

*На правах рукописи*

Пономаренко Иван Александрович

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Специальность 1.6.9 – Геофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж 2023

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

*Научный* **Муравина Ольга Михайловна**

*руководитель:* доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

*Официальные* **Калинин Дмитрий Федорович**

*оппоненты:*

доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский горный университет

**Рашидов Владимир Александрович** кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, лаборатория петрологии и геохимии, старший научный сотрудник

*Ведущая*

Федеральное государственное бюджетное учреждение

*организация:*

науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук»

**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 новых методов комплексного анализа данных, способных повысить информативность геофизических исследований. Метод группового учета аргументов (МГУА) – это эффективный 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. Исследования показали, что теория метода не противоречит основным методологическим принципам интерпретации геофизических данных, был получен положительный опыт использования метода при работе с геолого-геофизической информацией для решения широкого круга задач, часть из которых рассматривается в настоящей работе.

Актуальность представленных в диссертации исследований обусловлена их направленностью на развитие этого перспективного метода системного анализа геолого-геофизической информации. Диссертант создал и программно реализовал алгоритм МГУА, адаптированный к работе с геолого-геофизическими данными; разработал методику его применения метода при изучении коллекторских свойств разреза по комплексу каротажных данных, а также предложил включение МГУА в качестве составляющего элемента в новый стохастический способ учета рельефа местности, сложенного интенсивно намагниченными породами, в комплексе с методом эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition (EMD)).

***Степень разработанности темы.*** Статистические способы оценки геофизических и петрофизических параметров широко используются в геофизической практике. Основы статистического подхода, предложенные Ф.М. Гольцманом, Т.Б. Калининой, А.А. Никитиным, А.В. Петровым и др.,

получили развитие в работах В.Н. Глазнева, П.И. Балка, А.С. Долгая, Д.Ф. Калинина и др. МГУА предложен академиком А.Г. Ивахненко в 80-ые годы XX века. В последние десятилетия в связи с развитием информационных технологий метод активно развивается и применяется в различных естественно-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 геофизических исследованиях МГУА ранее практически не применялся. До настоящего времени не было разработано специализированного программного обеспечения, адаптированного к работе с геофизическими данными. 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 программно-алгоритмического обеспечения и методики применения МГУА для решения задач, связанных с вероятностно-статистическим анализом геолого-геофизической информации: изучения коллекторских свойств разреза нефтегазоносных объектов месторождений Западной Сибири по данным ГИС, выявления сложных корреляционных связей в процессе интерпретации геофизических полей, обобщения петрофизических данных, учета влияния рельефа местности при аэромагнитной съемке.

#### ***Задачи исследований***

1. Разработка эффективного алгоритма МГУА, адаптированного к работе с геолого-геофизической информацией.
2. Формирование методики применения МГУА для обобщения и анализа петрофизической информации.

3. Создание 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 аномалиями магнитного поля и отметками высот земной поверхности 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. Сформирована методология применения МГУА для решения задач, связанных с обобщением и анализом комплексных петрофизических данных.

3. Создана методология применения МГУА для исследования коллекторских свойств разреза нефтегазоносных объектов по данным ГИС.

4. Успешно реализовано включение МГУА в качестве одного из ключевых элементов нового стохастического способа учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки, не требующего привлечения дополнительных сведений о магнитных свойствах горных пород верхней части геологического разреза.

#### ***Теоретическая и практическая значимость работы***

1. Доказана высокая эффективность применения МГУА при решении широкого круга задач в области прикладной геофизики.

2. Создано программно-алгоритмическое обеспечение, реализующее МГУА, которое в дальнейшем может использоваться как в процессе научных исследований, так и в работе производственных организаций.

3. Предложены оригинальные методики применения МГУА при обработке и интерпретации геофизических данных.

#### ***Положения, выносимые на защиту***

Алгоритм и программа для идентификационного моделирования методом группового учета аргументов, адаптированные к работе с геолого-

геофизической информацией, позволяющие получать достоверные полиномиальные модели в процессе анализа комплексных геолого-геофизических данных.

Методика обработки петрофизических данных методом группового учета аргументов, формирующая достоверную комплексную идентификационную модель, объединяющую несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость с целью решения задач анализа, обобщения, робастного оценивания и идентификации петрофизических данных.

Методика обработки данных геофизических исследований скважин методом группового учета аргументов, позволяющая выполнить надежную оценку коллекторских свойств разреза и определить наиболее эффективные методы исследований в конкретных физико-геологических условиях.

Способ вероятностно-статистического учета влияния магнитного рельефа дневной поверхности в пределах больших магматических провинций, базирующийся на синтезе методов группового учета аргументов и эмпирической модовой декомпозиции, позволяющий эффективно идентифицировать частотные составляющие аномального магнитного поля, наиболее тесно связанные с перепадами высот земной поверхности.

**Личный вклад.** Диссертантом разработано и опробовано при решении практических задач 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. Диссертантом самостоятельно выполнено идентификационное моделирование с использованием данных ГИС нефтегазоносных месторождений Западной Сибири. На основании полученных результатов совместно с О.М. Муравиной и А.А. Аузиным разработаны методические приемы применения МГУА для изучения

коллекторских свойств разреза по данным ГИС. Автором диссертационной работы самостоятельно выполнены расчеты, реализующие новый стохастический способ учета рельефа местности при интерпретации данных аэромагниторазведки в пределах плато Путораны. В 2018 - 2020 г. диссертант участвовал в исследованиях по гранту РФФИ №18-05-00226 А «Развитие метода группового учета аргументов для анализа геолого-геофизической информации».

**Степень достоверности результатов.** В процессе проведения исследований, а также при изложении полученных результатов диссертант опирался на известные элементы и положения из общей и нефтегазовой геологии, математики, физики, вычислительной математики, прикладной геофизики, петрофизики и программирования. Выполнен системный анализ проблемы и применен широкий спектр теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых хорошо согласуются между собой и не противоречат имеющейся геолого-геофизической информации.

1. Достоверность идентификационного моделирования при изучении коллекторских свойств разреза аргументируется результатами анализа данных ГИС в нефтегазоносных районах Западной Сибири.

2. Достоверность результатов редуцирования среднемасштабной аэромагнитной съемки в Восточной Сибири с помощью предлагаемой технологии учета влияния рельефа местности, основанной на синтезе метода эмпирической модовой декомпозиции и МГУА, подтверждается их сопоставлением с результатами системы КОСКАД-3Д.

3. Получение надежных оценок физических свойств горных пород ВКМ обеспечили геологическую содержательность результатов при построении объемных моделей земной коры по геофизическим данным.

**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, 5 из которых относятся к рецензируемым научным изданиям, включенным в перечень ВАК, 2 – в издании, включенном в международную базу Web of Science. Также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617896.

**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 полученных результатов, научная новизна, формулируются цель и задачи исследования и четыре защищаемые положения, приводятся сведения о личном вкладе автора, об апробации выполненных разработок на практических материалах и структуре диссертации.

В *первой главе* представлены основные положения метода группового учета аргументов. В первой части дан обзор методов индуктивного моделирования, используемых при решении геолого-геофизических задач,

рассмотрены предпосылки использования метода для анализа сложных систем. В второй части первой главы рассмотрены теоретические основы МГУА и реализующие его комбинаторные и многорядные селекционные алгоритмы. Метод группового учета аргументов – статистический метод обработки данных, основанный на идее синергетики о существовании упорядоченности в сложных системах. Математическая модель метода – матрица, столбцы которой являются анализируемыми данными: формализованная геологическая информация, результаты петрофизических определений, измеренные или трансформированные значения геофизических полей. Целью применения метода является получение модели, которая объединяет несколько атрибутов в единую функциональную зависимость. С формальной точки зрения МГУА – модифицированный метод регрессионного анализа. Однако, в отличие от классического подхода, ни структура регрессионной модели, ни набор конкретных параметров заранее не определяются, а выбираются из множества сформированных в процессе моделирования вариантов. Для выбора моделей МГУА использует внешние критерии, что существенно оптимизирует процесс моделирования и минимизирует вмешательство пользователя: самые значимые входные параметры выбираются автоматически. Генерация моделей осуществляется на основе базовой функции в несколько этапов (рядов селекции). Фактически при генерации моделей реализуется генетический алгоритм, а разделение последовательности данных на обучающую и проверочную позволяет провести аналогию с обучением на нейронной сети. Однако, в отличие от нейросетевого подхода на выходе мы имеем полиномиальную зависимость, которая может быть эффективно проанализирована с физической точки зрения. Таким образом, МГУА является альтернативным инструментом моделирования, который имеет ряд достоинств, по сравнению с традиционными способами машинного обучения и регрессионного анализа. Структура модельных уравнений зависит от номера частного описания и уровня (ряда) генерации моделей. Так модели первого уровня являются

частными описаниями, полученными последовательным занулением коэффициентов базового уравнения первого ряда – полином Колмогорова-Габора первой степени для двух переменных:

$$Y = a_1 + a_2 \cdot x_i + a_3 \cdot x_j + a_4 \cdot x_i \cdot x_j, \quad (2)$$

здесь  $Y$  – модельные значения зависимой переменной;  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – числовые коэффициенты;  $x_i$  и  $x_j$  – пара переменных-аргументов, выбранная из входных данных. Заданное число лучших моделей каждого предыдущего ряда становятся переменными-аргументами следующего ряда, что приводит к усложнению модельных зависимостей. Так, например, в общем виде модельное уравнение второго ряда можно записать следующим образом:

$$Z_k = f(Y_i, Y_j, b_1, b_2, b_3, b_4), \quad (3)$$

где  $Z_k$  – модельные значения зависимой переменной;  $k$  – номер частного описания;  $Y_i, Y_j$  – переменные аргументы – модели первого ряда;  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – числовые коэффициенты. Для расчета внешних критериев наиболее часто используются формулы Внешние критерии рассчитываются по формулам (4), (5).

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i=1}^{N_B} (q_{\text{табл}} - q_m)_i^2}{\sum_{i=1}^{N_B} q_{\text{табл}}^2}, \quad (4)$$

где  $N_B$  – число точек отдельной проверочной последовательности данных  $N = N_A + N_B$ ;  $q_{\text{табл}}$  – табличные значения выходной переменной;  $q_m$  – значения, рассчитанные по данной модели.

$$n_{\text{см}}^2 = \frac{\sum_1^{\alpha N} (q_A - q_B)^2}{\alpha \sum_{i=1}^N q_{\text{табл}}^2}, \quad (5)$$

где А – точки с большим значением дисперсии выходной величины; В – точки с меньшим ее значением;  $\alpha$  – коэффициент экстраполяции; N – все точки таблицы исходных данных.

Во **второй главе** приведено описание многорядного алгоритма МГУА с комбинаторным перебором вариантов, адаптированного к работе с геолого-геофизическими и петрофизическими данными, а также рассмотрены

основные блоки и режимы работы созданного программного обеспечения. Программный продукт, реализованный на языке СИ++, получил свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021617896 в ФИПС (Роспатент).

Разработанное программное обеспечение эффективно решает следующие задачи: обработка как сравнительно 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. На Рис. 1 приведена блок-схема алгоритма.

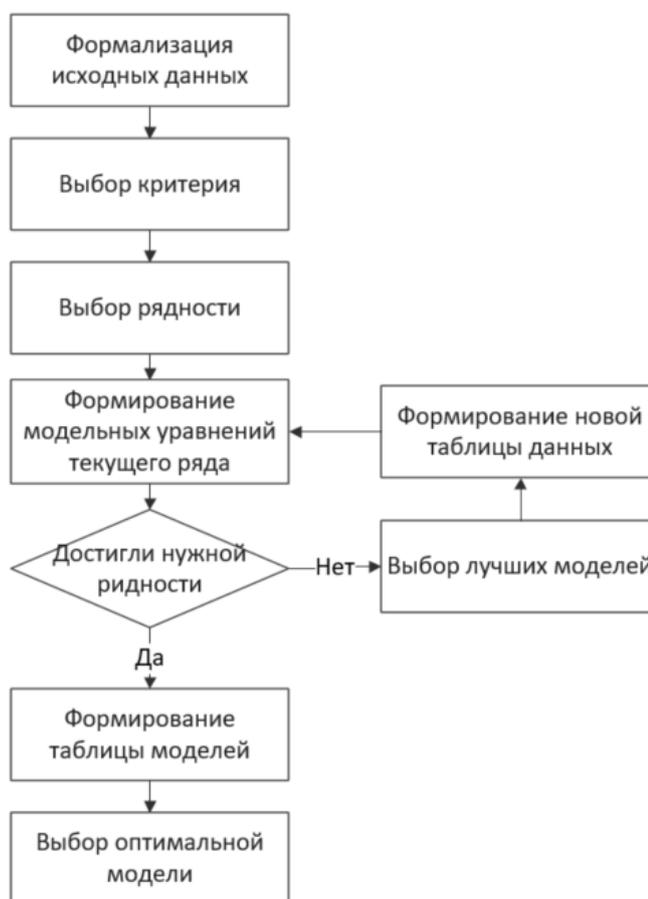


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

В главах 1 и 2 раскрывается первое защищаемое положение:

*«Алгоритм и программа для идентификационного моделирования методом группового учета аргументов, адаптированные к работе с геолого-геофизической информацией, позволяющие получать достоверные полиномиальные модели в процессе анализа комплексных геолого-геофизических данных».*

В главе 3 представлены методика и результаты применения МГУА для анализа и систематизации петрофизических данных. Методика применения МГУА для анализа и систематизации петрофизических данных была разработана и опробована на этапах формирования и использования цифровой петрофизической базы данных осадочных и кристаллических пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). База данных содержит информацию о петрофизических параметрах пород: *пространственные координаты и глубины* свыше 90000 петрофизических определений образцов керна из 4437 скважин.

Результат применения МГУА - комплексное идентификационное уравнение, которое объединяет петрофизические параметры, пространственные и геологические атрибуты в единой полиномиальной зависимости. Использование петрофизической модели МГУА эффективно решает следующие задачи: идентификация данных, робастное оценивание, формализация различных петрофизических параметров для включения в процедуру комплексной интерпретации геофизических полей.

#### *Идентификация пород по комплексу петрофизических параметров*

Стратифицированные архейские образования в пределах ВКМ имеют достаточно широкое распространение. Породы михайловской серии относятся к верхнему архею и подразделяются на две свиты: нижнюю александровскую и верхнюю лебединскую. Существует также значительная часть петрофизических определений на образцах, принадлежность которых к конкретной свите не установлена. Такие данные отнесены к породам нерасчлененной михайловской серии. Представительность выборки

петрофизических характеристик для пород александровской свиты (петрофизические определения для 1396 образцов) сделала возможным получение для различных типов пород эмпирических модельных зависимостей, использование которых позволило проверить гипотезу о принадлежности образцов нерасчлененной михайловской серии к александровской свите. 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. В качестве примера приведем результаты идентификационного анализа МГУА мигматитов александровской свиты. Модельная зависимость 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  $\pm 0.02$  г/см<sup>3</sup>. Модель МГУА была проверена на 52 образцах мигматитов михайловской серии, в результате для 7 из них абсолютная погрешность оценки плотности также не превысила  $\pm 0.02$  г/см<sup>3</sup>, что позволило предположить их принадлежность к породам александровской свиты (Рис. 2). 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

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

*Робастное оценивание экспериментальных петрофизических данных*

Основная идея робастного оценивания заключается в выявлении и исключении аномальных значений (выбросов), которые могут привести к существенным искажениям значений статистических характеристик. Природа выбросов значений петрофизических параметров может быть различной: ошибки измерений, ошибки записи данных, непринадлежность образца к изучаемой генеральной совокупности. С другой стороны, аномальные значения могут быть связаны с естественной изменчивостью петрофизических характеристик в рамках исследуемого объекта, и в этом случае не должны рассматриваться, как выбросы. Мы предлагаем следующую процедуру выявления и классификации выбросов. Модельные и экспериментальные данные сравниваются между собой и соотносятся со стандартным отклонением выборки и с наиболее вероятными границами вариаций петрофизического параметра (для плотности и скорости эти границы определяются по значениям 5% и 95% квантилей). Рассмотрим различные варианты отклонений модельных и экспериментальных данных. Первый тип – экспериментальные и модельные значения выходят за границы диапазона разброса данных, но разница между ними не превышает величину стандартного отклонения, следовательно, экспериментальные значения соответствуют идентификационному уравнению и вызваны естественными вариациями физических свойств. Второй тип – экспериментальные данные выходят за пределы достоверного диапазона, а модельные нет, при этом разница модельных и экспериментальных значений превышает стандартное отклонение, следовательно, значения экспериментальных данных не принадлежат генеральной совокупности и являются выбросами. Третий тип – за рамки достоверного диапазона выходят только модельные значения зависимой переменной, причиной может быть выброс в экспериментальных значениях переменных-аргументов, которые формируют модельное уравнение. В качестве примера рассмотрим результаты робастного оценивания габброноритов мамонского комплекса (данные по 53 образцам), отобранных из одной скважины (Рис. 4). Полученное на 2 ряду уравнение (2)

связывает плотность ( $\sigma$ ) со скоростью распространения упругих волн ( $V$ ), намагниченностью ( $\kappa$ ) и поляризуемостью ( $\eta$ ):  $\sigma = f(V, \kappa, \eta)$ . Среднеквадратичное отклонение исходных значений плотности равно  $0.05 \text{ г/см}^3$ , а среднеквадратичная невязка модельных и экспериментальных значений не превышает  $0.03 \text{ г/см}^3$ , что свидетельствует о высоком качестве полученной зависимости. Среднее значение плотности составляет  $3.04 \text{ г/см}^3$ , границы достоверного диапазона составляют  $2.96 \text{ г/см}^3$  и  $3.14 \text{ г/см}^3$ . 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, использование моделей МГУА позволяет автоматизировать процедуру выявления и классификации выбросов при работе с большим объемом информации и 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. 5):

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

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

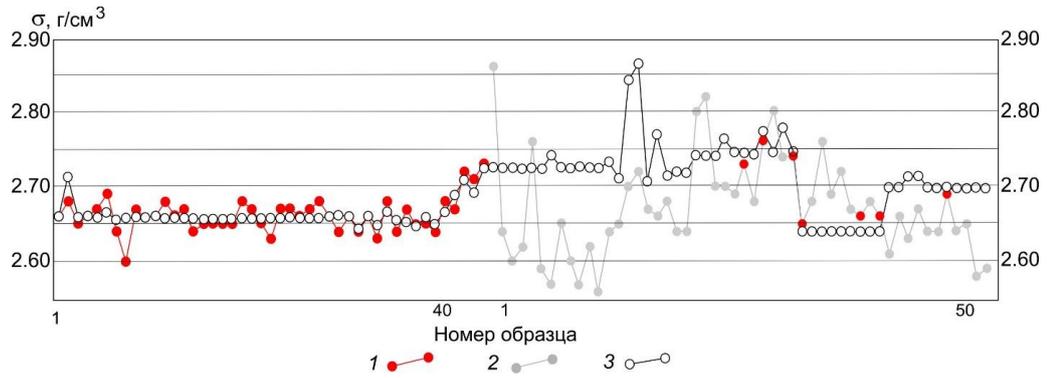


Рис. 2. Идентификация мигматитов нерасчлененной михайловской серии: 1 – экспериментальные значения плотности мигматитов александровской свиты; 2 – экспериментальные значения плотности мигматитов нерасчлененной михайловской серии; 3 – модельные значения плотности

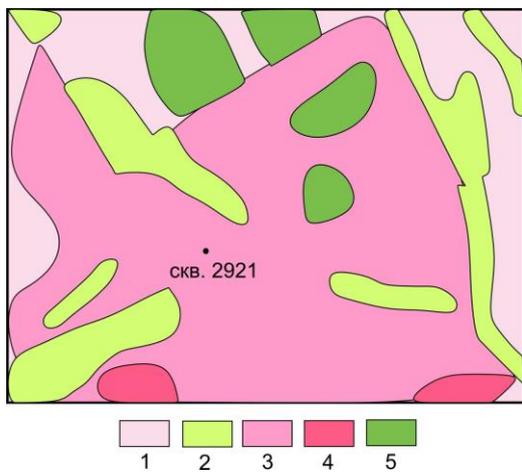


Рис. 3. Фрагмент геологической карты курского блока ВКМ: 1 – обоянская серия; 2 – александровская свита; 3 – плагиограниты салтыковского комплекса; 4 – щелочные граниты атаманского комплекса; 5 – габброиды смородинского комплекса

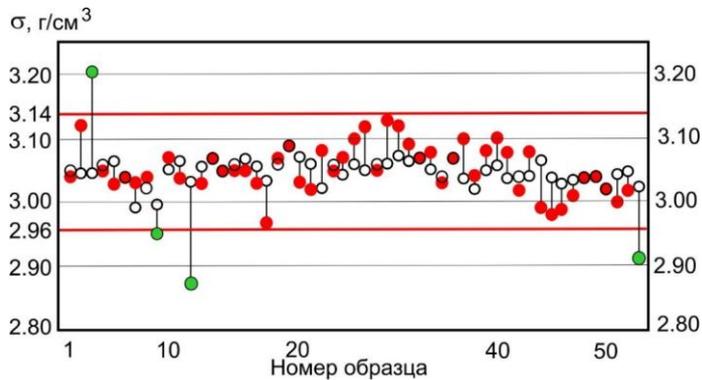


Рис. 4. Идентификация выбросов на примере габброноритов мамонского комплекса: красные кружки соответствуют экспериментальным значениям скорости упругих колебаний; незаполненные – модельным; зеленые – выбросы 1 и 2 типа. Границы достоверного диапазона данных показаны красной линией.

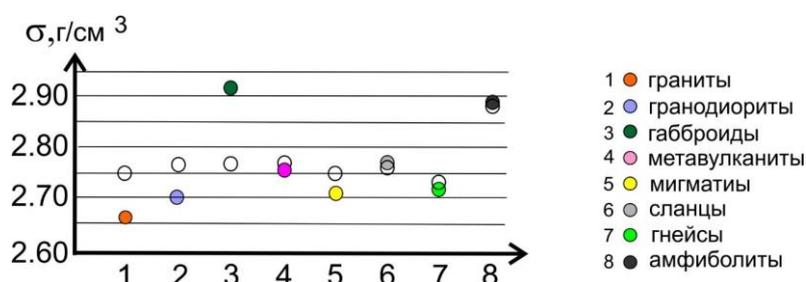


Рис. 5. Экспериментальные (цветные кружки) и модельные (незакрашенные кружки) средних значений плотности основных литологических типов кристаллических пород ВКМ

Описанная в **3 главе** методика и приведенные примеры ее использования обосновывают второе защищаемое положение: *«Методика обработки петрофизических данных методом группового учета аргументов, формирующая достоверную комплексную идентификационную модель, объединяющую несколько петрофизических параметров в единую полиномиальную зависимость с целью решения задач анализа, обобщения, робастного оценивания и идентификации петрофизических данных».*

В **главе 4** описываются результаты исследований, направленных на оптимизацию методики изучения коллекторских свойств разреза по данным стандартного комплекса ГИС. Идентификационное моделирование было выполнено по материалам 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 качество моделирования начинает закономерно ухудшаться. Минимумы внешних критериев получены при последовательностях 150 и 400 наблюдений. Было рекомендовано постепенное увеличение размера

последовательности наблюдений до значений, не превышающих 400-600 (рис. 6).

2. Определена последовательность идентификационного моделирования МГУА с целью выделения в разрезе пластов-коллекторов. На первом этапе используется информация по эталонной скважине, для которой по данным ГИС и по результатам опробования и лабораторных 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. Полученные модельные уравнения устанавливают корреляционные взаимосвязи между идентификатором коллектора и геофизическими параметрами по данным нескольких методов комплекса ГИС характерные для определенных физико-геологических условий. 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 данных ГИС, особенно при условии цифровой регистрации каротажных данных.

Рассмотрим примеры идентификации коллектора среди вмещающих пород и определение его типа. *Пример 1.* В качестве исходных данных были использованы результаты геофизических исследований разведочной скважины на нефтегазовом месторождении Южно-Русское. Зависимыми переменными назначался условный идентификатор коллектора, принимающий значение 0 для вмещающих пород и значение 100 для коллектора любого типа. Модель, полученная на первом ряду селекции (1), позволяет однозначно идентифицировать коллектор по данным

индукционного каротажа (ИК) и результатам кавернометрии (DS):  $IdK = f(ИК, DS)$  (Рис. 7 а).

Пример.2. Модель, полученная на эталонной скважине (месторождение Ватъеганское), была проверена на независимых наблюдениях рядовых скважины (Рис. 7 б). 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:  $IdK = f(DS, MGZ, ИК, PS, KS)$ , где  $DS$  – данные кавернометрии;  $MGZ$  – показания микроградиент зонда,  $ИК$  – 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.

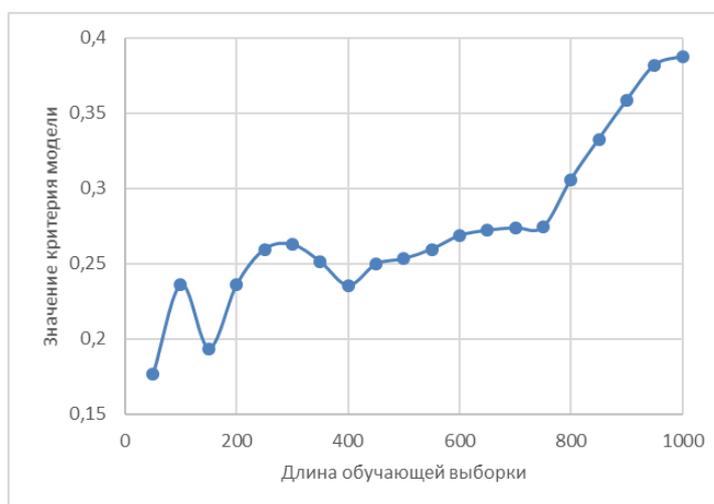


Рис. 6. Зависимость качества модели от длины обучающей выборки

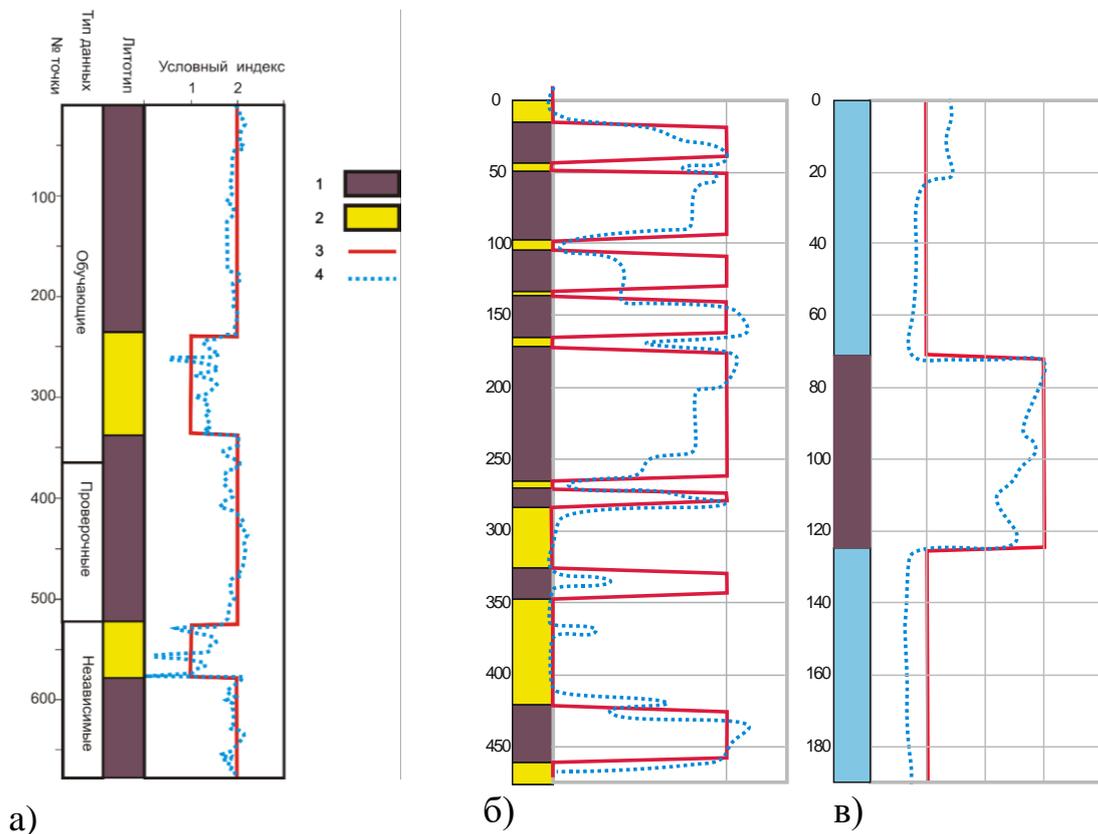


Рис. 7 Результаты идентификационного моделирования по данным каротажа: а - идентификация коллектора среди вмещающих пород; б - выделение коллектора с использованием независимых данных по соседней скважине; в - определение типа коллектора. 1 – интервал коллектора; 2 – вмещающие породы; 3 – экспериментальные значения идентификатора коллектора; 4 – модельные значения идентификатора коллектора

Пример. 3 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 (Рис. 7 в).

Приведем пример, демонстрирующий возможности оценки фильтрационно-емкостных свойств разреза с привлечением методики МГУА по комплексу каротажных данных. Для формирования обучающей последовательности в качестве зависимой переменной были использованы

осредненные значения пористости ядра продуктивного пласта. В результате идентификационного моделирования на третьем ряду селекции была получена зависимость, позволяющая рассчитать коэффициент пористости по данным четырех градиент-зондов разной длины и гамма-каротажа (Рис. 8).

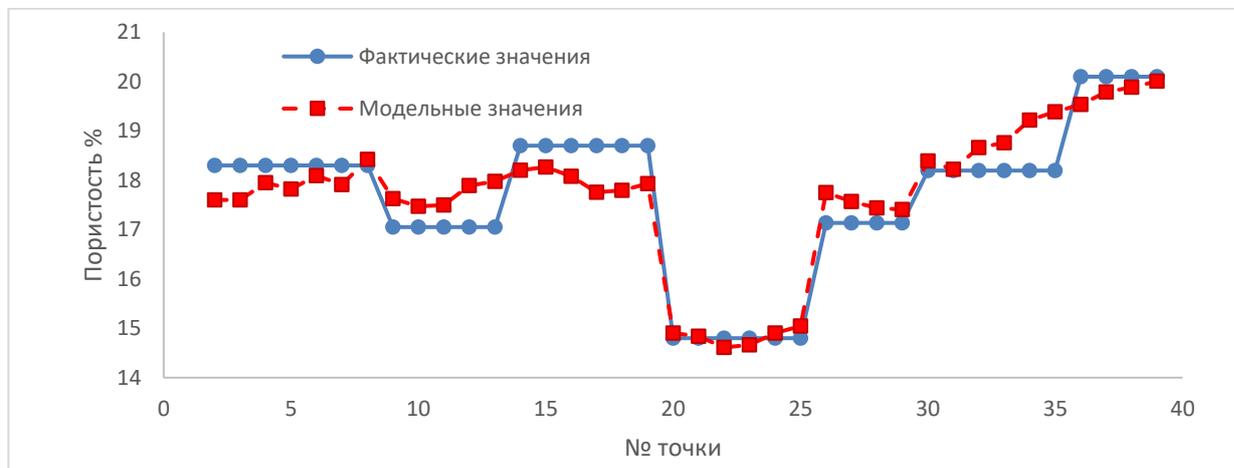


Рис. 8. Соответствие фактических и модельных значений коэффициента пористости

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

*«Методика обработки данных геофизических исследований скважин методом группового учета аргументов, позволяющая выполнить надежную оценку коллекторских свойств разреза и определить наиболее эффективные методы исследований в конкретных физико-геологических условиях».*

В главе 5 описывается использование МГУА с целью учета влияния резко расчлененного рельефа местности при проведении аэромагнитных съемок в комплексе с методом эмпирической модовой декомпозиции в пределах больших магматических провинций (БМП). К БМП, в первую очередь, относятся трапповые провинции, самой крупной из которых является Сибирская, охватывающая почти всю Восточную Сибирь и юг Таймыра. Характерной особенностью этих территорий является сложный характер аномального магнитного поля, обусловленный высокими магнитными свойствами горных пород верхней части разреза ( $J_{эф} = 3-5$  А/м и более) и резко расчлененными рельефом земной поверхности.

Традиционный стохастический способ оценки аномального эффекта рельефа основан на выявлении корреляционной 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 аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа. Первый опыт применения метода на отдельных профилях в Норильском районе подтвердил перспективность предложенного подхода. Далее метод был использован при редуцировании сводных результатов аэромагнитных съемок масштаба 1:200 000–1:50 000, выполненных в 1962–81 гг. в северо-западной части Сибирской платформы (плато Путораны) на территории общей площадью 316000 км<sup>2</sup>. В ее пределах широко развиты интенсивно намагниченные платобазальты триасового возраста.

Методом ЭМД аномальное магнитное поле и высотные отметки рельефа были представлены в виде суммы шести компонент ЭМФ ( $\delta T_1$ – $\delta T_6$ ;  $H_1$ – $H_6$ ) и остаточных составляющих ( $\delta T_r$ ;  $H_r$ ). Затем с помощью идентификационного анализа МГУА были установлены значимые статистические связи, между низкочастотными компонентами  $\delta T_4$ – $\delta T_6$ ,  $\delta T_r$  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 магнитного поля:

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

где  $\delta T_r^*$  – уточненная МГУА остаточная составляющая магнитного поля.

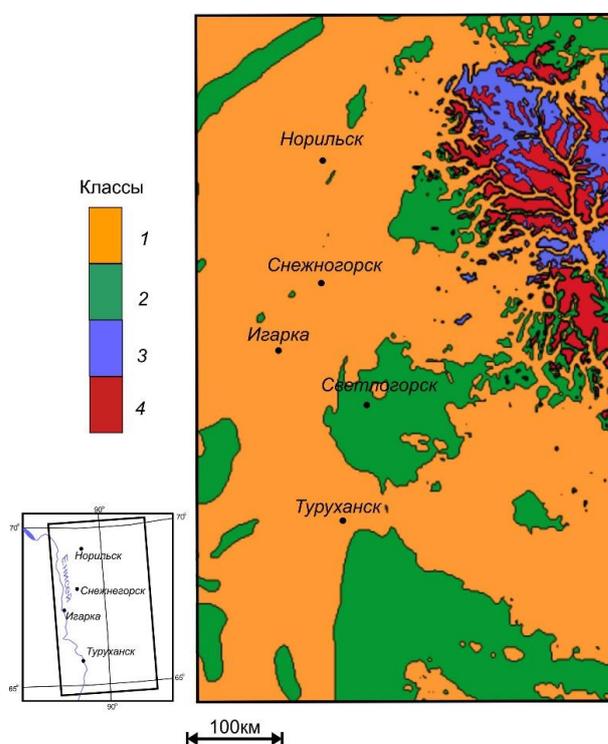
Однако полностью исключить влияние рельефа не удалось. Одной из причин этого стала существенная неоднородность территории по характеру

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 земной поверхности. В результате площадь исследования была разделена на классы (области) с учетом геофизических и геоморфологических особенностей. На заключительном этапе было проведено идентификационное моделирование МГУА в пределах выделенных классов (областей) и определены взаимосвязанные с дневным рельефом составляющие магнитного поля. В качестве классификационных признаков были использованы интенсивность аномального магнитного поля и высотные отметки значения нормальных высот 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. 9 а б).

Идентификационное моделирование МГУА было выполнено на 10 пилотных профилях автономно для каждого класса. В результате получены модельные уравнения, связывающие значения магнитного поля анализируемой ЭМФ с двумя и более ЭМФ высот 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

( $\sigma_1/\sigma_2$ ). На Рис. 9, в представлены кривые, характеризующие усредненные значения  $\sigma_1/\sigma_2$  для моделей, полученных для ЭМФ-составляющих магнитного поля в пределах выделенных классов.

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

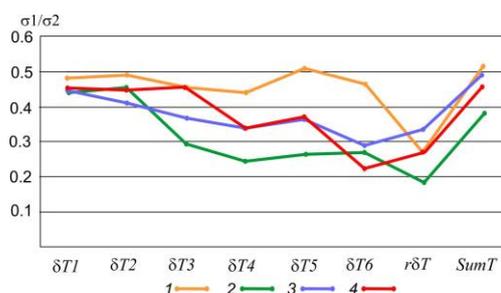


Рис. 9. Результаты идентификационного моделирования: а – пространственная типизация площади исследования по значению комплексного признака; б – таблица реклассификации аномального магнитного поля и высотных отметок рельефа; в – средние значения  $\sigma_1/\sigma_2$  для моде

Следует отметить, что результаты представленного способа учета влияния рельефа хорошо согласуются с результатами процедуры компенсирующей фильтрации, выполненной в системе КОСКАД-3Д. Описанная в **пятой главе** методика и приведенные примеры ее использования обосновывают четвертое защищаемое положение:

*«Способ вероятно-статистического учета влияния магнитного рельефа дневной поверхности в пределах больших магматических провинций, базирующийся на синтезе методов группового учета аргументов и*

*эмпирической модовой декомпозиции, позволяющий эффективно идентифицировать частотные составляющие аномального магнитного поля, наиболее тесно связанные с перепадами высот земной поверхности».*

**Заключение.** Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан и программно реализован алгоритм МГУА, 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 МГУА для обработки и анализа разнородной 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 скважин. Предложен автоматизированный способ объединения геологической информации и результатов каротажа, что необходимо для формирования таблицы входных данных. Разработана технология идентификации коллектора в разрезе по комплексу каротажных данных. Предложены способы оценки фильтрационно-емкостных свойств изучаемого разреза, таких как определение типа флюидонасыщения и коэффициента пористости, основанные на формировании идентификационных уравнений МГУА по данным комплекса ГИС.
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 в пределах больших магматических провинций. На основе объективного анализа данных магниторазведки и обобщения результатов использованной методики были сформулированы способы повышения результативности идентификационного анализа МГУА при решении задач такого рода.

### **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., Криволицкая Н.А., Муравина О.М., **Пономаренко И.А.** 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., Муравина О.М., Аузин А.А., **Пономаренко И.А.** Сферы применения современных статистических методов обработки геофизической информации //Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2019. – №. 4. – С. 79-84.

7. Муравина О.М., Аузин А.А., Глазнев В.Н., **Пономаренко И.А.** Результаты изучения коллекторских свойств пород методом идентификационного моделирования //Каротажник. – 2018. – №. 8. – С. 71-80.
8. Свид. 221617896 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. GMDHmod; заявитель и правообладатель **Пономаренко И.А.** (RU). – №2021616565; заявл. 12.05.2021; опубл. 20.05.2021 Бюл №5.