации и прогнозировании развития сложных систем. Несмотря на предпосылки, в практике геофизических исследований МГУА ранее практически не применялся, до настоящего времени специализированного программного обеспечения, адаптированного к работе с геофизическими данными, разработано не было. В последнее десятилетие сотрудниками кафедры геофизики Воронежского госуниверситета проводятся исследования, направленные на изучение возможности МГУА для анализа разнородной геолого-геофизической информации.

Цель исследований. Целью исследований являлась разработка алгоритмического программного сопровождения и методики применения МГУА для решения задач, связанных с анализом геолого-геофизической информации: изучения коллекторских свойств разреза нефтегазоносных объектов месторождений Западной Сибири по данным ГИС, выявления сложных корреляционных связей в процессе анализа геофизических полей, обобщения петрофизических данных

Задачи исследований:

1. Разработка алгоритма МГУА, адаптированного к работе с геолого-геофизической информацией.
2. Использование МГУА для обобщения и анализа петрофизической информации.
3. Разработка практических способов применения МГУА при изучении коллекторских свойств разреза нефтегазоносных объектов месторождений Западной Сибири по данным ГИС.
4. Использование МГУА в комплексе с методом EMD для выявления неявных корреляционных взаимосвязей между магнитным полем и рельефом с целью учета влияния рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки.

Научная новизна работы:

1. Разработан новый алгоритм идентификационного моделирования МГУА, адаптированный к работе с геолого-геофизической информацией.
2. Разработана методология применения МГУА для решения задач, связанных с обобщением и анализом комплексных петрофизических данных.
3. Разработана методология применения МГУА для исследования коллекторских свойств разреза нефтегазоносных объектов по данным ГИС.
4. Реализовано включение МГУА в качестве одного из элементов нового стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны, численно реализованы и практически опробованы алгоритмы идентификационного моделирования МГУА, учитывающие специфику геолого-геофизической информации.
2. Разработана и опробована на практических примерах методика анализа и обобщения комплексных петрофизических данных с помощью МГУА.

3. Разработана и опробована на практических данных методология идентификационного моделирования, позволяющая выполнить оценку коллекторских свойств разреза по данным ограниченного комплекса методов ГИС.

4. Реализовано включение МГУА в качестве одного из элементов нового стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки и выполнено практическое опробование предложенной методики при редуцировании среднемасштабной аэромагнитной съемки, выполненной на северо-западном фланге Сибирской платформы.

Положения, выносимые на защиту:

Предложенный алгоритм и программа, реализующие методику идентификационного моделирования методом группового учета аргументов, адаптированы к работе с геолого-геофизической информацией. Алгоритм позволяет получить полиномиальные модели, позволяющие выполнять эффективный анализ комплексных геолого-геофизических данных.

Использование МГУА при работе с петрофизической информацией позволяет получить комплексную идентификационную модель, объединяющую несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость, использование которой позволяет автоматизировать процесс обобщения и анализа петрофизических данных, эффективно решить задачи робастного оценивания и идентификации данных, формализовать различные петрофизические параметры для включения в процедуру комплексной интерпретации геофизических полей.

Метод группового учета аргументов позволяет получить модельные уравнения, связывающие геологические характеристики и данные ГИС, позволяющие выполнить оценку коллекторских свойств разреза и выявить наиболее эффективные методы.

Включение метода группового учета аргументов в процедуру стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации

данных аэромагниторазведки позволяет идентифицировать частотные составляющие магнитного поля наиболее тесно связанные с высотными отметками рельефа.

Личный вклад. Автором разработано и практически опробовано программное обеспечение, реализующее многорядный комбинаторный алгоритм идентификационного моделирования методом группового учета аргументов адаптированный для работы с геолого-геофизической информацией.

Совместно с О.М. Муравиной впервые сформулированы основные положения методологии идентификационного анализа петрофизических данных.

Автором самостоятельно выполнено идентификационное моделирование с использованием практических данных ГИС нефтегазоносных объектов месторождений Западной Сибири, на основании которого совместно с О.М. Муравиной и А.А. Аузиным разработаны методические приемы применения МГУА для изучения коллекторских свойств разреза по данным ГИС.

Автором были самостоятельно выполнены расчеты, реализующие использование метода группового учета аргументов в процедуре нового стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки.

Степень достоверности результатов:

1. Разработанная методология идентификационного моделирования при изучении коллекторских свойств разреза опробована при анализе данных ГИС нефтегазоносных районах Западной Сибири.

2. Технология учета рельефа местности, основанная на синтезе метода эмпирической модовой декомпозиции и МГУА реализована при редуцировании среднемасштабной аэромагнитной съемки в Восточной Сибири.

Апробация результатов исследования: Результаты выполненной работы доложены на следующих конференциях и семинарах: Международные семинары «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» им. Д.Г. Успенского (Москва, 2017; Казань, 2018; Пермь, 2019) и семинар Успенского-Страхова (Воронеж, 2020; Санкт-Петербург, 2022). Научные чтения памяти Ю.П. Булашевича «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей» (Екатеринбург, 2019). Международные конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021). Международная конференция «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ-РГГРУ)» (Москва, 2018). XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике. (Екатеринбург, 2018). Школа-семинар «Аппроксимационные подходы и анализ геофизических данных» (Москва-Сочи, 2020).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 30 публикациях, 7 из которых относятся к рецензируемым научным изданиям, включенным в перечень ВАК, 2 – в издании, включенном в международную базу Web of Science.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации 116 страница текста, включая 34 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 120 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность работы, разработанность темы исследований, теоретическая и практическая значимость, научная новизна, формулируются цель, задачи исследования и защищаемые положения, приводятся сведения о личном вкладе автора, об апробации результатов и структуре диссертации.

В *первой главе* приведены основные положения метода группового учета аргументов. В первой части рассмотрены предпосылки использования метода для анализа сложных систем и задачи, эффективно решаемые МГУА. Во второй части первой главы дан обзор методов индуктивного моделирования, используемых при решении геолого-геофизических задач, и приведены аргументы, доказывающие, что МГУА является альтернативным инструментом моделирования, который имеет ряд достоинств, по сравнению с традиционными способами машинного обучения и регрессионного анализа. В третьей части первой главы представлены результаты применения МГУА в геолого-геофизической отрасли. В четвертой части первой главы изложены теоретические основы метода и реализующие его комбинаторные и многорядные селекционные алгоритмы. Заключительная часть первой главы посвящена непосредственной методике идентификационного моделирования МГУА и рассмотрению структуры возможных модельных уравнений в зависимости от уровня генерации моделей. Структура модельных уравнений зависит от номера частного описания и уровня генерации моделей. В приведенных далее примерах оптимальные уравнения были получены на первом или втором уровне генерации моделей. Модели первого уровня имеют вид одного из семи уравнений (частных описаний):

$$Y_1 = a_1 + a_2 \cdot x_i \cdot x_j \quad (1)$$

$$Y_2 = a_1 + a_2 \cdot x_i \quad (2)$$

$$Y_3 = a_1 + a_2 \cdot x_j + a_3 \cdot x_i \cdot x_j \quad (3)$$

$$Y_4 = a_1 + a_2 \cdot x_j \quad (4)$$

$$Y_5 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_i \cdot x_j \quad (5)$$

$$Y_6 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_j \quad (6)$$

$$Y_7 = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_j + a_4 \cdot x_i \cdot x_j \quad (7)$$

Здесь $Y_1 - Y_7$ – варианты модельных значений зависимой переменной; a_1, a_2, a_3, a_4 – числовые коэффициенты; x_i и x_j – пара переменных-аргументов, выбранная из входных данных. При переходе в следующий ряд модельные уравнения усложняются, так как в качестве переменных-аргументов выступают модели предыдущего ряда. Например, в общем виде модельное уравнение второго ряда можно записать следующим образом:

$$Z_k = f(Y_i, Y_j, b_1, b_2, b_3, b_4), \quad (8)$$

где Z_k – модельные значения зависимой переменной; k – номер частного описания; Y_i, Y_j – переменные аргументы – модели первого ряда (1) – (7); b_1, b_2, b_3, b_4 – числовые коэффициенты.

Во второй главе приведено описание многорядного алгоритма МГУА с комбинаторным перебором вариантов, адаптированного к работе с геолого-геофизическими и петрофизическими данными, и рассмотрены основные блоки и параметры работы разработанного программного обеспечения. Программный продукт, реализованный на языке СИ++, был запатентован (регистрационное свидетельство № 2021617896).

Разработанное программное обеспечение эффективно решает следующие задачи: обработка как малых, так и больших объемов информации; работа с данными специальных форматов, используемых в практике геофизических измерений; возможность ротации зависимой переменной и переменных-аргументов. В программе оптимизированы процедуры ввода-вывода данных, предусмотрена визуализация промежуточных результатов моделирования и возможность, при необходимости, корректировки параметров работы алгоритма.

В главах 1 и 2 раскрывается первое защищаемое положение *«Предложенный алгоритм и программа, реализующие методiku идентификационного моделирования методом группового учета аргументов, адаптированы к работе с геолого-геофизической информацией. Алгоритм позволяет получить полиномиальные модели, позволяющие выполнять эффективный анализ комплексных геолого-геофизических данных».*

В главе 3 приводится методика и результаты применения МГУА для анализа и систематизации петрофизических данных. Результат применения МГУА - комплексное идентификационное уравнение, которое может объединять не только петрофизические параметры, но и пространственные и геологические атрибуты. Совместно с традиционной статистической обработкой анализ петрофизических данных на основе идентификационных моделей позволяет выявить и исключить выбросы в данных, идентифицировать принадлежность образца к тому или иному петрографическому типу пород или структурно-вещественному комплексу, Идентификация петрофизических данных позволяет избежать потери первичной информации, уточнить связи между петрофизическими и геологическими признаками и в результате получить более достоверные статистические оценки петрофизических параметров пород различных структурно-вещественных комплексов. Установленные взаимосвязи между различными петрофизическими, геологическими, пространственными данными, используются в процессах геофизической интерпретации, пространственном моделировании и переходе от геофизических моделей к геологическому строению среды. Методика применения МГУА для анализа и систематизации петрофизических данных была разработана и опробована на этапах формирования и использования цифровой пространственно-петрофизической базой данных осадочных и кристаллических пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). База данных содержит информацию о плотности, скорости продольных волн, магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, удельном

сопротивления, поляризуемости и радиоактивности пород: свыше 90000 петрофизических определений из 447 скважин.

Идентификация пород по комплексу петрофизических параметров

Рассмотрим пример использования комплексных моделей МГУА для идентификации нерасчлененных пород михайловской серии. Породы михайловской серии относятся к верхнему архею и подразделяются на две свиты: нижнюю александровскую и верхнюю лебединскую. Имеется значительная часть петрофизических определений на образцах, принадлежность которых к конкретной свите не установлена. Такие данные отнесены к породам нерасчлененной михайловской серии.

Для получения структурно-параметрических уравнений были использованы петрофизические и пространственные характеристики, относящиеся к породам наиболее полно представленной (петрофизические определения для 1396 образцов) александровской свиты. Были сформированы репрезентативные входные таблицы для пород тех литологических типов, которые присутствовали и в данных, отнесенных к нерасчлененной михайловской серии. В результате были получены структурно-параметрические уравнения для следующих типов пород: амфиболиты, гнейсы, мигматиты, плагиомигматиты и сланцы. Все уравнения были получены на первом уровне генерации моделей и относятся к одним из семи возможных частных описаний первого ряда (1.1-1.7). Достоверность моделей оценивалась по значению среднеквадратичной погрешности оценки модельных и экспериментальных значений плотности. В качестве зависимой переменной для всех моделей была использована плотность образца, а переменными-аргументами, автоматически выбранными из входной таблицы петрофизических и пространственных атрибутов, стали поляризуемость, магнитная восприимчивость, скорость продольных волн, глубина отбора образца и долгота расположения скважины. На рис.1 представлены результаты идентификационного анализа мигматитов александровской свиты. Модель вида (7) позволяет оценить плотность по значению магнитной

восприимчивости и долготе расположения скважины. Для 42 образцов (93%), задействованных в процедуре формирования модельного уравнения, расхождение модельных и экспериментальных значений плотности находится в интервале ± 0.02 г/см³. Полученная зависимость была проверена на 52 образцах мигматитов михайловской серии. В результате для 7 из них абсолютная погрешность оценки плотности также не превысила ± 0.02 г/см³, что позволило предположить их принадлежность к породам александровской свиты (рис. 1.). В итоге из задействованных в процедуре идентификации 103 образцов нерасчлененной михайловской серии 25 образцов пород по 10 скважинам предположительно относятся к породам александровской свиты.

На рисунке 3 представлен фрагмент геологической карты и положение скважины № 2921, образцы из которой первоначально были отнесены к породам нерасчлененной михайловской серии. Из рисунка видно, что вероятность того, что скважиной № 2921 вскрыты породы александровской свиты весьма высока, что подтверждает результаты идентификационного анализа МГУА.

Робастное оценивание экспериментальных петрофизических данных

Предлагаемая методика робастного анализа петрофизических данных предполагает выполнение нескольких этапов. На первом этапе выполняется расчет статистических характеристик: определяются среднее, медианные значения, дисперсия и стандартное отклонение. Наиболее вероятные границы вариаций параметра оцениваются по значениям 5% и 95% квантилей. Для плотности и скорости распространения упругих волн справедлив нормальный закон распределения. Для магнитных параметров и значений удельного электрического сопротивления предполагаем логнормальный закон распределения и, соответственно, рассматриваем десятичные логарифмы значений параметров.

На втором этапе рассчитываются идентификационные модели МГУА. Сравнение модельных и экспериментальных значений зависимой переменной позволяет выявить и классифицировать выбросы. Выбросом

будем считать только те позиции, в которых расхождение экспериментальных и модельных значений превышает величину стандартного отклонения. Рассмотрим методику идентификации выбросов на основе использования модельных уравнений МГУА.

Если экспериментальные и модельные значения выходят за границы диапазона разброса данных, но разница между ними не превышает величину стандартного отклонения, следовательно значения соответствуют идентификационному уравнению и могут быть вызваны естественными вариациями физических свойств (1 тип).

Если экспериментальные данные выходят за пределы достоверного диапазона, а модельные значения за границы диапазона не выходят, при этом разница модельных и экспериментальных значений превышает стандартное отклонение, то эти значения экспериментальных данных являются выбросами (2 тип).

Если за рамки установленного диапазона выходят модельные значения зависимой переменной, то причиной может быть выброс в экспериментальных значениях переменных-аргументов, которые формируют модельное уравнение (3 тип).

В качестве примера рассмотрим результаты робастного оценивания габброноритов мамонского комплекса (данные по 53 образцам), отобранных из одной скважины (рис.3). Полученное на 2 ряду идентификационное уравнение (8) связывает плотность (σ) со скоростью распространения упругих волн (V), намагниченностью (κ) и поляризуемостью (η): $\sigma = f(V, \kappa, \eta)$. Среднее значение плотности составляет 3.04 г/см^3 , границы достоверного диапазона по значениям квантилей 5% и 95% порядка составляют 2.96 г/см^3 и 3.14 г/см^3 . Среднеквадратичное отклонение исходных значений плотности равно 0.05 г/см^3 , а среднеквадратичная невязка модельных и экспериментальных значений не превышает 0.03 г/см^3 , что свидетельствует о высоком качестве полученной зависимости. Для образца № 3 очевиден выброс первого типа. Анализ значений переменных-аргументов показывает,

что этот образец, помимо плотности, имеет также аномально высокое значение поляризуемости (18.9% при среднем 1.5%). Петрофизические определения для образцов № 12 и № 53 относятся к выбросам второго типа.

Таким образом, применение идентификационных уравнений, полученных МГУА, с одной стороны, позволяет автоматизировать процедуру выявления выбросов при работе с большим объемом информации, а с другой стороны, обеспечивает гибкий подход, позволяющий максимально полно использовать уникальные экспериментальные данные.

Выявление корреляционных взаимосвязей между петрофизическими параметрами

Приведем пример, показывающий, что с помощью МГУА можно получить комплексные модели, связывающие плотность метаморфических и интрузивных пород ВКМ с удельным электрическим сопротивлением и магнитной восприимчивостью. Была сформирована выборка данных о петрофизических параметрах пород, представляющих наиболее распространенные в пределах ВКМ магматические, вулканогенно-осадочные и метаморфические образования. Объем выборки составил 224 образца. Для каждой группы были рассчитаны средние значения и стандартные отклонения плотности и логарифмов удельного электрического сопротивления и магнитной восприимчивости. Были получены комплексные модельные уравнения, связывающие средние значения плотности с логарифмом удельного сопротивления и логарифмом магнитной восприимчивости (рис.4):

$$\bar{\sigma} = a_1 + a_2 \overline{\log \rho} + a_3 \overline{\log \kappa} + a_4 \overline{\log \rho} \cdot \overline{\log \kappa} \quad (9)$$

Полученные результаты могут быть эффективно использованы в процедуре комплексной инверсии геофизических полей при изучении строения верхней части земной коры.

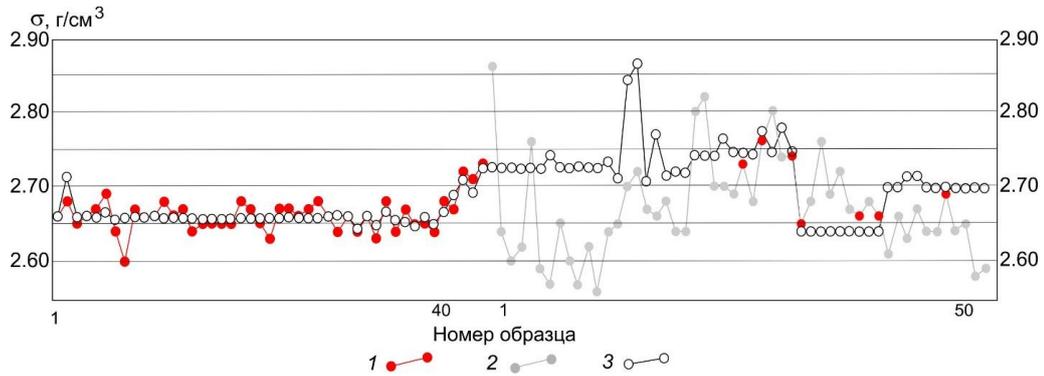


Рис. 1. Идентификация мигматитов нерасчлененной михайловской серии: 1 – экспериментальные значения плотности мигматитов александровской свиты; 2 – экспериментальные значения плотности мигматитов нерасчлененной михайловской серии; 3 – модельные значения плотности

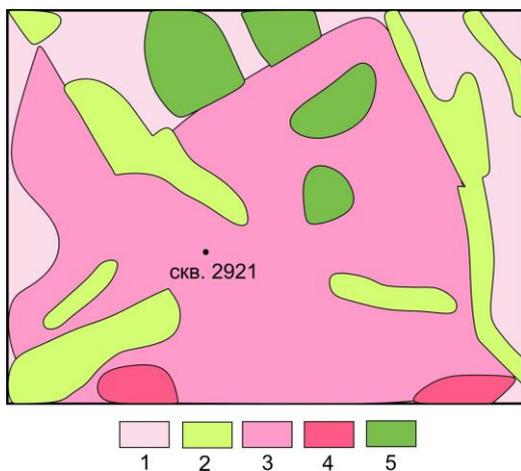


Рис. 2. Фрагмент геологической карты курского блока ВКМ: 1 – обоянская серия (AR_{1ob}); 2 – александровская свита (AR_{2al}); 3 – плагиограниты салтыковского комплекса ($pyAR_{2sl}$); 4 – щелочные граниты атаманского комплекса ($dyAR_{2a}$); 5 – габброиды смородинского комплекса (vPR_1^{1sm})

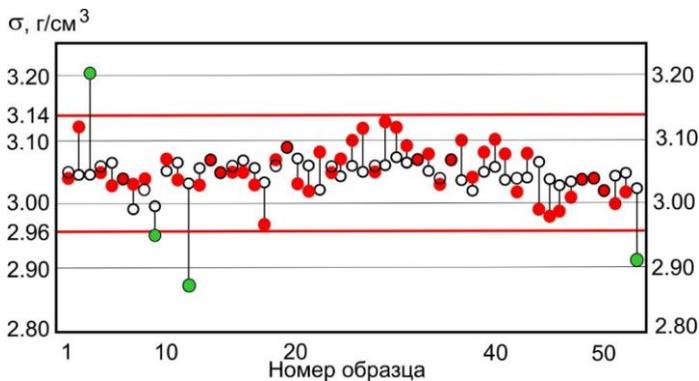


Рис. 3 Идентификация выбросов на примере габброноритов мамонского комплекса: красные кружки соответствуют экспериментальным значениям скорости упругих колебаний; незаполненные – модельным; зеленые – выбросы 1 и 2 типа. Границы достоверного диапазона данных 2.96 – 3.14 г/см³ обозначены красным цветом

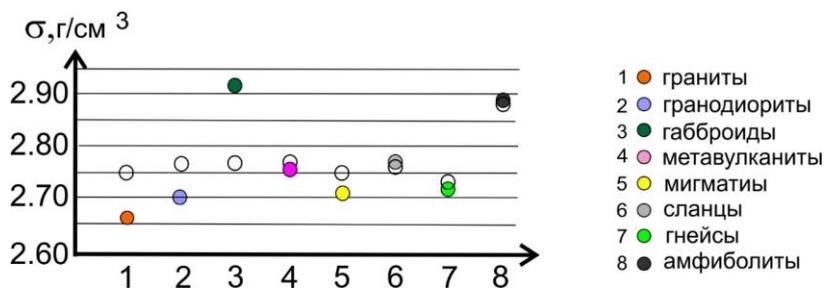


Рис. 4. Экспериментальные (цветные кружки) и модельные (незакрашенные кружки) средних значений плотности основных литологических типов кристаллических пород ВКМ

Описанная в **3 главе** методика и приведенные примеры ее использования обосновывают второе защищаемое положение: *«Использование МГУА при работе с петрофизической информацией позволяет получить комплексную идентификационную модель, объединяющую несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость, использование которой позволяет автоматизировать процесс обобщения и анализа петрофизических данных, эффективно решить задачи робастного оценивания и идентификации данных, формализовать различные петрофизические параметры для включения в процедуру комплексной интерпретации геофизических полей».*

В **главе 4** описываются результаты исследований, направленных на оптимизацию методики изучения коллекторских свойств разреза по данным ГИС. Идентификационное моделирование было выполнено по результатам геофизических исследований 16 скважин на 4 нефтегазовых месторождениях Западной Сибири. Общий объем использованных данных превысил 100 тысяч точек наблюдений, каждой из которой соответствовал набор данных комплекса ГИС, получено свыше 200 модельных уравнений. В результате были определены основные методические приемы, позволяющие с высокой степенью надежности решить поставленную задачу - выделение пластов-коллекторов и определение типа флюидонасыщения коллектора по комплексу каротажных данных:

1. Установлено, что при увеличении последовательности наблюдений свыше 700 значений качество моделирования начинает закономерно ухудшаться. Минимумы внешних критериев получены для значений 150 и 400. Было рекомендовано постепенное увеличение размера последовательности наблюдений до значений, не превышающих 400-600 (рис. 5).

2. Определена последовательность идентификационного моделирования МГУА с целью выделения в разрезе пластов коллектора. На первом этапе используются данные ГИС по эталонной скважине, для которой

по данным ГИС и по результатам опробования и петрофизических исследований определены интервалы коллектора и сделана оценка его типа. Геологические данные формализуются введением условного идентификатора коллектора (IdK), который используется в качестве зависимой переменной и принимает условные числовые значения, соответствующие коллектору, его типу и вмещающим породам. В результате получают модельные уравнения, отражающие корреляционные зависимости между идентификатором коллектора и геофизическими параметрами по данным нескольких методов комплекса ГИС в определенных геологических условиях. Анализ модельных уравнений позволяет также оценить используемые методы ГИС с точки зрения их информативности для выявления интервалов коллектора и определения его типа в разрезе. На втором этапе осуществляется применение идентификационных моделей на рядовых скважинах.

Применение уравнений позволяет повысить надежность интерпретации геофизических данных ГИС, особенно при условии их цифровой регистрации.

Рассмотрим примеры идентификации коллектора среди вмещающих пород и определение его типа.

1. В качестве исходных данных были использованы результаты геофизических исследований разведочной скважины на месторождении Южно-Русское. Зависимыми переменными назначался условный идентификатор коллектора, принимающий значение 0 для вмещающих пород и значение 100 для коллектора любого типа. В качестве переменных аргументов привлекались данные геофизических исследований в скважинах. Модель, полученная на первом ряду селекции, структура уравнения определяется зависимостью вида (7): $IdK = f(IK, DS)$, где IdK – идентификатор коллектора; IK – данные индукционного каротажа, DS – данные кавернометрии (рис.6). Модельное уравнение позволяет однозначно идентифицировать коллектор по данным индукционного каротажа и результатам кавернометрии.

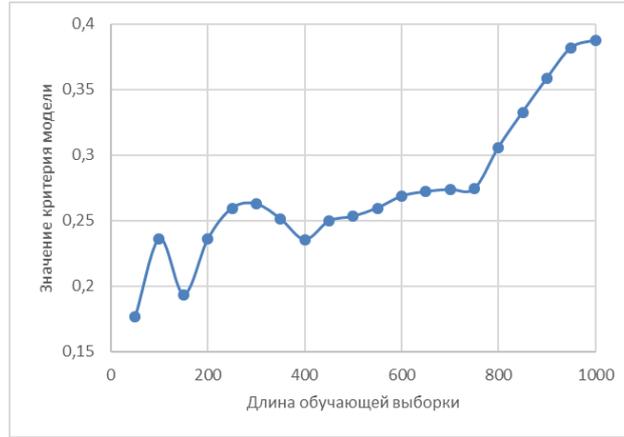


Рис. 5. Зависимость качества модели от длины обучающей выборки

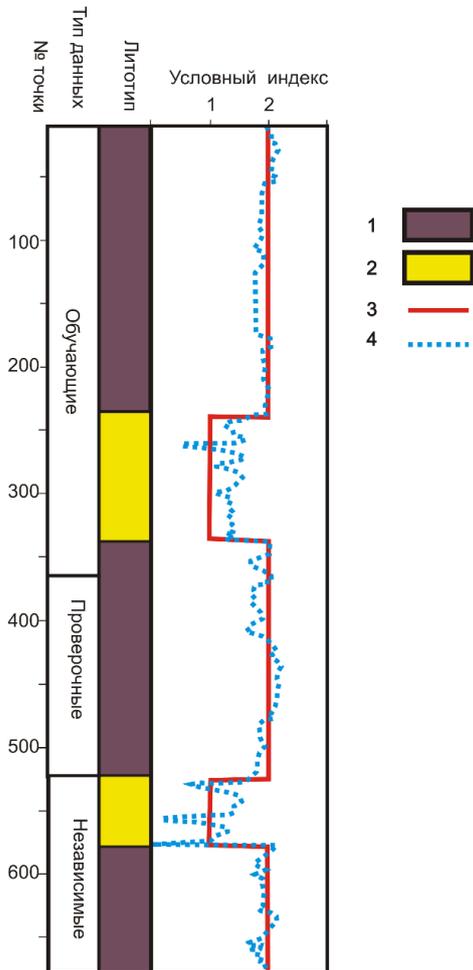


Рис. 6. Идентификация коллектора среди вмещающих пород: 1 – интервал коллектора; 2 – вмещающие породы; 3 – экспериментальные значения идентификатора коллектора; 4 – модельные значения идентификатора коллектора

2. Модель, полученная на эталонной скважине (месторождение Ватьеганское), была проверена на независимых наблюдениях рядовых скважины (рис. 7, а). Зависимая переменная (Idk) принимает значения 0 – для вмещающих пород и 100 для коллектора. Оптимальная модель, полученная на втором ряду селекции, описывается уравнением вида (8) и позволяет

рассчитать условный индекс коллектора по наблюдаемым значениям различных методов каротажа: $IdK = f(DS, MGZ, IK, PS, KS)$, где DS – данные кавернометрии; MGZ – показания микроградиент зонда, IK – данные индукционного каротажа, PS – результаты каротажа самопроизвольной поляризации, KS – данные каротажа сопротивления. Зоны коллекторов в разрезе на рядовой скважине, установленные с помощью идентификационного моделирования, хорошо коррелируются с результатами независимой интерпретации данных каротажа, выполненной традиционными способами.

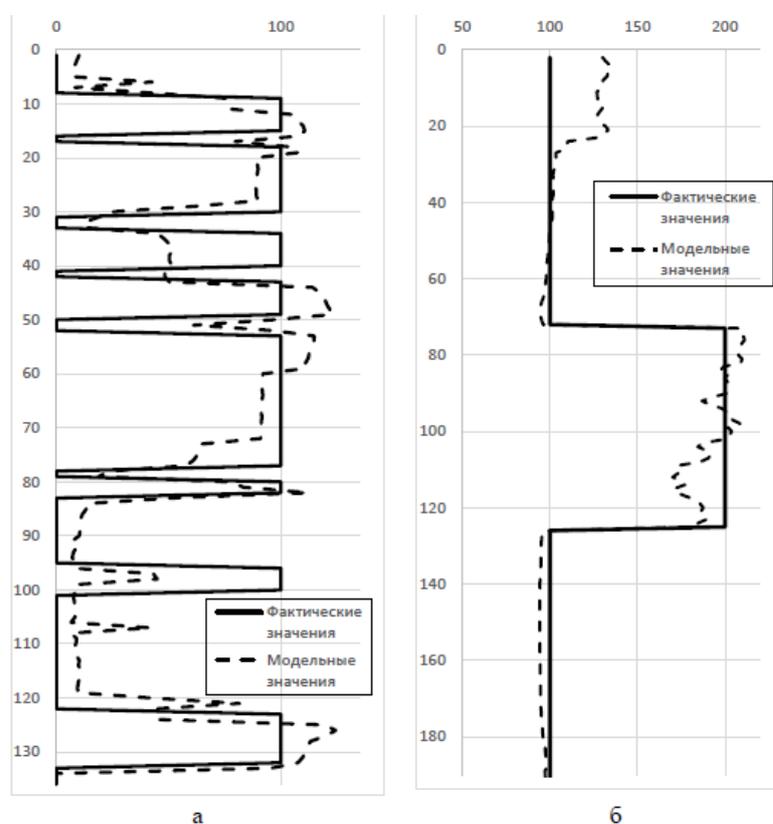


Рис. 7. Результаты идентификационного моделирования по данным каротажа: а - выделение коллектора с использованием независимых данных по соседней скважине; б - определение типа коллектора.

Для определения характера флюидонасыщения коллектора, был сформирован синтетический входной массив, который содержал данные, соответствующие либо нефтяному, либо водонасыщенному коллектору. В качестве зависимой переменной был использован условный индекс, принимающий значение 100 для водоносного коллектора и значение 200 для нефтеносного. Оптимальная модель второго ряда (8) имеет следующий вид:

$IdK = f(DS, KS, NKT)$, где DS – данные кавернометрии (диаметр скважины); KS – данные каротажа сопротивления (потенциал-зонд). NKT – результаты нейтронного каротажа. Характер модельных и экспериментальных данных представлен на рис. 7, б.

3. Приведем пример, демонстрирующий возможности оценки фильтрационно-емкостных свойств разреза с привлечением методики МГУА по данным комплексов каротажа. Для формирования обучающей последовательности в качестве зависимой переменной были использованы осредненные значения пористости ядра продуктивного пласта. В результате идентификационного моделирования на третьем ряду селекции было получена зависимость, позволяющая рассчитать коэффициент пористости по данным четырех градиент-зондов разной длины и гамма-каротажа. Соответствие фактических и модельных значений коэффициента пористости представлено на рис. 8.

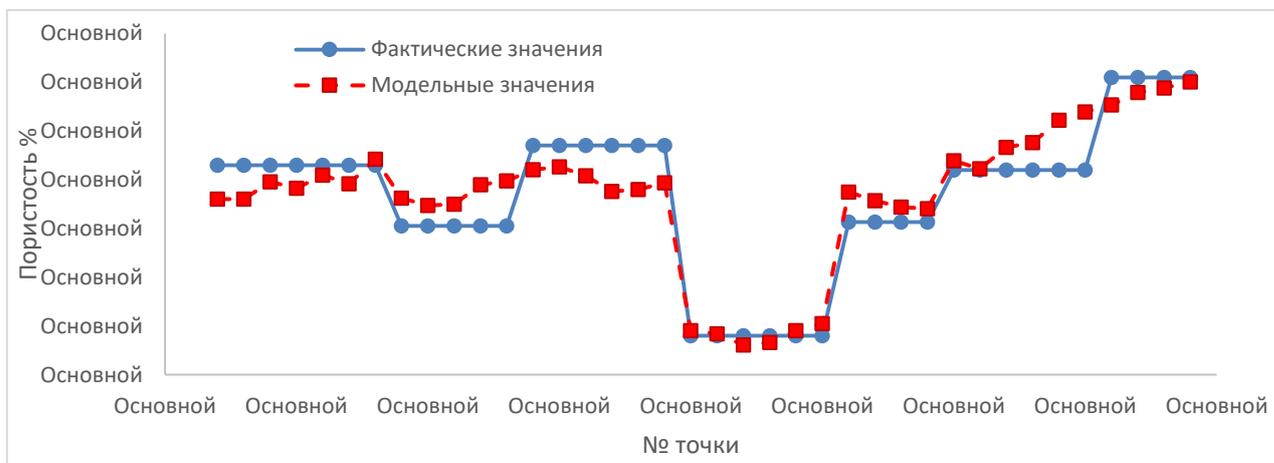


Рис. 8. Соответствие фактических и модельных значений коэффициента пористости

Описанная в **четвертой главе** методика и приведенные примеры ее использования обосновывают третье защищаемое положение:

«Метод группового учета аргументов позволяет получить модельные уравнения, связывающие данные геофизических исследований скважин и геологические характеристики, позволяющие выполнить оценку коллекторских свойств разреза и выявить наиболее эффективные геофизические методы».

В *главе 5* описывается использование МГУА в комплексе с методом эмпирической модовой декомпозиции, с целью учета влияния рельефа местности при проведении крупномасштабных аэромагнитных съемок.

Традиционный стохастический способ оценки аномального эффекта рельефа основан на выявлении взаимосвязи между полем и высотными отметками рельефа. Предложенный А.С. Долгалем новый способ определения поправки за рельеф основан на последовательном применении метода эмпирической модовой декомпозиции (ЭМД) и МГУА и позволяет выявить скрытые, возможно, нелинейные взаимосвязи между полем и рельефом земной поверхности в определенных диапазонах пространственных частот. Метод ЭМД позволяет представить аномальное магнитное поле и рельеф в виде суммы эмпирических модовых функций (ЭМФ), а МГУА выявляет наиболее тесные функциональные взаимосвязи между ЭМФ составляющими магнитного поля и высотными отметками рельефа. Первый опыт применения метода на отдельных профилях подтвердил перспективность предложенного подхода. Далее метод был использован при редуцировании результатов аэромагнитной съемки масштаба 1:100 000–1:50 000, выполненных в 1962-81 гг. в северо-западной части Сибирской платформы на территории общей площадью 316000 км² и включающей платобазальты плато Путораны (рис. 9, а, б). Методом ЭМД аномальное магнитное поле и высотные отметки рельефа были представлены в виде суммы шести компонент ЭМФ (δT_1 – δT_6 ; H_1 – H_6) и остаточных составляющих (δT_r ; H_r). Затем с помощью идентификационного анализа МГУА были установлены значимые статистические связи, между низкочастотными компонентами δT_4 – δT_6 , δT_r и H_4 , H_5 и H_r . Это позволило ввести поправку за рельеф, как суммарную компоненту поля, коррелирующую с рельефом местности, которая обеспечивает свыше 40% от энергии наблюдаемого поля:

$$\delta T_p = \sum_{k=4}^{k=6} \delta T_k + \delta T_r^*, \quad (9)$$

где δT_r^* – уточненная МГУА остаточная составляющая магнитного поля.

Однако полностью исключить влияние рельефа не удалось. Одной из причин этого стала существенная неоднородность территории по характеру магнитного поля и рельефа, из-за которой универсальная единая оценка поправки за рельеф в различных частях площади исследований была в разной степени эффективной. Для оптимизации методики применения МГУА было выполнено пространственное районирование территории с использованием модуля Spatial Analyst в системе ArcGIS 9 на основе совместного качественного анализа амплитуд аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа. В результате площадь исследования была разделена на классы с учетом особенностей магнитного поля и рельефа. На заключительном этапе было проведено идентификационное моделирование МГУА в пределах выделенных классов и определены взаимосвязанные с рельефом составляющие магнитного поля.

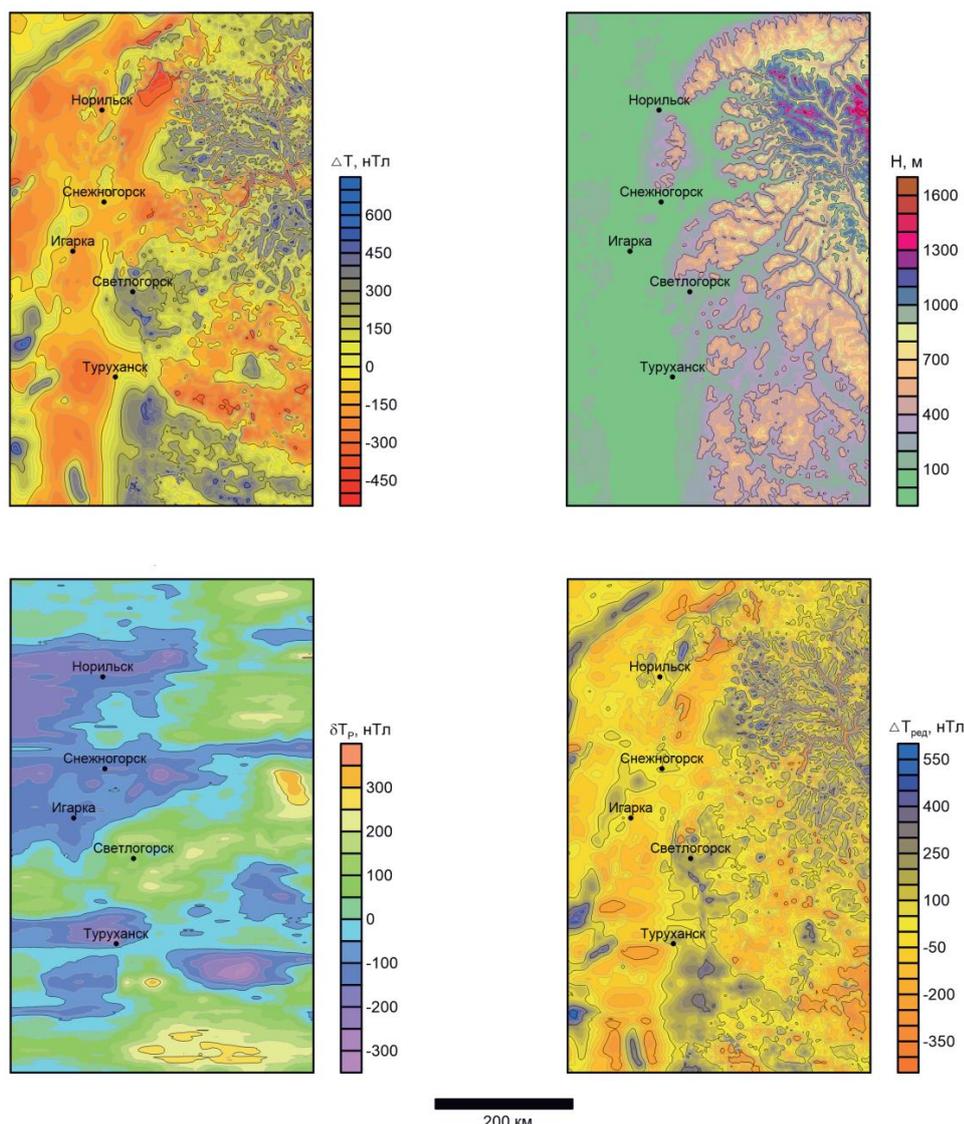
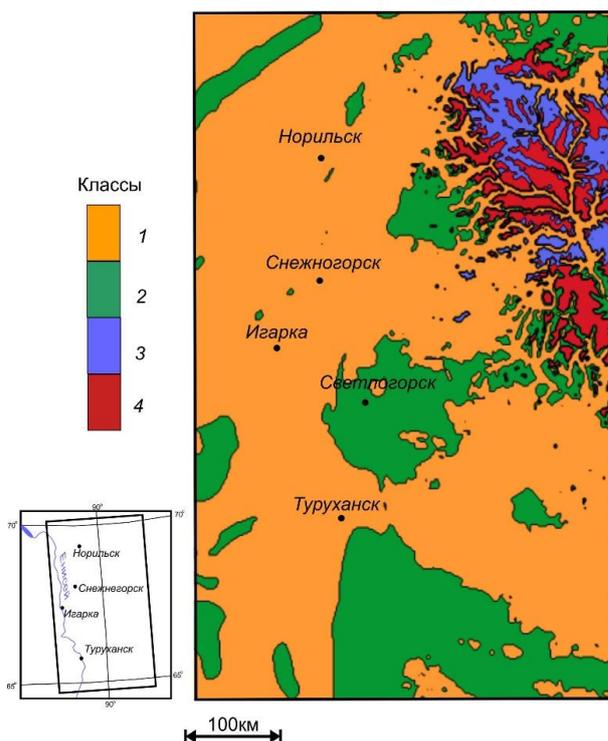


Рис. 9. Результаты редуцирования (EMD и МГУА): а - аномальное магнитное поле ΔT ; б - высоты рельефа дневной поверхности H ; в - составляющая поля δT_p , обусловленная влиянием рельефа; г - редуцированное магнитное поле $T_{ред}$.

В качестве классификационных признаков были использованы интенсивность аномального магнитного поля и высотные отметки рельефа.

В результате реклассификации признаков их значения были приведены к единой условной шкале. В качестве признаковой шкалы были взяты целые числа в интервале от 1 до 2, что разделяет каждый из признаков на два класса. На основании статистических оценок для магнитного поля выделено два класса отрицательные и слабо положительные аномалии интенсивностью до 100 нТл и положительные аномалии свыше 100 нТл. Для рельефа граница классов прошла по отметке 800 м (рис. 10, а,б).

а



б

Классы		Высотные отметки рельефа (м)	
		0 ÷ 799	800 ÷ 1575
Магнитное поле (нТл)	- 500 ÷ 99	1 класс rT	3 класс $T6$
	100 ÷ 700	2 класс $T3, T4, T5, T6, rT$	4 класс $T6, rT$

в

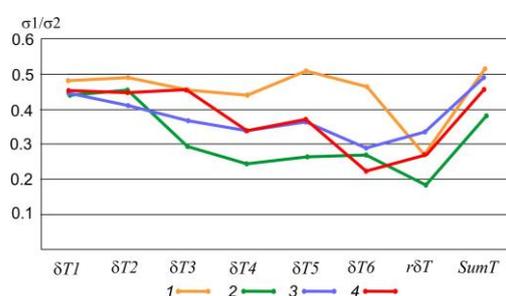


Рис. 10 Результаты идентификационного моделирования: а – пространственная типизация площади исследования по значению комплексного признака; б – таблица реклассификации аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа; в – средние значения σ_1/σ_2 для моделей, полученных для ЭМФ-составляющих магнитного поля в пределах выделенных классов в соответствии с таблицей: 1 – класс 1; 2 – класс 2; 3 – класс 3; 4 – класс 4

Идентификационное моделирование МГУА было выполнено на 10 пилотных профилях автономно для каждого класса. В результате получены модельные уравнения, связывающие значения магнитного поля анализируемой компоненты с двумя и более компонентами рельефа. Поскольку в пределах профиля статистические характеристики интенсивности магнитного поля и его частотных компонент меняются в широких пределах, в качестве независимой оценки качества итоговых моделей использовалось отношение среднеквадратичной невязки модельных и наблюдаемых значений ЭМФ магнитного поля к стандартному отклонению значений магнитного поля (σ_1/σ_2). На рис. 10, в представлены кривые,

характеризующие усредненные значения σ_1/σ_2 для моделей, полученных для ЭМФ-составляющих магнитного поля в пределах выделенных классов.

Описанная в пятой главе методика и приведенные примеры ее использования обосновывают третье защищаемое положение:

«Реализовано включение МГУА в качестве одного из элементов нового стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки и выполнено практическое опробование предложенной методики».

Заключение. Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан и численно реализован алгоритм, адаптированный к работе с геолого-геофизическими данными, позволяющий регулировать объем обрабатываемой информации, выполнять ротацию зависимой переменной и переменных-аргументов, а также работать с данными специальных геофизических форматов. В программе обеспечена возможность визуализации промежуточных и окончательных результатов, интерактивный выбор параметров моделирования и оптимальных моделей. Программное обеспечение, позволяет эффективно использовать метод группового учета аргументов для обработки и анализа геолого-геофизической информации, что подтверждают положительные результаты, полученные при работе с реальными геофизическими данными.

2. Предложена и опробована на практических примерах методика выполнения идентификационного моделирования МГУА с целью изучения коллекторских свойств разреза по данным каротажа. Предложен автоматизированный способ объединения геологической информации и результатов каротажа, что необходимо для формирования таблицы входных данных. Разработана технология идентификации коллектора в разрезе по комплексу метода каротажа. Предложены способы оценки фильтрационно-емкостных свойств разреза, таких как определение типа флюидонасыщения и коэффициента пористости, основанные на формировании

идентификационных уравнений МГУА по данным комплекса геофизических наблюдений в скважинах.

3. Реализовано и практически опробовано использование МГУА в комплексе с методом эмпирической модовой декомпозиции, как нового инструмента в стохастическом способе учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки. На основе объективного анализа данных магниторазведки и обобщения результатов использованной методики были сформулированы способы повышения результативности идентификационного анализа МГУА при решении задач такого рода.

В 2018 г. исследования были поддержаны грантом РФФИ, направленным на развитие МГУА для анализа геолого-геофизической информации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Муравина О. М., Пономоренко И. А. Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных //Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2016. – №. 2. – С. 107-110.
2. Муравина О. М., Пономаренко И. А. Оптимизация идентификационного моделирования в стохастическом способе учета рельефа местности при интерпретации аэромагниторазведки //Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2021. – Т. 51. – №. 3. – С. 16-22.
3. Муравина О. М., Пономаренко И. А., Минц М. В. Применение метода группового учета аргументов для анализа петрофизических данных //Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2021. – Т. 51. – №. 3. – С. 5-15.
4. Долгаль А. С. и др. Учет влияния рельефа земной поверхности при аэромагнитной съемке в пределах больших магматических провинций //Геофизика. – 2020. – №. 4. – С. 2.
5. Муравина О. М., Долгаль А. С., Пономаренко И. А. Применение статистических методов для учета влияния рельефа местности при проведении аэромагнитных съемок //Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2020. – №. 2. – С. 69-75.
6. Долгаль А. С. и др. Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации //Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2019. – №. 4. – С. 79-84.
7. Муравина О. М. и др. Результаты изучения коллекторских свойств пород методом идентификационного моделирования //Каротажник. – 2018. – №. 8. – С. 71-80.