

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт геофизики им. С.И.Субботина

На правах рукописи

КОРЧАГИН Игнатий Николаевич

УДК (550.831+550.838+550.361):681.3

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ
ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Специальность 04.00.22 – Геофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Киев - 1994

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте геофизики им. С.И.Субботина Национальной Академии наук Украины

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.И.АРОНОВ (ВНИИ-Геонформсистем),

доктор физико-математических наук, профессор Г.Я.ГОЛИЗДРА (Днепропетровский горный институт),

доктор физико-математических наук А.В.ЧЕРНИЙ (Институт геофизики НАН Украины)

Ведущая организация:

Кафедра геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Киевского государственного университета им. Т.Г.Шевченко

Защита состоится 16 декабря 1994г. в 13 час. на заседании специализированного совета Д 016.02.01 при Институте геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины, 252680, г. Киев-142, пр. Палладина, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины.

Автореферат разослан "___"_____ 1994г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета
доктор физико-математических наук

В.С.ГЕЯКО

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00777144 (U)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Общая характеристика работы

Актуальность. Одной из важнейших задач, стоящей перед обществом, является проблема повышения эффективности функционирования экономики страны, в том числе и геолого-геофизической службы, призванной обеспечить потребности народного хозяйства в минеральных и топливно-энергетических ресурсах. Повышение эффективности собственно геофизических методов поисков и разведки в значительной степени связано с разработкой и внедрением в геофизическое производство компьютерно-информационных технологий регистрации, обработки, хранения и интерпретации геофизических данных. Важное место в системе геофизических методов занимают гравиразведка и магниторазведка. В будущем, следует ожидать повышения их роли в геолого-геофизическом производстве. Во-первых, гравиразведка и магниторазведка - относительно дешевые методы исследований. Во-вторых, в гравитационном и магнитном полях содержится информация практически о всех неоднородностях земной коры. Следовательно, рациональное использование этой информации на всех этапах геолого-геофизических исследований может существенным образом повысить их экономическую эффективность. Современные разработки в области вычислительной техники и информатики, а также тенденции и темпы их совершенствования оказывают существенное влияние на подходы и принципы решения задач моделирования конкретных геологических объектов. В частности, вычислительная техника, избавляя интерпретатора от рутинной работы, предоставляет ему возможность реализации многовариантных стратегий подбора. Однако, вопрос о том, насколько многовариантной будет такая стратегия в каждом конкретном случае, связан, в первую очередь, с имеющимся в его распоряжении специальным программным обеспечением, реализующим известные технологии подбора. В связи с этим проблема синтеза известных технологий, модификаций и методик автоматизированного подбора в единой, универсальной и технологичной подсистеме является в достаточной степени

актуальной.

Цель работы заключается в анализе, обобщении и синтезе различных технологий моделирования методом автоматизированного подбора, оптимизационных процедур и алгоритмов для решения обратных задач, аппроксимирующих конструкций для описания источников аномалий и вмещающей среды в единую информационно-машинную подсистему в целях совершенствования компьютерных технологий обработки и интерпретации геолого-геофизических (гравиметрических, магнитометрических и геотермических) данных.

Основные задачи работы. Для реализации поставленной цели в работе определены следующие задачи:

1. Сформулировать общие подходы построения и определить основные элементы локальной базы данных, описывающей изучаемый элемент пространства и содержащей разнородную геолого-геофизическую информацию: каталоги полей, данные бурения, модельные представления, данные статистической обработки результатов изучения физических свойств и т.д.

2. Построить аппроксимирующую конструкцию открытого типа для геометризации разрезов и объемов изучаемого пространства, состоящей из множества элементарных аппроксимирующих геометрических тел самой разнообразной формы и допускающей расширение этого множества.

3. Создать оптимизационную процедуру открытого типа, допускающую использование различных алгоритмов и процедур для решения обратных задач, а также универсальную конструкцию для представления и хранения каталогов измеренных, модельных и промежуточных значений моделируемых компонент полей и удобной формы их графического изображения для визуального восприятия.

4. Разработать структуру и основные элементы специализированной интерпретационной системы, позволяющей интерпретатору форми-

ровать и реализовывать на ЭВМ различные графы интерпретации и обладающей широким набором возможностей.

5. Осуществить практическую реализацию выполненных разработок в виде элементов автоматизированной системы подбора на ЭВМ различного типа (ЕС, СМ, ПК).

6. Выполнить большой объем исследований методом вычислительного эксперимента на моделях источников различной геометрической формы с целью формирования объективного представления о характере решаемых задач и возможностях программного обеспечения.

7. Исследовать возможности использования линейных трансформаций моделируемых компонент полей в алгоритмах и технологиях подбора гравитационных и магнитных аномалий.

8. Провести опробование отдельных элементов разработанного программного обеспечения на практических примерах различной степени сложности.

9. Осуществить адаптацию некоторых элементов разработанного алгоритмического и программного обеспечения для целей моделирования геотермических данных: нестационарных аномалий теплового потока и температуры.

Научная новизна. В работе обосновывается тезис, что синтез существующих технологий, методик и алгоритмов автоматизированного подбора в специализированную компьютерно-информационную подсистему будет в существенной степени способствовать повышению как эффективности гравиразведки и магниторазведки при решении различных геологических задач, так и их роли и веса в системе геолого-геофизического производства. В рамках этой проблемы:

1. Разработана открытая аппроксимационная конструкция, позволяющая использовать одновременно различные тела простой геометрической формы (от точечных источников до многогранников), а также сеточные аппроксимирующие элементы. Такая конструкция дает возмож-

ность однообразно параметризовать изучаемые элементы пространства различной степени сложности, реализовать на ее основе известные технологии подбора, ставить и решать математические и геологические задачи различного типа.

2. На базе градиентных методов спуска и алгоритма сингулярного разложения матриц построена эффективная оптимизационная процедура, которая дает возможность использовать при решении практических задач как достоинства градиентных методов вдали от минимума оптимизируемой целевой функции, так и преимущества алгоритма сингулярного разложения матриц в окрестностях минимума.

3. Детально рассмотрена проблема использования линейных трансформаций моделируемых компонент в программах подбора гравитационных и магнитных полей. В разработанном алгоритме тип трансформанты вводится линейным оператором весового суммирования в скользящем окне. Особенность алгоритма состоит в том, что один и тот же приближенный оператор трансформирования действует на измеренное и модельное множества моделируемой компоненты поля. В этой ситуации точность вычисления трансформанты не оказывает существенного влияния на результаты подбора: используются только свойства соответствующих трансформант.

4. Исследована возможность применения сплайн-аппроксимации в алгоритмах подбора гравитационных и магнитных полей для параметризации нелинейного фона, интерполяции и сглаживания измеренных и модельных компонент полей, рациональной организации вычислительного процесса, рекуррентного вычисления горизонтальных производных высшего порядка, описания склонения и наклонения нормального магнитного поля, а также физических и геометрических параметров источников.

5. На базе разработанного алгоритмического обеспечения для ЭВМ различного класса реализован комплекс программ автоматизиро-

ванного подбора, предоставляющий интерпретатору широкие возможности в выборе и реализации стратегий моделирования при решении конкретных геологических задач. Программное обеспечение позволяет осуществлять подбор по измеряемым компонентам гравитационного и магнитного полей и их линейным трансформациям, вторым производным гравитационного потенциала, характеризуется универсальностью и может использоваться в самых разнообразных геологических ситуациях.

6. Большой объем вычислений на модельных примерах различной степени сложности позволяет сформировать достаточно объективное представление о практической эквивалентности получаемых решений и показывает, что для получения гарантированных результатов в интерпретационном процессе необходимо использовать многовариантные стратегии подбора.

7. Методологические принципы, алгоритмические разработки, а также общие подходы к построению и формированию программного обеспечения не замыкаются рамками гравиметрии и магнитометрии. Успешная адаптация разработанного алгоритмического и программного обеспечения для решения задач моделирования в геотермии показывает, что такие же подходы могут быть использованы при решении аналогичных задач другими геофизическими методами, а также при разработке компьютерно-информационных моделей комплексной интерпретации разнородной геофизической и геологической информации.

Практическая ценность работы определяется, в основном, ее направленностью на решение важных прикладных задач. Разработанное программное и алгоритмическое обеспечение прошло широкую практическую обкатку и используется в вычислительных центрах ряда геолого-геофизических экспедиций, производственно-геологических объединений и научно-исследовательских организаций. Практическая реализация множества алгоритмов и процедур в рамках компьютерно-информационной системы позволяет повысить эффективность разработанных ма-

минных технологий обработки и интерпретации гравиметрических, магнитометрических и геотермических данных, так как расширяет возможности пользователя в выборе и реализации оптимальной стратегии действий при решении конкретной геологической задачи; повышает оперативность обработки информации; уменьшает время и материальные затраты на построение моделей изучаемых объектов, участков, регионов; увеличивает круг специалистов, способных ставить и решать задачи моделирования.

Реализация работы. Разработанное программное и методическое обеспечение автоматизированного подбора передано для практического использования в Кировское ПГО (г.Киев), Уральскую опытно-методическую (г.Екатеринбург) и Баженовскую геофизическую экспедицию РГК "Уралгеология", Челябинскую ГРЭ, Норильскую комплексную ГРЭ, Орскую геофизическую экспедицию, Новодвинскую геофизическую экспедицию ПГО "Архангельскгеология", МАГЭ (г.Мурманск), ЦГСЭ (г.Якутск), П/О "Саратовнефтегеофизика", ЛГЭ ПГО "Севзапгеология" (г.Санкт-Петербург), НПО "Рудгеофизика", САИГИМС (г.Ташкент), Институт сейсмологии АН Киргизстана (г.Бишкек), Институт вулканологии РАН (г.Петропавловск-Камчатский), СНИИГГИМС (г.Новосибирск), ИЗК СО РАН (г.Иркутск), Геофизический институт АН Словакии (г.Братислава).

Некоторые версии программ автоматизированного подбора на алгоритмических языках высокого уровня приводятся в депонированных методических руководствах. Это обстоятельство существенным образом расширяет круг потенциальных пользователей разработанного программного обеспечения, так как дает возможность при незначительных усилиях запускать и эксплуатировать эти версии программ без консультаций автора.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Общесоюзных и Всесоюзных семинарах им.Д.Г.Успенского (Москва: 1977, 1978, 1993, Ленинкан: 1986, Алма-Ата: 1990), IV Всесоюзной

школе-семинаре "Теория и практика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий" (Алма-Ата: 1984), Всесоюзном совещании "Моделирование геологических структур на основе геолого-геофизических данных с целью ускорения поисков и разведки рудных полезных ископаемых" (Днепропетровск: 1986), Научно-практическом семинаре "Внедрение математических методов и вычислительной техники в практику геологоразведочных работ Советской Прибалтики" (Вильнюс: 1988), Краевой научно-технической конференции "Комплексная количественная интерпретация геолого-геофизических данных в условиях Сибирской платформы" (Красноярск: 1989), III Всесоюзном съезде по геомагнетизму (Ялта: 1986), семинаре "Сейсмические методы поиска и разведки полезных ископаемых" (Киев: 1978).

Публикации. По теме выполненных исследований опубликовано 65 печатных работ, из них 52 основные. В их числе одна монография и шесть методических руководств. Написано также три отчета по разделам научно-исследовательских тем.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка используемой литературы и четырех приложений. Объем работы - 467 страниц, в том числе 87 рисунков и 20 таблиц. Библиография насчитывает 284 наименования.

Исходные материалы и личный вклад автора. В диссертационной работе изложены результаты исследований автора с 1973 по 1994г. в Институте геофизики им.С.И.Субботина АН Украины по разделам научных тем "Разработка и дальнейшее совершенствование математических методов интерпретации геофизических наблюдений" (1980г., N гос.рег. 79014310), "Разработка и дальнейшее совершенствование математических методов и автоматизированных систем интерпретации потенциальных полей" (1985г., N гос. рег. 81057380), "Разработка теории, методики и программно-алгоритмического обеспечения автоматизированных систем обработки и интерпретации геофизических полей" (1990г.,

И гос. рег. 01860068155).

В процессе проведения исследований, а также при изложении полученных результатов в работе автор опирался на известные элементы и положения из теории систем, теории информации, методологии интерпретации геофизических полей, теории потенциала, математического анализа, вычислительной математики, оптимизации, математического программирования и программирования на ЭВМ. При изучении эффективности разработанных алгоритмов и программ широко применялись методы модельных исследований и вычислительный эксперимент. Достоверность и обоснованность полученных результатов проверена на большом объеме вычислений и широким практическим опробованием.

Автор с удовлетворением отмечает, что настоящая работа является продолжением и развитием того направления в области разработки методов и технологий автоматизированного подбора, которое заложил и развивает доктор физико-математических наук, профессор Е.Г.Булах и выражает ему искреннюю признательность за поддержку и внимание в проведении исследований.

Формирование методологических принципов и положений, разработка алгоритмов и вычислительных процедур, а также их программная реализация принадлежат автору. Комплекс вычислительных экспериментов на моделях также полностью выполнен автором. Адаптация алгоритмического и программного обеспечения для целей моделирования геотермических аномалий, его опробование на модельных и практических задачах осуществлены совместно с Р.И.Кутасом и В.А.Цвященко, которым автор благодарен за полученные в процессе совместной работы сведения из геотермии.

В работе частично использованы некоторые материалы производственных организаций, в обработке которых автор принимал непосредственное участие, а также любезно предоставленные ему производственными организациями, эксплуатирующими разработанные программные

комплексы.

Автор благодарит Г.М.Дрогицкую и М.С.Зейгельмана за опробование программного обеспечения на практических примерах, А.С.Долгая и И.А.Купенко - за помощь в адаптации программ для СМ ЭВМ и их внедрение в производственных организациях, Н.А.Гаврилову, В.М.Рыбалко, Л.М.Хайкельсона, А.В.Чурсина - за внедрение программного обеспечения на Урале и предоставленные практические материалы, В.И.Тимошенко - за помощь в адаптации программ для ПЭВМ, М.Г.Губайдуллина и Ф.А.Яновского - за внедрение программ, В.Н.Завойского, С.С.Красовского, В.И.Старостенко, В.Н.Страхова, А.В.Черного - за критические замечания, полезные советы и консультации, А.А.Колосова и В.Н.Шумана - за поддержку в проведении исследований, Л.В.Бабенко, В.С.Гольцева, Н.Г.Драверта, С.П.Левашова, Я.Б.Левенкова, М.Н.Маркову, Ю.Е.Неижсала, В.Д.Омельченко, Н.О.Цок, В.А.Шляховского, Н.А.Якимчука - за плодотворные дискуссии и творческое общение.

Весьма признателен и благодарен также всем представителям научного сообщества, связанного с интерпретацией гравитационных и магнитных полей. Исследования и разработки, выполненные в рамках этого сообщества, оказали существенное влияние на формирование научных взглядов автора.

Содержание работы

1. О ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

В главе в кратком, систематизирующем виде излагаются результаты обзора и обобщения опубликованных работ, связанных с разработкой алгоритмического, программного и методического обеспечения процесса интерпретации гравитационного и магнитного полей. Основные достижения и проблемы в этом направлении научных исследований анализируются в свете целого ряда аспектов.

Во многих публикациях методологического характера отмечается важность разработки эффективных и современных интерпретационных систем, включающих в себя известные технологии, методы и методики обработки и геологической интерпретации геофизических данных. Построение такого рода интерпретационных комплексов должно осуществляться на системных принципах и с учетом таковых как в изучаемых элементах геологического пространства, так и в самой конструктивной интерпретационной системе. Так как цели геолого-геофизического производства имеют информационный характер, а в самом производстве доминируют процессы такого же типа информационный аспект проблемы интерпретации приобретает важное значение для неформального анализа геолого-геофизических данных, создания баз данных, разработки экспертных систем. Значительный импульс исследованиям в этом направлении дает использование в интерпретационном процессе информационных технологий, персональных компьютеров и графических станций.

Существенное значение в интерпретационном процессе уделяется понятиям модельности и моделирования. Важность этих понятий обусловлена тем обстоятельством, что каждая конкретная интерпретация осуществляется в рамках априори принятых модельных представлений. Модель исследуемого объекта по сути представляется моментом связи всех данных в нечто целое, а моделирование рассматривается как процесс последовательного уточнения модели. Информативность модельных построений, а также степень их адекватности исследуемым объектам оценивается с помощью множества априори конструируемых критериев.

Использование строгих математических методов исследований для изучения фундаментальных свойств потенциальных полей обусловило получение важных результатов в а) решении прямых задач; б) изучении проблем единственности, устойчивости и эквивалентности; в) анализе интерференционных полей; г) аналитическом продолжении и определении особых точек; д) теории решения некорректно поставленных задач; е)

аппроксимационной оптимизации; ж) корреляционном прогнозировании и распознавании образов и т.д.

С аппроксимационной точки зрения создание эффективных интерпретационных систем невозможно без разработки удобных аппроксимирующих конструкций, позволяющих учитывать и использовать при моделировании априорные сведения разнообразного характера, а также формировать оптимизационные задачи подбора с минимально возможным количеством неизвестных и объемом вычислений. Эффективность интерпретационных систем тесно связана также с проблемами а) построения эффективных оптимизационных процедур для автоматизированного подбора параметров построенных аппроксимирующих конструкций; б) рациональной организации вычислительных процессов (постепенное усложнение модели, декомпозиция большой задачи на несколько подзадач меньшей размерности, интерактивный режим работы); в) технической реализации комплекса алгоритмических процедур (принципы организации программ, формализация и кодирование исходных данных, представление результатов, использование и хранение промежуточных данных и т.д.); г) разработки методических указаний и рекомендаций по использованию интерпретационных систем на основе решения множества модельных и практических задач.

В публикациях отмечается также важность алгоритмического подхода к проблеме моделирования конкретных элементов геологического пространства. Его реализация возможна при наличии необходимого количества элементарных модулей для поэлементного описания отдельных геологических процессов и объектов, а также алгоритмов конструирования моделей из отдельных модулей и их последующей оптимизации. Алгоритмическое моделирование позволяет систематизировать разнородные теоретические, эмпирические и эвристические связи, используемые в геологии и геофизике. Построение геологических компьютерных моделей не будет формализовано полностью: задача заключается в оптимизации функционирования системы интерпретатор-ЗВМ.

Обзор и обобщение опубликованных работ позволили сформулировать цель и основные задачи диссертации.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА

Процесс построения модели конкретного геологического объекта включает этапы: а) сбора, обработки и анализа геолого-геофизических данных; б) получения дополнительных инструментальных и экспериментальных данных; в) формирования рабочих моделей; г) анализа, коррекции и оптимизации рабочих моделей; д) выбора окончательной модели. На процесс изучения геологических объектов в той или иной степени влияют целевой, временной, субъективный, материально-технический факторы, а также фактор размерности.

В процессе моделирования объектов данные геофизических измерений используются в качестве критериев, характеризующих степень соответствия моделей реальным геологическим ситуациям, а также являются важнейшими элементами в алгоритмах автоматизированной коррекции априорных моделей и методиках моделирования в режиме интерпретатор - ЭВМ.

Математическая постановка задачи подбора сводится к решению систем линейных (при закрепленной геометрии модели) и нелинейных (в общем случае) уравнений. В случае введения двухсторонних ограничений на допустимые вариации искомых параметров постановка задачи обобщается и сводится к задачам математического программирования.

В разработанном алгоритмическом обеспечении подбор параметров модели базируется на минимизации суммы квадратов расхождений между измеренными и модельными компонентами полей

$$FC = \sum_{m=1}^M d_m \sum_{l=1}^{N_m} a_{lm} \left[\frac{u_{lm}^i}{u_{lm}^{cp}} - \frac{u_{lm}^i}{u_{lm}^{cp}} (\bar{x}^m) \right]^2, \quad (1)$$

где $u_{lm}^{cp} = \sum_{l=1}^{N_m} |u_{lm}^i| / N_m$; $u_{lm}^i = \sum_{j=1}^{k_m} u_{j,m}^i + A^m x^i + B^m y^i + C^m z^i + D^m$;

$\vec{x}^m = (x_1^m, x_2^m, \dots, x_{P_m}^m)$; M, m - количество и номер используемых при подборе компонент полей; d_m - весовой множитель вклада компоненты в значения FC; N_m - количество точек задания компоненты; a_{im} - вес i -ой точки; $U_{N,m}^i, U_{T,m}^i$ - измеренные и модельные значения компоненты; $U_{j,m}^i$ - вклад j -ой аппроксимирующей ячейки; K_m - количество аппроксимирующих ячеек; P_m - общее количество параметров; A^m, B^m, C^m, D^m - коэффициенты линейного фона.

При нормальном распределении помех в исходных данных значения подбираемых параметров, полученных минимизацией FC, будут оптимальными.

Основное назначение множителей U_m^{cp} в (1) состоит в нормировке вкладов отдельных компонент в суммарные значения FC. Необходимость в U_m^{cp} отпадает в логарифмической целевой функции

$$FL = \sum_{m=1}^M d_m \sum_{i=1}^{N_m} a_{im} \left[\ln \left| \frac{U_{N,m}^i + \Delta_{cm}}{U_{T,m}^i(\vec{x}^m) + \Delta_{cm}} \right| \right]^2 \quad (2)$$

Рельеф показателя FL существенно сглажен по сравнению с рельефом FC. При $\Delta_{cm} \rightarrow \infty$ значение FL стремится к нулю. Следовательно, соответствующим выбором Δ_{cm} можно регулировать как абсолютные значения FL, так и вклады различных компонент в их суммарные значения.

Некоторые версии программ подбора допускают использование в качестве показателей качества приближения в среднем (F1), среднеквадратического (F2) и равномерного (FM) приближений. В оптимизационной процедуре направление спуска на итерации строится с использованием вектор-градиента показателя FC

$$\frac{\partial FC}{\partial x} = -2 \sum_{m=1}^M d_m \sum_{i=1}^{N_m} \left\{ \frac{a_{im}}{U_{N,m}^{cp}} \left[U_{N,m}^i - U_{T,m}^i(\vec{x}^m) \right] \right\} \frac{\partial U_{T,m}^i(\vec{x}^m)}{\partial x} \quad (3)$$

Разработанное программное обеспечение допускает совместный подбор по компонентам Δg и $\Delta Z(\Delta T)$, трехкомпонентным измерениям магнитного поля $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, по каждой из перечисленных выше компонент отдельно, по вторым производным гравитационного потенциала, а также

по линейным трансформациям измеренных компонент произвольного типа, задаваемых операторами весового суммирования в скользящем окне вдоль профиля.

Предложенная аппроксимационная конструкция для параметризации моделируемых объектов допускает использование трех уровней аппроксимации: структурного, стратиграфо-литологического (вещественного) и сеточного. Структурный уровень предоставляет возможность реализации моделирования крупных объектов по частям, стратиграфо-литологический предполагает использование элементарных тел простой геометрической формы для описания стратиграфических разновидностей объекта, сеточный необходим для аппроксимации стратиграфических элементов модели с изменяющимися физическими свойствами. Практически она реализуется в рамках локальной базы данных и должна быть дополнена удобным и простым интерфейсом связи с пользователем, современными компьютерными средствами визуализации моделируемых объектов, диалоговым режимом работы оптимизационных процедур, алгоритмическими процедурами расчета вспомогательных физических характеристик отдельных стратиграфических элементов: объема, массы, избыточной массы, площади поверхности, координат центров тяжести и т.д.

Программно реализованная версия стратиграфо-литологического уровня аппроксимации предоставляет пользователю возможность одновременно использовать следующие элементарные аппроксимирующие ячейки: горизонтальные (двухмерные и ограниченные по простиранию) цилиндрические тела с многоугольными сечениями; левые и правые (двухмерные и ограниченные по простиранию) уступы с многоугольными ломаными контурами; вертикальные цилиндрические призмы с многоугольными сечениями в горизонтальной плоскости; точечные источники; горизонтальные (ограниченные по простиранию и двухмерные) стержни; наклонные материальные полосы; наклонные материальные листы; правые и левые горизонтальные полуплоскости; простирающиеся на бесконечность вправо и

влево-горизонтальные материальные листы; пласти конечной мощности и бесконечного простираения. Структура векторов подбираемых параметров для всех перечисленных ячеек идентична и может быть представлена в виде

$$\vec{X} = \vec{I}_y \cup \vec{I}_z = (\sigma, J_x, J_y, J_z, y_1, y_2, z_1, z_2, \dots, z_N, z_N), \quad (4)$$

где σ - плотность; J_x, J_y, J_z - вектор интенсивности намагничения; y_1, y_2 - параметры простираения; z_i, z_i - координаты угловых точек аппроксимирующих контуров; N - количество угловых точек (сторон) в аппроксимирующем многоугольнике.

Аппроксимационная конструкция позволяет: а) вводить ограничения на контур в целом (в виде прямоугольников или четырехугольников), а также на отдельные угловые точки; б) накладывать ограничения на форму четырехугольных ячеек; в) вводить для каждой ячейки локальную систему координат; г) фиксировать любой параметр аппроксимационной конструкции; д) задавать направление смещения угловых точек контуров; е) реализовать режим согласованного перемещения угловых точек (сторон) соприкасающихся слоев и блоков.

Возможности аппроксимирующей конструкции могут быть расширены за счет многогранников, построенных на сечениях, а также аппроксимирующих ячеек с поверхностями второго порядка: ограниченного по вертикали гиперболического купола, источника брахисинклинальной формы, ограниченного по простираению цилиндрического источника с сечением купольной форму.

Параметризация стратиграфических разностей с изменяющимися физическими свойствами осуществляется с помощью сеточных аппроксимирующих элементов. Особенностью предложенного алгоритма сеточной аппроксимации является его органическая связь с параметризацией простыми геометрическими телами: сеточные аппроксимации строятся алгоритмически по аппроксимациям цилиндрическими телами с многоугольными сечениями (алгоритм построения сеточных покрытий многоугольных

контуров детально описывается). Для описания переменных физических свойств в стратиграфических разностях применяется алгоритм сплайн-аппроксимации. Решение прямых задач от сеточных аппроксимаций моделируемых разрезов может осуществляться палеточным способом. На основе сеточных аппроксимаций предложен также алгоритм для расчета конечно-разностным способом вектора производных целевой функции по геометрическим параметрам источников при подборе их конфигураций.

Выбор необходимых режимов для отдельных аппроксимирующих ячеек осуществляется с помощью вектора режимных параметров, который определяет тип, состояние, физическое наполнение, цвет ячеек, а также использование ограничений на форму ячеек и отдельных ее параметров, вспомогательной системы координат, закреплений необходимых параметров.

Профильная и координатная формы организации информационных массивов для каталогов моделируемых компонент полей предоставляют возможность использовать при подборе данные измерений в пространстве, на плоскости, вдоль профиля или группы профилей (как на одной плоскости, так и на разных уровнях), в скважинах.

На базе монтажного принципа и горизонтальной цилиндрической ячейки с многоугольным сечением (двухмерной и ограниченной по проектированию) разработан алгоритм подбора конфигурации изолированных источников и контактной поверхности по перечисленным выше компонентам полей методом последовательных (положительных и отрицательных) приращений модели. На каждой итерации этого алгоритма приращение модели строится за счет изменения положения одной угловой точки контура (приращение на которой наилучшим образом удовлетворяет используемый критерий приближения наблюдаемого и модельного полей). Алгоритм реализован в виде дополнительного режима работы основной программы, что позволяет, при необходимости, переключаться на подбор конфигураций методами оптимизации.

Повышению эффективности подбора конфигурации изолированных источников способствует алгоритм, работающий в режиме подбора координат центра тяжести и избыточной массы на начальных итерациях и в режиме подбора конфигурации на последующих итерациях.

Существенное внимание уделяется вопросу использования сплайн-аппроксимации в алгоритмах подбора. Детально описывается алгоритм параметризации нелинейного фона сплайнами, особенности которого сводятся к следующему. Вдоль профиля фиксируется некоторое количество точек, которые в дальнейшем принимаются за узловые точки сплайна. В этих точках вместе со значениями поля задаются предполагаемые значения фоновой компоненты. По координатам узлов и фоновым значениям вычисляются коэффициенты сплайна. В промежутках между узлами значения фона вычисляются интерполяцией. Оптимальные значения фона в узлах сплайна определяются в результате подбора. Отличительной особенностью алгоритма является возможность эффективного введения ограничений на возможные пределы вариаций фоновой компоненты. Сплайн-аппроксимация используется также для интерполяции и сглаживания измененных компонент полей, рекуррентного вычисления горизонтальных производных высших порядков, описания физических и геометрических параметров источников и элементов нормального магнитного поля.

В основу организации алгоритмического и программного обеспечения моделирования необходимо положить такие принципы, которые обеспечат моделям: а) компьютерный характер (доступность пользователю для анализа, модификации, оптимизации в любой момент времени и в любом месте); б) полноту (наполненность всем спектром геолого-геофизической и экспериментальной информации); в) численный тип (показатели близости между модельными и измеренными компонентами полей должны вычисляться); г) единственность геометрического представления для всех геофизических полей; д) общедоступность (возможность работы с моделью как геофизику-интерпретатору, так и геологу, не владе-

щему навыками количественной интерпретации); е) историческую справку. Это позволит: а) рассматривать интерпретацию как непрерывный во времени процесс сужения неопределенности; б) осуществлять переинтерпретацию по мере поступления новой информации; в) проводить согласование и увязку полевых геолого-геофизических исследований с информационным обеспечением конкретных частей компьютерной модели.

Элементами специфической локальной базы данных, с помощью которой реализуются модели конкретных геологических объектов, являются: а) каталоги полей; б) скважины; в) стратиграфическая колонка; г) физические свойства; д) геометрия модели. К дополнительным можно отнести элементы: а) вспомогательная модельная задача; б) локальная задача; в) история модели; г) вспомогательная информация. В интерфейс связи пользователя с отдельными элементами компьютерной модели можно включить следующие блоки процедур: а) визуализации; б) оптимизации; в) вычисления модельных компонент полей; г) автоматизированного подбора; д) формирования закреплений и ограничений; е) диалогового общения; ж) справочной и вспомогательной информации.

3. ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ АППРОКСИМИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИИ МЕТОДАМИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Эффективность различных версий программно-алгоритмического обеспечения подбора методами многопараметрической оптимизации в значительной степени определяется используемыми оптимизационными процедурами. Поэтому вопросам построения эффективной оптимизационной процедуры в работе уделяется должное внимание.

Для ряда источников аномалий простой геометрической формы (шарового и призматического) рассчитаны и построены линии уровня используемых показателей близости между подбираемыми и модельными компонентами полей в отдельных гиперплоскостях пространства параметров. Выполненные построения показали еще раз, что для геофизических задач подбора методами многопараметрической оптимизации достаточно ти-

пична "овражная" форма изолиний используемых показателей качества, что непосредственно определяет сходимость применяемых алгоритмов оптимизации.

Детально рассматриваются и анализируются градиентные методы спуска, итерационные процессы которых подчиняются условию

$$\vec{X}_{k+1} = \vec{X}_k + \alpha_k \vec{P}_k, \quad \alpha_k > 0, \quad k=0,1,\dots \quad (5)$$

где \vec{P}_k - направление спуска и α_k - множитель, определяющий длину шага. В градиентном спуске \vec{P}_k задает направление антиградиента.

В методе скорейшего спуска длина шага в направлении \vec{P}_k определяется алгоритмом оптимальной параболической аппроксимации минимизируемой функции в направлении спуска по трем точкам.

Сходимость градиентных методов спуска существенно повышается при использовании в качестве \vec{P}_k нормированного (с помощью специальных множителей) направления антиградиента. Повышению сходимости итерационного процесса скорейшего спуска способствует также использование после 3-4 итераций известной процедуры

$$\vec{X}_{k+1} = \vec{X}_k + Q(\vec{X}_k - \vec{X}_{k-2}). \quad (6)$$

Оптимальное значение множителя Q на каждой итерации определяется в процедуре алгоритмически.

Вычислительные эксперименты показали, что вдали от минимума (на начальных итерациях подбора) алгоритм скорейшего спуска с нормирующими множителями и процедурой ускорения сходимости (6) является достаточно эффективным, тогда как в окрестностях минимума для него характерна медленная сходимость.

В достаточной степени детально описывается и анализируется также алгоритм оптимизации, построенный на базе известной процедуры сингулярного разложения матриц (SVD). В окрестностях минимума этот алгоритм обладает несомненными преимуществами по отношению к скорейшему спуску. Поэтому, используемая в программах подбора оптимизационная процедура организована таким образом, что позволяет применять

градиентный спуск на начальных итерациях и алгоритм SVD в окрестностях минимума (используя тем самым преимущества каждого из методов), а также переключаться с алгоритма SVD на скорейший спуск и обратно на любом шаге итерационного процесса в случае преждевременного возникновения ситуации выхода из итерационного процесса. Процедура является открытой и может быть дополнена другими эффективными алгоритмами оптимизации.

В качестве критериев окончания итерационного процесса оптимизации в оптимизационной процедуре используются: а) абсолютное значение целевой функции; б) общее количество итераций; в) величина относительного изменения целевой функции от итерации к итерации.

Для стабилизации итерационного процесса при неудачном выборе начального приближения используется процедура ограничения величины скачков параметров на каждой итерации. Вектор максимально допустимых приращений параметров вводится с учетом ограничений на возможные пределы их вариаций.

Используемый в оптимизационной процедуре принцип монотонного уменьшения оптимизируемой целевой функции от итерации к итерации является достаточно жестким. С одной стороны, он не позволяет выбраться из локального минимума, в который попадает итерационный процесс. С другой стороны, этот критерий приводит к тому, что максимальные приращения (такие, что могут привести к "перепрыгиванию" итерационного процесса в другой, достаточно далекий от начального приближения минимум целевой функции) подбираемые параметры получают на начальных итерациях подбора. Следовательно, использовать ограничения на приращения параметров на итерациях (а значит и регуляризовать итерационный процесс) достаточно на начальных итерациях подбора.

Уменьшить затраты времени на осуществление вычислений на одной итерации подбора можно с помощью двух процедур рациональной ор-

ганизации вычислений: а) базирующейся на разбиении подбираемого множества наблюдаемых компонент полей на несколько (два или более) подмножеств с последующим осуществлением расчетов на итерации только на одном из подмножеств; б) использующей алгоритм сплайн-аппроксимации для интерполяции моделируемой компоненты поля и производных целевой функции по подбираемым параметрам с базовых точек расчета на все точки задания.

Изучению достаточно больших окрестностей пространства параметров отдельных задач может способствовать алгоритм многовариантного подбора, в котором по заданным правилам автоматически формируются различные начальные приближения, попадающие в различные части исследуемого пространства.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОДБОРА МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Отдельные режимы программ, используемые в них специальные алгоритмические процедуры, а также различные версии самих программ подбора в целом тестировались и опробовались на представительном множестве модельных задач методом вычислительного эксперимента. Практически все результаты численных экспериментов представлены в работе в графическом и табличном виде и детально описаны, так как являются тем базисом, опираясь на который интерпретатор может составить достаточно объективное представление об особенностях разработанного программного обеспечения, с одной стороны, и специфических нюансах методов подбора, с другой.

Вычислительные эксперименты проводились на моделях источников самой разнообразной формы: синклинальное тело, контактная поверхность, наклонный пласт, наклонный уступ с многоугольным ломаным контуром, многоугольное пластинчатое тело, трехмерная прямоугольная и наклонная призма, точечная масса, нить полюсов, наклонная материальная полоса, наклонный материальный лист, слоисто-блоковый объект.

В процессе вычислений исследовались: а) зависимость результатов от используемых оптимизируемых показателей качества (сумма квадратов расхождений, среднеквадратическое приближение, сумма модулей расхождений, равномерное приближение, логарифмический показатель близости); б) влияние структуры множеств задания подбираемых компонент полей на результаты восстановления параметров источников (на поверхности, на разных уровнях, на поверхности и в скважине, на поверхности и ниже уровня расположения источника, с произвольным и одинаковым шагом задания вдоль профиля, с различным количеством точек задания моделируемой компоненты на профиле); в) влияние случайных и стационарных помех на результаты подбора; г) зависимость результатов от используемых алгоритмов оптимизации и режимов оптимизационной процедуры (метод спуска с процедурой ускорения сходимости и нормирующими множителями, алгоритм SUD, ограничения на приращения параметров и возможные пределы изменения самих параметров); д) зависимость решений от выбора начального приближения; е) возможность одновременного подбора геометрических и физических параметров источников; ж) возможность совместного подбора по компонентам гравитационного и магнитного полей и т.д.

Выполненные модельные исследования позволяют констатировать следующее.

Даже для простых изолированных источников аномалий целевые функции, на минимизации которых базируются алгоритмы подбора, многоэкстремальны. В таких ситуациях конечные результаты подбора в значительной степени предопределяются выбором начального приближения, а также особенностями и режимами используемых алгоритмов оптимизации. Следовательно, при моделировании строения конкретных геологических объектов необходимо тщательно учитывать имеющуюся априорную информацию для построения начального приближения. Необходимо также добавить, что отдельная траектория в пространстве параметров, пост-

роенная некоторым итерационным процессом, не гарантирует попадание в глобальный минимум целевой функции. Поэтому, при недостатке информации для выбора начального приближения целесообразно исследовать несколько альтернативных вариантов начального приближения, или же воспользоваться стратегией автоматического формирования ряда начальных приближений в окрестностях глобального.

При решении конкретных практических задач целесообразно применять методику последовательного усложнения модели. На начальных этапах подбора следует использовать грубую аппроксимацию модели контурами небольшой размерности. На конечных этапах модель можно детализировать путем увеличения размерностей аппроксимирующих многоугольных контуров.

Для повышения устойчивости решений в задачах с аппроксимирующими конструкциями с большим числом степеней свободы необходимо накладывать достаточно жесткие ограничения на подбираемые конфигурации (ограничивать возможные пределы вариаций параметров, использовать ограничения на приращения параметров на итерациях, закреплять некоторые параметры и т.д.).

При неудачном выборе начального приближения (случаи, когда контуры источника и начального приближения не пересекаются вообще, или совпадают их ограниченные части) целесообразно на начальных итерациях осуществлять подбор координат центра тяжести и избыточной массы источника. На последующих этапах можно переходить к более детальному подбору их конфигураций.

При соблюдении условий информационной корректности в конкретной задаче подбора дальнейшее увеличение количества точек в наблюдаемых аномалиях практически не оказывает существенного влияния на результаты подбора; увеличивается только время счета. Повышению точности восстановления параметров источников, а также скорости сходимости итерационного процесса существенным образом способствует ис-

пользование при подборе значений компонент полей, заданных в пространстве, и в особенности - в непосредственной близости от источников аномалий. В последнем случае "овражность" минимизируемых в алгоритмах автоматизированного подбора целевых функций существенно уменьшается.

При одновременном подборе физических и геометрических параметров источников сходимость итерационного процесса в значительной степени замедляется, избыточные плотность и вектор интенсивности намагничивания удовлетворительно не подбираются. Значения моделируемой компоненты поля в таких задачах восстанавливаются, в основном, за счет "практически эквивалентных" конфигураций источника. Поэтому в некоторых случаях целесообразно подбирать конфигурацию модели при нескольких фиксированных значениях физических параметров, в других - на начальных итерациях задавать подбор только физических параметров, геометрические фиксировать. В то же самое время при совместном подборе по измеряемым компонентам гравитационного и магнитного полей избыточная плотность (интенсивность намагничивания) восстанавливается с высокой точностью одновременно с геометрическими параметрами при фиксации значений избыточной намагниченности (плотности) моделируемого источника.

В случаях решения сложных практических задач рекомендуется осуществлять декомпозицию сложной задачи на несколько более простых подзадач, так как при увеличении количества одновременно подбираемых параметров существенно замедляется сходимость используемой процедуры оптимизации и, как следствие этого, увеличиваются затраты машинного времени.

Используемая в алгоритме процедура оптимизации характеризуется тем, что подбираемые параметры получают максимальные приращения на первых итерациях подбора. Поэтому, при неудачном задании начального приближения рекомендуется вводить ограничения на максимальные при-

ращения параметров на каждой итерации.

На первой стадии решения задачи рекомендуется вычислять только аномальные эффекты от начального приближения. Последующий анализ этих эффектов позволяет исключить грубые промахи в начальном приближении, ошибки в подготовленных исходных данных. В конечном итоге этот прием позволяет практически всегда сократить общее количество машинного времени, необходимое для решения задачи.

При использовании двумерных модификаций аппроксимирующих ячеек время вычислений уменьшается практически в два раза. Поэтому там, где это допустимо, следует на начальных этапах моделирования использовать двумерные аппроксимирующие ячейки.

Применение в алгоритме подбора методом последовательных приращений процедуры, обеспечивающей соблюдение условия квазивыпуклости искомого контура, способствует более точному восстановлению конфигурации аномального источника.

Для разработанной оптимизационной процедуры нецелесообразно использовать в качестве показателя качества сумму модулей расхождений и равномерное приближение в силу медленной сходимости итерационного процесса подбора по этим показателям. Медленная сходимость итерационного процесса при минимизации этих показателей обусловлена прежде всего особенностями самих функций. Они состоят в том, что окрестности минимумов, а также "оврагов" характеризуются более крутым рельефом и наличием особенностей первого рода.

На модельных примерах установлено, что сходимость итерационного процесса градиентного спуска и точность восстановления параметров источников при подборе по измеряемым компонентам магнитного поля и вторым производным потенциала выше, чем при подборе по компоненте гравитационного поля Δg . Для алгоритма сингулярного разложения матриц такая ситуация не характерна.

При подборе параметров наклонной призмы наиболее устойчиво под-

бираются вертикальные контакты и верхняя кромка, намного хуже - интенсивность намагничения, нижняя кромка и угол наклона призмы. Следует отметить наличие сильных корреляционных зависимостей между интенсивностью намагничения, нижней кромкой и постоянной составляющей фона.

Включение сингулярных аппроксимирующих ячеек в аппроксимационную конструкцию повышает возможности интерпретатора при параметризации реальных геологических разрезов различной сложности. В этих случаях легко реализовать методику последовательного усложнения модели. На начальных этапах подбора можно использовать сингулярные аппроксимирующие ячейки. В дальнейшем, на этапах детализации следует переходить к цилиндрическим аппроксимирующим ячейкам с многоугольными сечениями. Сингулярные аппроксимирующие ячейки целесообразно использовать при построении числовых моделей аномалий методом автоматизированного подбора, а также при вычислении весовых множителей палеток для построения линейных трансформант измеренных компонент полей.

При применении алгоритма сингулярного разложения матриц скорость сходимости итерационного процесса, а также точность восстановления параметров при попадании итерационного процесса в глобальный минимум значительно выше таковых при использовании градиентного спуска. Особенно эффектно этот факт проявляется в окрестностях глобального экстремума целевой функции.

При решении задач подбора алгоритмом SVD могут возникать ситуации, в которых происходит останов итерационного процесса до достижения приемлемой точности восстановления наблюдаемого поля. Для таких задач требуемая точность может быть достигнута за счет а) изменения значения параметра процедуры ограничения приращений переменных на итерациях; б) нормировки матрицы и свободных членов системы с помощью среднего значения моделируемой компоненты поля; в) применения градиентного спуска на начальных итерациях подбора.

Вследствие существенных различий между направлением наискорейшего спуска и направлением, определяемым сингулярным разложением, итерационные процессы, порождаемые этими методами довольно часто с одинаковых начальных приближений приводят в разное (локальные) минимумы оптимизируемой целевой функции. В некоторых пределах управлять попаданием итерационного процесса в те или иные локальные экстремумы можно с помощью указанных в предыдущем пункте режимных параметров программы.

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ТРАНСФОРМАЦИИ В АЛГОРИТМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ АНОМАЛИИ

В главе исследуются возможности использования линейных трансформаций потенциальных полей в алгоритмах автоматизированного подбора. Особенность используемого в работе подхода состоит в том, что в алгоритме подбора по трансформантам один и тот же приближенный оператор трансформирования действует на измеренные и модельные множества моделируемых компонент полей. В этой ситуации: а) точность вычисления трансформант не оказывает существенного влияния на результаты подбора - используются только свойства соответствующих трансформант; б) отпадает необходимость в точных аналитических выражениях трансформант для вычисления эффектов от модельных источников; в) подбор по трансформантам алгоритмически естественно и просто вписывается в традиционную схему автоматизированного подбора.

В профильном варианте алгоритма тип трансформанты при подборе задается линейным оператором весового суммирования в скользящем окне вида

$$\mathcal{U}_i^T = \delta \mathcal{U}_i = \sum_{j=-n}^n c_j \mathcal{U}^{i+j}, \quad (7)$$

где $\delta \mathcal{U}_i$ - значение трансформанты в точке; c_j , $j=1, 2, \dots, q$ - весовые множители оператора трансформирования; $q=2n+1$ - количество значений компоненты \mathcal{U} , попадающих в скользящее окно. Подставив в (1) $\delta \mathcal{U}_i$ и

$\delta \mathcal{U}_T$ в виде (7) вместо \mathcal{U}_H и \mathcal{U}_T и положив $\mathcal{U}^{\text{оп}} = 1$, получим выражение показателя качества для подбора по трансформантам

$$FC^T = \sum_{m=1}^M \alpha_m \sum_{i=1}^{N_m} \alpha_{im} \left\{ \sum_{j=-N_m}^{N_m} C_{jm} \left[\mathcal{U}_{H,m}^{ij} - \mathcal{U}_{T,m}^{ij}(\vec{I}^m) \right] \right\}^2. \quad (8)$$

Особенность целевой функции (8) состоит в том, что она определяется только исходными (измеренной и модельной) компонентами полей. Следовательно, при подборе сами значения трансформант можно не вычислять. При $N_m=0$ и $C_j=1$ выражение FC^T тождественно выражению FC . Описанная технологическая схема автоматизированного подбора по трансформантам измеренных компонент полей является более общей по сравнению с традиционными схемами подбора по самим компонентам полей. В этой схеме подбор по непосредственно измеренным компонентам является частным случаем подбора по трансформантам.

Рассматриваются два способа вычисления весовых множителей операторов трансформирования. Суть известного способа вычисления весов с помощью подсобных тел состоит в следующем. Для априори сформированной модели источника аномалий на соответствующих множествах задания рассчитываются значения исходной и трансформированной компонент по точным аналитическим выражениям. Для соответствующих палеток трансформирования формируется система линейных уравнений, переводящая множество значений исходной компоненты в трансформированное множество. Вектором неизвестных этой системы являются значения весовых множителей. Сформированные таким образом системы линейных уравнений плохо обусловлены и для их решения применяются регуляризирующие алгоритмы. Второй способ вычисления весовых множителей операторов трансформирования основан на известной процедуре приведения ряда Фурье к интегралу типа свертки. Полученные с помощью этого способа весовые множители могут использоваться для трансформирования исходной компоненты поля в горизонтальную и вертикальную производные.

Реализованная на базе предложенного алгоритма программа автоматизированного подбора опробована на значительном количестве модельных и практических задач. При этом исследовались такие известные трансформанты как кривая вариаций силы тяжести ($\delta\Delta g$), конечно-разностный аналог горизонтальной производной (δV_{zx}), полный (нормированный) градиент. На моделях источников синклиналиное тело и контактная поверхность показано, что результаты подбора методом скорейшего спуска по трансформантам $\delta\Delta g$ и δV_{zx} практически аналогичны результатам подбора по вторым производным V_{zz} и V_{zx} соответственно. При этом: а) повышается скорость сходимости итерационного процесса подбора и точность восстановления подбираемых параметров; б) применение этих трансформант позволяет исключать постоянную и линейную фоновые компоненты моделируемого поля. Сказанное справедливо также и при подборе практических аномалий. Однако здесь отмеченные особенности проявляются не в такой степени, как при подборе модельных аномалий. Обусловлено это, скорее всего, более широкими пределами практической эквивалентности, связанными как с ошибками задания значений измеренных компонент полей, так и с неучтенными в начальном приближении возмущающими объектами. Результаты подбора по трансформантам продолжения поля вниз свидетельствуют о том, что эти трансформанты влияют на процесс подбора в существенно меньшей степени, чем это наблюдается при подборе по $\delta\Delta g$ и δV_{zx} .

Анализ технологических вопросов применения линейных трансформаций потенциальных полей различного вида в алгоритмах подбора указывает на необходимость дополнения этих алгоритмов следующими программно-алгоритмическими процедурами: а) трансформации начального приближения моделируемого объекта в формальную (вспомогательную) модель, состоящую исключительно из сингулярных аппроксимирующих ячеек; б) подбор моделируемого поля линейными параметрами этой модели; в) формирования соответствующих систем линейных уравнений для находке-

ния весовых множителей требуемых операторов трансформирования с использованием формальной модели; г) регуляризованного решения систем линейных уравнений. Построенная по такой схеме формальная модель разреза при соответствующей точности аппроксимации значений измеренной компоненты может использоваться для построения числовой модели этой компоненты, необходимой для приведения аномальных значений к равномерной сети, вычисления аномальных эффектов в пространстве и т.д.

6. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Разработанное программное обеспечение автоматизированного подбора гравитационных и магнитных полей широко применялось при решении разнообразных практических задач. Возможности и методические особенности его использования иллюстрируются в работе на примерах моделирования: а) гравитационного поля вдоль регионального сейсмического профиля Путивль - Кривой Рог; б) конфигурации интрузивных массивов Корсунь-Новомиргородского плутона; в) разновысотных аэромагнитных измерений вдоль региональных геотраверсов, пересекающих Урал; г) отдельных рудных тел железорудного месторождения на Урале; д) гравитационного и магнитного полей вдоль геологических разрезов при крупномасштабном геологическом картировании. Моделирование выполнялось на ЭВМ различного типа (ЕС, СМ, ПК), при этом решались задачи в линейной, нелинейной и смешанной постановках и использовались следующие методические приемы: а) моделирование по частям сложных объектов и разрезов; б) многовариантного решения одной и той же задачи (с различных начальных приближений, при разных режимах работы программы подбора, при разных вариантах закрепления ряда параметров модели, с использованием линейных трансформаций и без них, с ограничениями на подбираемые параметры и их приращения и без таковых); в) оценки точности полученных решений на специально сконструированной для этих целей сопутствующей модельной задаче.

Профиль ГСЗ Путивль – Кривой Рог проходит через Криворожскую и Днепровско–Донецкую сверхглубокие скважины. Его длина – 400 км. При его параметризации использовались двумерные цилиндрические ячейки с многоугольными сечениями. Вертикальные и горизонтальные контакты между блоками задавались с учетом установленных по сейсмическим данным разломов и границ. Рассмотрены два варианта аппроксимации разреза (65 и 57 многоугольными блоками). Различаются эти варианты между собой детальностью аппроксимации верхней мантии. При решении прямой и обратной задач плотность в пределах отдельных блоков считалась постоянной, а также накладывались ограничения на возможные пределы ее вариации. В процессе вычислений использовались значения гравитационного поля в 77 точках, снятые с шагом 5 км вдоль профиля. В некоторых вариантах расчеты выполнялись по значениям поля, сглаженным алгоритмом сплайн-аппроксимации. Начальные значения плотностей в блоках заданы с использованием скоростного разреза и известных обобщенных данных о скорости и плотности. Результаты выполненных расчетов позволяют сформулировать следующие методические выводы.

1. Разработанное программное обеспечение существенно ускоряет процесс моделирования гравитационного поля вдоль региональных профилей и предоставляет возможность анализировать различные, практически-эквивалентные решения. Расхождения между некоторыми параметрами практически-эквивалентных решений могут быть достаточно большими. Уменьшить количество практически-эквивалентных решений можно за счет сужения ограничений на пределы изменения плотностей в блоках.

2. С увеличением размерности задач подбора а) точность восстановления подбираемых параметров понижается; б) повышается неустойчивость решений; в) без жестких ограничений на пределы изменений параметров получение содержательных решений невозможно. Использование принципа декомпозиции задачи большой размерности на несколько небольших подзадач может способствовать повышению точности решений.

3. При сопоставлении с абсолютными значениями плотностей в блоках полученную среднемодульную точность подбора параметров сопутствующих модельных задач порядка $0,045-0,090 \text{ г/см}^3$ можно считать вполне удовлетворительной: отношение точности к абсолютным значениям плотности составляет всего 1.5-3.5%. Однако если рассматривать эти ошибки относительно возможных пределов вариаций подбираемых параметров, то в процентном отношении это уже будет на порядок выше.

4. Оценку точности (пределов разброса) подбираемых параметров целесообразно проводить на сопутствующей модельной задаче, поставленной на базе какого-либо приемлемого варианта решения практической.

5. Постоянную составляющую фоновой компоненты можно моделировать с помощью двух формальных приемов: а) подбором плотности с обратным знаком в объемлющем весь разрез блоке; б) использованием линейного оператора трансформирования в скользящем окне исходной компоненты в трансформанту $\delta V_{гх}$.

Корсунь-Новомиргородский плутон расположен в центральной части Украинского щита, является многофазным интрузивным телом и сложен породами анортозит-рапакивигранитной формации, включающей основные, кислые, щелочные и гибридные разности. Плотность рапакиви и вмещающих пород (биотитовые гнейсы и мигматиты) были приняты равными $2,60$ и $2,63 \text{ г/см}^3$ соответственно. Включающий различные разности массив основного состава характеризуется широким диапазоном изменения плотности.

Анализ гравитационного поля и другой геолого-геофизической информации привели к выводу, что положительные аномалии от основных пород следует рассматривать как возмущение на фоне общего минимума силы тяжести, связанного с наличием крупного тела гранитов, обладающего дефицитом плотности по сравнению с вмещающими породами. Следовательно, моделируемые аномалии гравитационного поля представляют

собой результат интерференции от двух объектов: гранитов и расположенного в них тела габбро-анортозитов. Соответственно моделию первого приближения выбраны два вложенных друг в друга тела, создающих гравитационные эффекты противоположного знака.

Предварительной оценкой гравитационных эффектов от возможных тел габбро-анортозитов и гранитов отдельно установлено, что наибольшей геологической достоверностью отличаются модели с контрастами плотности $0.20-0.22 \text{ г/см}^3$. Результаты моделирования показывают, что на профилях, пересекающих Городищенский массив в его центральной части, модельное тело основных пород имеет форму перевернутого конуса с максимальной мощностью 5 км. На остальных профилях, проходящих в его краевых частях, модели представляют собой пластообразные тела, мощность которых не превышает 1-2 км. Тело гранитов в осевой части подобно телу габброанортозитов, максимальная глубина его погружения 10 км, к востоку мощность резко сокращается.

Таким образом, руководствуясь структурными различиями гранитов рапакиви и вмещающей их гнейсо-мигматитовой толщи, которые проявились в волновом поле, удалось оконтурить интрузивный комплекс на глубине в пределах Корсунь-Новомиргородского плутона, а затем с помощью гравитационного моделирования восстановить в верхней части разреза мало мощное тело основных пород.

В РГК "Уралгеология" интенсивно проводятся исследования по региональным пересечениям Урала методом разновысотной аэромагнитной съемки по системе широтных и узязочных меридиональных профилей. При моделировании распределений магнитоактивных масс вдоль таких геотраверсов использовалось разработанное программное обеспечение. Основные методические моменты процесса моделирования сводятся к следующему. По геологическим данным строится петромагнитный разрез вдоль линии расчетного профиля, на котором выполнены разновысотные аэромагнитные измерения. Размеры магнитоактивных объектов в плане опре-

деляются по картам изолиний магнитных аномалий. По данным измерений ΔT на нижнем уровне полета производится моделирование неглубоко залегающих объектов (до 5-6 км). Затем от полученной модели решается прямая задача на более высокие уровни полета. Вычисленные таким образом значения вычитаются из наблюдаемого поля. Остаточные аномальные значения поля, отождествляемые с региональной составляющей АМП, используются при решении обратной и прямой задач для построения магнитоактивного' слоя до 20-40 км и более.

Аномальное магнитное поле вдоль моделируемых профилей имеет сложный характер. На измеренных кривых на всех высотах плавными аномалиями отмечается восточная окраина Восточно-Европейской платформы, высокоинтенсивными градиентными полями на фоне региональной отрицательной аномалии - Уральская складчатая система, аномалиями средней интенсивности - западная окраина Западно-Сибирской плиты. Магнитоактивный слой на платформах имеет двухярусное строение. Нижний ярус связан с породами консолидированной коры, а верхний - с интрузивными и эффузивными комплексами пород основного и ультраосновного состава. Границы консолидированного основания платформ фиксируются ступенеобразными понижениями (100-150 нТл) магнитного поля. Сама Уральская складчатая система находится в пониженном магнитном поле, что может указывать на отсутствие здесь консолидированной коры платформенного типа.

Моделирование рудных тел железорудного месторождения проводилось по частям на основе данных бурения и магнитного каротажа скважин. Вся процедура моделирования включала этапы а) автоматизированного решения обратной задачи магниторазведки по аномальному полю ΔZ для отдельных блоков тел; б) решение прямой задачи по всему моделируемому объему рудной массы; в) корректировку решения и повторение предыдущих этапов; г) визуализацию результатов моделирования (отстройка планов залегания кровли и подошвы рудных тел и изолиний их

мощностей). Подбор параметров отдельных блоков со сложной конфигурацией проводился по данным трехкомпонентных измерений магнитного поля в скважинах. Решение задачи осуществлялось одновременно по данным измерений во всех окружающих моделируемые блоки скважинах. Рассчитан геометрический объем смоделированной рудной массы, а также осуществлен перевод объема в запасы рудной массы при различных значениях средних плотностей. При этом учитывались результаты исследования зависимости величины намагничения в отдельных блоках от среднего содержания железа.

7. АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АНОМАЛИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ

Адаптированные для целей моделирования геотермических аномалий версии программ автоматизированного подбора базируются на минимизации показателей качества (1) и (2) и позволяют осуществлять подбор параметров нестационарных источников тепла по температурным аномалиям и аномалиям теплового потока отдельно и совместно.

Параметризация источников геотермических аномалий осуществляется с помощью аппроксимационной конструкции, включающей элементарные ячейки призматической формы (параллелепипеды) двух типов: а) кратковременно действующие или дополнительные (интенсивность тепловыделения которых на протяжении времени их действия может быть постоянной или изменяться по линейному или квадратичному законам); б) остывающие (описывающие процесс остывания после мгновенного повышения температуры на определенную величину в некотором объеме пространства). Обобщенный вектор параметров аппроксимирующих ячеек представляется в виде

$$\vec{x} = (a, \lambda, \Delta T, Q_0, t, y_1, y_2, x_1, x_2, k_1, k_2, A, B, C, \tau), \quad (9)$$

где a - температуропроводность; λ - теплопроводность; ΔT - температурное повышение; Q - интенсивность тепловыделения; t - время с мо-

мента включения источника; $Y_1, Y_2, X_1, X_2, h_1, h_2$ - геометрические параметры призма; A, B, C - коэффициенты параболы, определяющей изменение интенсивности тепловыделения во времени; T - время действия источника. Для остывающих источников физическими параметрами являются $a, \lambda, \Delta T, t$. Любой параметр из вектора (9) в процессе решения конкретной задачи может подбираться или фиксироваться. В алгоритме и программе расчета стационарных температур и тепловых потоков элементарной аппроксимирующей ячейкой также является параллелепипед.

Структура геотермических версий программ подбора, используемая в них оптимизационная процедура, а также основные режимы их работы в основном идентичны таковым в программах подбора гравитационных и магнитных аномалий. Кроме того, в этих версиях дополнительно реализована возможность введения одинаковых приращений однотипных параметров для любого, априори заданного числа аппроксимирующих ячеек.

Эффективность разработанных программ исследовалась на модельных задачах подбора геометрических и физических параметров источников тепла разнообразной формы: интрузии, серии интрузий, интрузии с подводным каналом, выступа астеносферы и внедрившейся из него по истечении некоторого времени интрузии. Моделировались нестационарные аномалии, вызванные остывающими, дополнительными и комбинированными источниками. Приведенные модельные примеры показали, что подбираемые аномалии восстанавливаются достаточно надежно. Однако при этом подобранные геометрические и физические параметры источников тепла не всегда совпадают с истинными, а их конечные значения существенным образом зависят от начального приближения. Для простых моделей остывающих источников основные параметры ($\Delta T, t, X_1, X_2, h_1$) восстанавливаются достаточно надежно с любых начальных приближений.

Возможности геотермических программ подбора при решении прак-

тических задач иллюстрируются примерами моделирования тепловых аномалий в активных регионах: Равнинном Крыму, Восточных Карпатах, Байкальской рифтовой зоне, Курило-Камчатской области.

Трехмерное моделирование теплового поля Равнинного Крыма позволяет сделать вывод, что интенсивные аномалии теплового потока в этом районе можно объяснить подъемом нагретого глубинного вещества в верхнюю часть мантии и, возможно, в земную кору. Эти аномалии связаны с молодой тектономагматической активизацией территории, расположенной между границей Восточно-Европейской платформы и Горным Крымом. Активные процессы в Одесско-Джанкойской впадине продолжались, очевидно, с юры до неогена, а в пределах отдельных структур (Тарханкутско-Новоселовского поднятия в частности) и в плиоцен-четвертичное время. Активность этой территории, сопровождавшаяся формированием грабенообразных прогибов и магматической деятельностью, связана с формированием Горного Крыма и Черноморской впадины.

Моделирование теплового поля Восточных Карпат выполнено вдоль геотраверса II, пересекающего Паннонскую впадину, Закарпатский прогиб, Складчатые Карпаты, Предкарпатский прогиб и докембрийскую платформу. Результаты моделирования позволяют выделить два этапа повышенной геотермической активности. Один из них совпадает с начальным этапом формирования Карпатской геосинклинали, другой - с активизацией этого региона в неогене. Основным источником тепловой энергии на последнем этапе находился внутри Карпатской области, западнее Закарпатского разлома. Здесь кровля частично расплавленного слоя достигала глубин 55-60 км. Возможны также локальные очаги плавления в земной коре на глубинах 15-20 км.

Результаты моделирования аномалии теплового потока над Байкальским рифтом показали, что региональную составляющую этой аномалии можно объяснить подъемом астеносферы с глубин 150 км до современной границы М, если подъем начался около 35 млн лет назад и продолжался

28-30 млн лет. Локальная аномалия может быть вызвана трещинной интрузией мантийного вещества в земную кору под Байкалом. Верхняя кромка моделирующего эту интрузию объекта находится на глубине 5-6 км, ее ширина - 7-10 км, а внедрение произошло примерно 2.3-3.0 млн лет назад.

Интерпретационные профили в зоне перехода между Азиатским континентом и Тихим океаном расположены восточнее о.Сахалин и вытянуты в меридиональном направлении. Результаты интерпретации свидетельствуют о погружении возмущающего объекта в сторону о.Сахалин, что вполне согласуется с данными о наклонном залегании зон разуплотнения и их погружении в сторону материка. Весьма вероятно и наличие промежуточных резервуаров, питающих вулканическую деятельность. Глубину до верхней кромки внедрившихся тел можно оценить в 8-15 км, время внедрения разогретого мантийного вещества - 7-12 млн лет назад. Возможны и более ранние внедрения - свыше 20 млн лет назад и с глубинами до верхней кромки объекта порядка 20 км.

Разработанное программно-алгоритмическое и методическое обеспечение автоматизированного подбора геотермических аномалий а) существенным образом ускоряет процедуру моделирования тепловых процессов; б) повышает информативность полученных в результате такого моделирования имитационных моделей; в) предоставляет исследователю возможность проанализировать несколько альтернативных вариантов таких процессов. Одинаковые принципы и подходы, на которых построены гравиметрические, магнитометрические и геотермические версии программ автоматизированного подбора, являются необходимым и достаточным основанием (базисом) для их последующего синтеза в единой компьютерно-информационной подсистеме комплексного моделирования разнородных геолого-геофизических объектов и процессов.

Заключение

Основные результаты сводятся, в основном, к следующему.

1. Анализ выполненных разработок в области создания математического, алгоритмического, программного и методического обеспечения, проведенный в свете целого ряда аспектов по материалам публикаций, свидетельствует, что синтез этих разработок в единую компьютерно-информационную подсистему моделирования открытого типа может способствовать повышению эффективности методов автоматизированного подбора, а также информативности и экономичности геофизических исследований при решении геологических задач.

2. Разработанное алгоритмическое, программное и методическое обеспечение автоматизированного подбора гравимагнитных полей является универсальным и позволяет: а) подбирать параметры источников по различным компонентам гравитационного и магнитного полей отдельно и совместно, а также по вторым производным гравитационного потенциала и линейным трансформациям моделируемых компонент; б) осуществлять подбор путем решения линейных, нелинейных и смешанных обратных задач грави- и магнитометрии; в) использовать элементы моделируемых компонент, заданных вдоль профилей, на плоскости, в пространстве, в скважинах; г) применять на разных этапах моделирования различные технологии и процедуры подбора. Программное обеспечение реализовано на ЭВМ различного типа (ЕС, СМ, ПК).

3. Вопросы параметризации источников занимают важное место в различных технологиях подбора. Разработанная аппроксимационная конструкция является многоэлементной, открытой, универсальной, адаптивной и управляемой. На ее базе эффективно реализуются различные технологии и стратегии подбора (оптимизацией функционалов, построением эквивалентных семейств, монтажными алгоритмами, последовательным усложнением модели). Сеточный уровень аппроксимационной конструкции существенно расширяет возможности интерпретатора при моделировании объектов с переменными физическими свойствами.

4. Эффективным средством обработки данных измерений является

процедура сплайн-аппроксимации. На ее основе разработан алгоритм параметризации нелинейного фона, позволяющий просто и эффективно вводить ограничения на возможные пределы вариаций фоновой компоненты при подборе. Алгоритм сплайн-аппроксимации целесообразно также использовать для а) сглаживания и интерполяции измеренных компонент полей; б) рациональной (в смысле затрат времени) организации вычислений; в) рекуррентного вычисления горизонтальных производных высших порядков; г) параметризации геометрических границ и физических свойств разрезов; д) описания параметров нормального магнитного поля; е) графической визуализации результатов.

5. Автоматизированный подбор параметров конкретной модели базируется на минимизации априори конструируемой целевой функции специальной оптимизационной процедурой, которая позволяет использовать градиентный спуск на начальных итерациях подбора и алгоритм сингулярного разложения матриц (SVD) в окрестностях минимума (используя тем самым преимущества каждого из методов). Процедура является открытой и может быть дополнена другими эффективными алгоритмами оптимизации. При решении задач подбора с большим числом степеней свободы можно добиться устойчивости итерационного процесса за счет введения жестких ограничений как на пределы вариаций параметров, так и на приращения параметров на итерациях. Уменьшить затраты времени на осуществление вычислений на одной итерации можно с помощью двух процедур рациональной организации вычислений. Изучению достаточно больших окрестностей пространства параметров способствует алгоритм многовариантного подбора. Показано еще раз, что для геофизических задач достаточно типична "овражная" форма изолиний оптимизируемых показателей качества.

6. На представительном множестве модельных задач исследовались: а) зависимость результатов от используемых оптимизируемых показателей качества; б) влияние структуры множеств задания подбираемых ком-

понент полей на результаты восстановления параметров источников; в) влияние случайных и стационарных помех на результаты подбора; г) зависимость результатов от используемых алгоритмов оптимизации и режимов оптимизационной процедуры; д) зависимость решений от выбора начального приближения; е) возможность одновременного подбора геометрических и физических параметров источников; ж) возможность совместного подбора по компонентам гравитационного и магнитного полей. Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что: а) конечные значения подбираемых параметров зависят от начального приближения; б) для повышения устойчивости необходимо накладывать жесткие ограничения на подбираемые конфигурации; в) целесообразно применять методику последовательного усложнения модели, а также ограничения на сами параметры и их приращения; г) при одновременном подборе физических и геометрических параметров сходимость замедляется; д) необходимо осуществлять декомпозицию сложной задачи на ряд простых подзадач; е) увеличение количества точек в наблюдаемых аномалиях не оказывает существенного влияния на результаты подбора; ж) повышению точности восстановления параметров способствует использование компонент полей, заданных в пространстве; з) скорость сходимости и также точность восстановления параметров алгоритмом SUD выше таковых при использовании градиентного спуска.

7. Особенность используемого подхода к автоматизированному подбору по линейным трансформантам состоит в том, что один и тот же приближенный оператор трансформирования действует на модельные и измеренные множества моделируемых компонент полей. В этой ситуации точность вычисления трансформант не оказывает существенного влияния на результаты подбора. Тип трансформанты при подборе задается линейным оператором весового суммирования в скользящем окне. Рассмотрены два способа вычисления весовых множителей операторов трансформирования такого типа. Модельные примеры свидетельствуют, что результаты

подбора по трансформированным аномалиям практически аналогичны результатам подбора по точным аналитическим аномалиям. Однако при подборе практических аномалий свойства соответствующих трансформант проявляются не в такой степени, как при подборе модельных.

8. Возможности и методические особенности использования разработанного программно-алгоритмического обеспечения подбора иллюстрируются на примерах моделирования: а) гравитационного поля вдоль регионального сейсмического профиля; б) конфигурации интрузивных массивов и рудных объектов; в) разновысотных аэромагнитных измерений вдоль региональных геотраверсов; г) отдельных рудных тел железорудного месторождения; д) гравитационного и магнитного полей вдоль геологических разрезов при крупномасштабном геологическом картировании. Моделирование выполнялось на ЭВМ различного типа (ЕС, СМ, ПК), при этом решались задачи в линейной, нелинейной и смешанной постановках и использовались следующие методические приемы: а) моделирование по частям сложных объектов и разрезов; б) многовариантного решения одной и той же задачи; в) оценки точности полученных решений на специально сконструированной модельной задаче.

9. Выполнена адаптация разработанного программно-алгоритмического обеспечения для целей моделирования геотермических аномалий: температурных и теплового потока раздельно и совместно. Аппроксимационная конструкция адаптированных версий включает элементарные ячейки призматической формы двух типов: кратковременно действующие и остывающие. Эффективность программ исследована на модельных примерах, а их возможности при решении практических задач иллюстрируются примерами моделирования тепловых аномалий в Равнинном Крыму, Восточных Карпатах, Байкальской рифтовой зоне, Курило-Камчатской области. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение подбора ускоряет процедуру моделирования тепловых процессов и повышает информативность полученных в результате такого моделирования имита-

ционных моделей.

10. Синтез различных технологий, методов и модификаций подбора в единую компьютерно-информационную подсистему моделирования целесообразно осуществлять на основе локальной базы данных компьютерной модели. Основными элементами такой локальной базы данных могут быть: а) каталоги полей; б) скважины; в) стратиграфическая колонка; г) физические свойства; д) геометрия модели. Связь пользователя с элементами компьютерной модели исследуемого объекта может осуществляться через интерфейс общения, основными элементами которого являются блоки процедур а) визуализации; б) оптимизации; в) решения прямых задач; г) автоматизированного подбора; д) формирования закреплений и ограничений; е) создания, модификации и уничтожения отдельных элементов модели; ж) справочной и вспомогательной информации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Моделирование теплового поля континентальной литосферы. - Киев: Наук. думка, 1989. -192с. (соавторы Кутас Р.И., Цвященко В.А.).
2. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных аномалий: программно-алгоритмическое обеспечение и методические рекомендации. Ин-т геофиз. АН УССР, -Киев, 1986. -235 с.-Деп. в ВИНТИ 08.12.86, N 8363-В86 (соавторы Булах Е.Г., Зейгельман М.С.).
3. Интерпретация нестационарных аномалий теплового поля (методическое руководство и программа). Ин-т геофиз. АН УССР, -Киев, 1987. -97 с.-Деп. в ВИНТИ 12.05.87, N 3398-В87 (соавторы Кутас Р.И., Цвященко В.А.).
4. Автоматизированный подбор гравитационных аномалий на СМ ЭВМ: программа и методические рекомендации.-Ин-т геофиз. АН УССР.-Киев, 1988.-153 с.-Деп. в ВИНТИ 11.11.88, N 8007-В88 (соавтор Купенко И.А.).
5. Автоматизированный подбор гравитационных, магнитных и геотермических аномалий: алгоритмы и результаты решения модельных и практических задач.-Ин-т геофиз. АН УССР.-Киев, 1988.-236 с.-Деп. в ВИНТИ 21.11.88, N 8217-В88 (соавторы Булах Е.Г., Кутас Р.И.,

Цвященко В.А.).

6. Автоматизированный подбор нестационарных геотермических аномалий на персональных ЭВМ (методическое руководство). Ин-т геофиз. АН Украины. - Киев, 1991. - 92 с. - Деп. в ВИНТИ 24.12.91, N 4743-В91 (соавторы Кутас Р.И., Цвященко В.А., Тимошенко В.И.).
7. Автоматизированный подбор гравитационных и магнитных полей: методические рекомендации и примеры решения практических задач. Ин-т геофиз. АН Украины. - Киев, 1993. - 185 с. - Деп. в ГНТБ Украины 22.10.93, N 2048-Ук93 (соавтор Зейгельман М.С.).
8. Решение прямой задачи гравиметрии для брахисинклинальной структуры // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1976. №6. -С. 501-503.
9. К решению задачи определения избыточной массы и глубины центра тяжести шаровых тел методом скорейшего спуска / Новые результаты геофизических исследований на Украине. - Киев:Наук.думка, 1977. -С. 129-138.
10. К вопросу об оптимизации при подборе источников гравимагнитных полей / Геофизические исследования глубинного строения земной коры. -Киев:Наук.думка, 1978. -С. 77-85.
11. К вопросу о подборе параметров призматических тел по аномальному гравитационному полю методом минимизации / Новые методические разработки в геофизике. -Киев: Наук. думка, 1978. -С.91-97.
12. О совместном подборе аномальных источников по гравитационному и магнитному полям // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1978. -N5. - С. 387-390 (соавтор Булах Е.Г.).
13. Об одной аппроксимационной конструкции для моделирования источников гравитационных полей. //Геофиз.сб. АН УССР. -1978. -С.32-38 (соавтор Булах Е.Г.).
14. Интерпретация данных гравитационных наблюдений в горных выработках //Развед.геофиз. -1978. №80. -С. 77-81 (соавтор Булах Е.Г.).
15. О подборе аномальных источников гравитационного поля методом последовательных приращений модели // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1978. -С. 1059-1062 (соавтор Булах Е.Г.).
16. О выборе показателя качества при оптимизации распределений аномальных масс по гравимагнитным полям // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1979. -N1. -С. 6-9 (соавтор Булах Е.Г.).
17. К вопросу о моделировании изометричных источников по площадным гравимагнитным полям // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1979. -N5. -С.323-326 (соавтор Булах Е.Г.).
18. Некоторые аспекты моделирования распределений масс по гравимагнитным полям // Геофиз.журн. -1979. -1, N1. - С.36-47 (соавтор

Булах Е.Г.).

19. О некоторых особенностях методов спуска при подборе гравимагнитных полей // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1979. -№12. -С.979-983 (соавтор Булах Е.Г.).
20. О рациональной организации вычислений при подборе гравимагнитных полей численными методами оптимизации // Докл. АН УССР. Сер.Б. -1979. -№5. -С. 334-338.
21. О совместном подборе источников гравитационного и магнитного полей / Прикладные алгоритмы решения обратных задач геофизики. -М.: Сов.радио, 1979. -С. 47-52.
22. О подборе конфигурации источников по компоненте магнитного поля ΔT //Докл. АН УССР. Сер.Б. -1981. -№10. -С.3-6 (соавтор Булах Е.Г.).
23. Об адаптивных алгоритмах решения обратных задач потенциальных полей // Геофиз.журн. -1982. -4, №1. -С.63-65 (соавторы Булах Е.Г., Маркова М.Н. и др.).
24. О некоторых аспектах моделирования источников гравимагнитных полей / Математическое моделирование геофизических полей. -Киев: Наук.думка, 1982. - С. 47-49.
25. О некоторых возможностях ускорения сходимости алгоритмов оптимизации при решении обратной задачи гравиметрии /Теория и практика интерпретации гравитационных и магнитных полей в СССР. -Киев: Наук.думка, 1983. - С.183-188 (соавтор Левенков Я.Б.).
26. Результаты моделирования конфигурации источников по гравитационному и магнитному полям// Геофиз.журн. - 1983. -5, №2. -С.37-43 (соавтор Булах Е.Г.).
27. Результаты моделирования источника гравитационного поля методом последовательных приращений / Теория и практика интерпретации гравитационных и магнитных полей в СССР. -Киев:Наук.думка, 1983. -С.148-151 (соавтор Булах Е.Г.).
28. Моделирование измеряемых компонент магнитного поля на ЭВМ // Прикладная геофизика, -1984. -№108. -С.94-103 (соавтор Булах Е.Г.).
29. К вопросу о подборе на ЭВМ изолированных источников гравитационных аномалий / Алгоритмы, методика и результаты интерпретации геофизических данных. - Киев: Наук.думка, 1985. -С. 115-118.
30. К вопросу интерпретации нестационарных геотермических аномалий методом подбора /Алгоритмы, методика и результаты интерпретации геофизических данных. -Киев: Наук.думка, 1985. -С.19-21 (соавтор Цвященко В.А.).
31. Сходимость параметров аномальных источников при подборе по магнитному полю // Разведочная геофизика. -М.:Недра, 1986. - №103.

- С. 117-120 (соавтор Булах Е.Г.).
32. Подбор параметров возмущающих источников по гравитационному и магнитному полям // Развед.геофиз.-М.:Недра,1987.-N106.-С. 85-88 (соавтор Булах Е.Г.).
 33. Использование трансформант потенциальных полей в алгоритмах автоматизированного подбора // Докл. АН УССР, Сер.Б. -1987. N1. -С. 7-10 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 34. Об использовании трансформаций потенциальных полей в алгоритмах автоматизированного подбора // Геофиз.журн. - 1987.-9, N6.-С.36-43 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 35. Аппроксимация слоисто-блокового разреза в алгоритмах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий // Докл. АН УССР, Сер.Б.-1989. N8. -С. 9-10 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 36. Использование метода последовательных приращений в программах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий // Развед.геофиз.-М.:Недра,1989. -N109. -С. 107-114 (соавтор Булах Е.Г.).
 37. Автоматизированный подбор трехкомпонентных измерений аномального магнитного поля // Докл. АН УССР, Сер.Б.-1990. -N7. -С. 3-5 (соавтор Булах Е.Г.).
 38. Аппроксимация сплайнами нелинейного фона в алгоритмах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных полей // Докл. АН Украины. -1993. - N6.-С. 106-109.
 39. Использование алгоритмов спуска и сингулярного разложения матриц в программах подбора гравитационных и магнитных полей // Докл. АН Украины. - 1993. -N10. -С. 122-125.
 40. Результаты моделирования гравитационного поля вдоль профиля Путивль-Кривой Рог // Докл. АН Украины. - 1994. - N 3.- С. 94-98 (соавтор Омельченко В.Д.).
 41. Разработка некоторых этапов системы интерпретации магнитных аномалий / Некоторые вопросы геологической интерпретации гравитационных аномалий.-М.,1978.-С. 28-33. -Деп. в ВИНТИ, N1370-78В (соавторы Булах Е.Г., Зейгельман М.С.).
 42. Об идее преобразования информации с целью ускорения сходимости решения обратной задачи гравиметрии методами оптимизации / Материалы 8-ой научн. конф. аспирантов и молодых ученых. Геофиз.-М.,1981. -С.194-203.-Деп. в ВИНТИ 19.05.82, N 2541-82 (соавтор Левенков Я.Б.).
 43. Моделирование источников гравитационного поля методом последо-

- вательных приращений / Материалы 8-ой науч. конф. аспирантов и молодых ученых. Геофиз. -М.,1981.-С.86-96. -Деп. в ВИНТИ 19.05.82, N 2541-82.
44. Использование сингулярных аппроксимирующих ячеек в алгоритмах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. -Ин-т геофиз. АН УССР, Киев, 1988. -42 с. -Деп. в ВИНТИ, 07.06.88, N 4489-В88 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 45. Результаты автоматизированного подбора модельных и практических аномалий по трансформациям потенциальных полей. -Ин-т геофиз. АН УССР, Киев, 1988. -32 с. -Деп. в ВИНТИ 21.11.88, N8218-В88 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 46. Вычисление весовых множителей операторов трансформирования типа "скользящее окно" при автоматизированном подборе гравитационных и магнитных аномалий. -Ин-т геофиз. АН УССР, Киев, 1989. -33 с. -Деп. в ВИНТИ 04.04.89, N 2132-В89 (соавторы Булах Е.Г., Гольцев В.С.).
 47. Автоматизированный подбор на ЭВМ параметров аномальных источников по данным трехкомпонентных измерений магнитного поля. -Ин-т геофиз. АН УССР, -Киев, 1990. -17 с. -Деп. в ВИНТИ 19.06.90, N 3493-В90 (соавтор Булах Е.Г.).
 48. Использование сплайнов в алгоритмах автоматизированного подбора гравитационных и магнитных аномалий. Ин-т геофиз. АН Украины. -Киев, 1993. -25 с. -Деп. в УкрИНТЭИ 10.03.93, N 446-Ук93.
 49. Использование полного градиента в алгоритмах автоматизированного подбора гравитационных аномалий. Ин-т геофиз. АН Украины. -Киев, 1993. -37 с. -Деп. в УкрИНТЭИ 10.03.93, N 445-Ук93.
 50. Анализ эффективности алгоритмов спуска и сингулярного разложения матриц в программах подбора гравитационных и магнитных аномалий. Ин-т геофиз. АН Украины. -Киев, 1993. -51 с. -Деп. в ГНТБ Украины 11.05.93, N 874-Ук93.
 51. Моделирование гравитационного поля вдоль профиля Путивль - Кривой Рог. Ин-т геофиз. АН Украины. -Киев, 1993. - 32 с. - Деп. в ГНТБ Украины 25.06.93, N1219-Ук93 (соавтор Омельченко В.Д.).
 52. Spline approximation of nonlinear background in algorithms for fitting gravity and magnetic anomalies / Abstracts of the international seminar "Theory and applications of geological interpretation of gravity, magnetic and electrical fields". Moscow, MGPI, 1993, -P.25.

Корчагін І.М. Методи автоматизованого підбору та їх використання при інтерпретації геофізичних даних.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук по спеціальності 04.00.22 - геофізика, Інститут геофізики ім.С.І.Субботіна НАН України, Київ, 1994.

Захищається 65 наукових робіт, в яких знайшли відображення результати теоретичних, експериментальних та практичних досліджень різних методик, технологій та алгоритмів автоматизованого підбору при геологічній інтерпретації геофізичних даних. Показана необхідність синтезу таких методик в сучасну комп'ютерно-інформаційну підсистему моделювання. Описані універсальна апроксимаційна конструкція для параметризації джерел аномалій, ефективна оптимізаційна процедура для мінімізації функцій мети та запропоновані зручні способи використання лінійних трансформацій і сплайн-апроксимації в алгоритмах підбору. Розрахунки на моделях свідчать, що для отримання гарантованих результатів в інтерпретаційному процесі необхідно використовувати багатоваріантні стратегії підбору. Здійснена адаптція алгоритмів та програм для розв'язку задач моделювання в геотермії. Програмне забезпечення впроваджене в науково-дослідних та виробничих організаціях геологічного профілю.

Ключові слова: гравіметрія, магнітометрія, геотермія, інтерпретація, підбір, апроксимація, оптимізація, алгоритм, програма, трансформація, моделювання, конфігурація, пряма задача, сплайн, похідна.

Korchagin I.N. The automated fitting methods and their application in the geophysical data interpretation.

The Physics and Mathematics doctor's thesis on speciality 04.00.22 - geophysics, Institute of Geophysics of Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev, 1994.

The 65 research papers dealing with the results of theoretical, experimental and practical investigations of different methods, technologies and algorithms of automated fitting in the geological interpretation of geophysical data are defended. The need of the synthesis of those methods in the up-to-date computer-and-information system of modelling has been shown. The universal approximatinal construction for the parametrization of anomalous sources, the effective optimization procedure for the minimization of the objective functions has been described and a convenient way of use of the linear transformations and spline-approximation has been suggested. The model calculations show that multivariant strategies of fitting are needed to receive the guaranteed results in the interpretation process. The adaptation of the algorithms and programmes for solving the problems of modelling in the geothermy has been fulfilled. The software has been introduced in the research and production organizations of geological profile.

Україна

Подп. к печ. 06.10.54 Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага тип. № 3 . Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 19.
Услови. кр.-отг. 2,1 . Уч.-изд. л. 20 .
Тираж 150 . Зак. № 4-4800

Фирма «ВИПОЛ»
252151, г. Киев, ул. Волынская, 60.

119/150

AB 31.079

AB 31.079