

На правах рукописи



Мичурин Антон Владимирович

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ
НА ОСНОВЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО И
ВЕРОЯТНОСТНО-ДЕТЕРМИНИСТКОГО ПОДХОДОВ**

Специальность 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург, 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Горный институт Уральского отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Долгаль Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Калинин Дмитрий Федорович

кандидат технических наук,
Ратушняк Александр Николаевич

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Пермский государственный
национальный исследовательский
университет»

Защита состоится «16» «марта» 2012 года в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 004.009.01 при Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН, по адресу: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ю.В. Хачай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Современное состояние методов и компьютерных технологий интерпретации гравитационного и магнитного полей во многом определяется работами В.И. Аронова, П.С. Бабаянца, П.И. Балка, Ю.И. Блоха, Е.Г. Булаха, С.Г. Бычкова, В.А. Гершанюка, В.Н. Глазнева, Г.Я. Голиздры, В.И. Гольдшмидта, Ф.М. Гольмана, В.М. Гордина, А.С. Долгалея, В.И. Исаева, Д.Ф. Калинина, А.И. Кобрунова, В.Н. Конешова, В.И. Костицына, С.С. Красовского, В.В. Ломтадзе, А.К. Маловичко, П.С. Мартышко, А.А. Никитина, В.М. Новоселицкого, А.В. Петрова, А.П. Петровского, Г.Г. Ремпеля, Т.В. Романюк, С.А. Серкерова, З.М. Слепака, В.И. Старостенко, В.Н. Страхова, О.Л. Таруниной, А.Н. Тихонова, Н.В. Федоровой, А.В. Цирульского, А.Ф. Шестакова и многих других исследователей.

Результаты измерений гравитационного и магнитного полей несут важную информацию о физико-геологических неоднородностях, расположенных в земной коре и верхней мантии. Использование этой информации в комплексе с данными других геолого-геофизических методов значительно повышает экономическую эффективность геологоразведочных работ на любых этапах исследования недр Земли. Темпы совершенствования вычислительной техники, развитие методов обработки цифровой и графической информации существенно влияют на подходы и методы решения различных геологических задач, направленных на изучение глубинного строения крупных регионов, прогнозирование, поиски и разведку месторождений полезных ископаемых. Результативность геофизических исследований теснейшим образом связана с совершенствованием процесса извлечения информации из данных полевых измерений, а проблема разработки эффективных компьютерных технологий интерпретации гравиметрических и магнитометрических материалов, развивающих новые положения теории интерпретации и адекватных реальной геофизической практике, является весьма актуальной.

В диссертации приведены методика и результаты интерпретации гравитационного и магнитного полей при изучении глубинного строения Пермского края, представлены новые модификации монтажного метода решения нелинейной обратной задачи гравиразведки, а так же рассмотрен помехоустойчивый алгоритм решения линейных обратных задач, основанный на синтезе функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов.

Выполненные разработки отвечают современным достижениям в области теории и практики прикладной геофизики, они могут успешно применяться как при проведении региональных геофизических исследований с целью изучения глубинного строения платформенных территорий, так и при поисках месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых.

Цель исследований

Создание методов и компьютерных технологий интерпретации гравитационного и магнитного полей, базирующихся на функционально-аналитическом и вероятностно-статистическом подходах, а также на их синтезе, ориентированных на построение содержательных моделей изучаемого объема геологической среды.

Основные задачи

1. Разработка алгоритмов решения нелинейной обратной задачи гравиразведки монтажным методом в вариантах регулируемой направленной раскристаллизации, регулируемой направленной перекристаллизации на сетках разного размера, их программная реализация и апробирование созданного программно-алгоритмического обеспечения на модельных и практических примерах.

2. Уменьшение вычислительных затрат при решении обратной задачи гравиразведки монтажным методом за счет использования последовательно сгущающихся сеток и распределенных вычислительных систем.

3. Разработка метода решения линейной обратной задачи гравигравиразведки и обратной задачи магниторазведки на основе критерия минимизации эмпирического риска; оценка его возможностей на модельных и практических примерах.

4. Повышение достоверности определения физических параметров геологических объектов по наблюдаемому гравитационному (магнитному) полю при высоком уровне геологических помех (с отличающимся от нормального статистическим распределением).

5. Создание эффективной технологии изучения глубинного строения платформенных областей по материалам грави- и магниторазведки, сочетающей современные методы трансформации геофизических полей и безэталонной классификации.

Научная новизна:

1. Впервые реализованы новые модификации монтажного метода решения обратной задачи гравиразведки – регулируемая направленная раскристаллизация и регулируемая направленная перекристаллизация.

2. Установлена возможность уменьшения вычислительных затрат обратной задачи гравиразведки монтажным методом при использовании последовательно сгущающихся сеток и многопроцессорных вычислительных систем.

3. Впервые доказана возможность использования критерия минимизации эмпирического риска для решения линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки, обеспечивающего подавление интенсивных знакопеременных помех с асимметричным законом распределения. Успешно проведено комплексирование функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов в алгоритме решения линейных обратных задач при условии равенства нулю медианного значения помех в измерениях (что обеспечивает подавление геологических помех).

4. Проведена оценка качества собственных результатов при решении линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки методом минимизации эмпирического риска.

5. Предложена эффективная технологическая цепочка интерпретации результатов гравиметрических и аэромагнитных съемок для изучения глубинного геологического строения платформенных территорий (на примере Пермского края).

Практическая значимость исследований:

1. Предлагаемые монтажные алгоритмы снимают проблему неустойчивости решения обратной задачи гравиразведки в ее классическом понимании и могут успешно использоваться при интерпретации гравиметрических данных с учетом разнородной априорной информации об источниках поля.

2. Доказана эффективность решения линейных обратных задач методом минимизации эмпирического риска. Метод может успешно использоваться для надежного определения петроплотностных (петромагнитных) характеристик геологических объектов в естественном залегании и дает приближенные оценки качества собственных результатов, что не представляется возможным при использовании стандартных детерминистских методов количественной интерпретации.

3. Выделены разломы, отсутствующие ранее на тектонической схеме строения фундамента Пермского Приуралья и проведено уточнение границ ряда крупных тектонических структур. Создана карта результатов классификации геофизических признаков, которая дополнила имеющиеся представления о глубинном строении Пермского края и прилегающих территорий и использовалась для построения новых структурно-тектонических схем при нефтегазогеологическом районировании территории.

4. Разработанные алгоритмы и технологии успешно применяются при интерпретации практических геофизических данных, полученных при выполнении договорных работ, проводящихся с целями прогнозирования и поисков залежей углеводородного сырья и месторождений твердых полезных ископаемых, выполняемых в пределах Пермского края и в других регионах России.

Личный вклад автора

Участие в разработке алгоритмов; написание программ в среде объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0; выполнение вычислительных экспериментов; анализ результатов экспериментов; полный цикл интерпретации материалов грави- и магниторазведки по Пермскому краю участие в написании отчетов по результатам производственных работ и грантов.

Защищаемые положения

1. Новые модификации монтажного метода регулируемая направленная раскристаллизация и регулируемая направленная перекристаллизация и их современная программная реализация (в т.ч. на распределенных вычислительных системах) обеспечивают получение геологически содержательных решений нелинейных обратных задач гравиразведки за счет формализации разнородной априорной информации и возможности игнорирования локальных минимумов целевой функции (функционала невязки).

2. Синтез функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов в алгоритмах решения линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки существенно повышает точность определения физических параметров геологических тел при наличии интенсивных помех с асимметричным законом распределения, а также позволяет получить апостериорные оценки качества интерпретации.

3. Создана эффективная методика интерпретации результатов гравиметрических и магнитных съемок, включающая в себя трансформации полей на основе истокообразной аппроксимации, геологическое редуцирование, иерархическую классификацию и метод k-средних, позволившая охарактеризовать вещественные неоднородности кристаллического фундамента и осадочного чехла территории Пермского края.

Фактический материал

Фактической основой исследований послужили материалы геологических фондов, результаты гравиметрических съемок, проводимых Горным институтом УрО РАН, полученные в процессе работы по договорной тематике с рядом нефте- и горнодобывающих предприятий России и при выполнении подпрограммы «Минерально-сырьевые ресурсы» федеральной целевой программы «Экология и природные ресурсы России (2002-2010 гг.)». Работа выполнена при поддержке Уральского отделения РАН (по результатам конкурса научных проектов молодых ученых и аспирантов 2009 и 2010 гг.) и РФФИ (грант № 10-05-96023-р_урал_а).

Апробация и публикации

Основные положения и результаты, представленные в диссертационной работе, докладывались на Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2006, 2008, 2010; Пермь, 2007, 2009, 2011); на региональной научно-практической конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (Пермь, 2008, 2009, 2010, 2011); на Международных семинарах «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» им. Д.Г. Успенского (Москва, 2010; Пермь, 2011); на научных чтениях памяти Ю.П. Булашевича (Екатеринбург, 2009, 2011); на международной научно-практической конкурс-конференции молодых специалистов «ГЕОФИЗИКА» (Санкт-Петербург, 2009, 2011); на Международной конференции «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты» (Киев, 2010, 2011); на XVI Международной конференции «Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы» (Воронеж, 2010); на X Международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (Пермь, 2010); на Всероссийской научно-практической конференции «Геофизические методы при разведке недр» (Томск, 2011), а также на научных сессиях Горного института УрО РАН (Пермь, 2008, 2009, 2010, 2011).

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 31 печатных работах, из них 3 статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем публикации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения общим объемом 142 страницы, содержит список литературы, включающий 140 наименования, а также 44 иллюстрации и 3 таблицы.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН г. Пермь. Автор выражает глубокую благодарность коллективу лаборатории геопотенциальных полей и заведующему лабораторией, д.г.-м.н. С.Г.Бычкову за внимание, непосредственную помощь и ценные советы.

Автор благодарит д.ф.-м.н. П.И. Балка, идеи которого развиваются в данной работе.

Особо хочу поблагодарить своего научного руководителя доктора физико-математических наук А.С. Долгаля за неоценимую всестороннюю помощь, поддержку, советы и консультации при написании диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации представлены новые направления в аппаратно-методическом обеспечении гравиразведочных и магниторазведочных

работ, появления которых потребовало поиска современных подходов к обработке и интерпретации гравиметрических и магнитометрических данных; приводится исторический анализ и общая постановка решения обратной задачи гравиразведки и магниторазведки методом подбора; даются основные свойства и характеристики решения обратной задачи, а так же описание классов обратных задач.

Во второй главе предложены новые алгоритмы монтажного метода к решению нелинейной обратной задачи гравиразведки рудного типа в модификациях регулируемая направленная раскристаллизация, перекристаллизация и перекристаллизация на сетках разного масштаба, обладающие широкими возможностями для формализованного учета априорной информации о геометрии источников поля. Эффективность алгоритмов подтверждается результатами вычислительных экспериментов проведенных на модельных и практических примерах.

В третьей главе рассмотрено решение линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки, заключающихся в определении аномальных физических характеристик (избыточной плотности, эффективной намагниченности) геологических объектов с известными геометрическими параметрами по наблюдаемым геофизическим полям. Предложен новый алгоритм решения линейной обратной задачи гравиразведки и магниторазведки: метод минимизации эмпирического риска. Приведены примеры конкурентоспособности предлагаемого метода с методом, основанным на минимизации среднеквадратической невязки модельного и наблюдаемого полей, на модельных и практических примерах.

В четвертой главе приведена методика интерпретации геопотенциальных полей и их трансформант, направленная на изучение глубинного строения платформенных областей с учетом современных достижений в области математических методов анализа многомерных наблюдений и геоинформационных технологий на примере Пермского края и Юрюзано-Сылвенской депрессии (ЮСД).

ПЕРВОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Новые модификации монтажного метода регулируемая направленная раскристаллизация и регулируемая направленная перекристаллизация и их современная программная реализация (в т.ч. на распределенных вычислительных системах) обеспечивают получение геологически содержательных решений нелинейных обратных задач гравиразведки за счет формализации разнородной априорной информации и возможности игнорирования локальных минимумов целевой функции (функционала невязки) [4, 7, 8, 9, 19-21, 23, 25, 27, 29].

Обратные задачи геофизики (в том числе задачи гравиразведки и магниторазведки) относятся к классу некорректных задач, т.е. их решение в общем случае является неоднозначным и неустойчивым. Поэтому каждый новый метод и его программно-алгоритмическая реализация для их решения представляет существенный интерес, а проблема разработки новых модификаций методов является актуальной.

Среди применяющихся на практике методов решения нелинейной обратной задачи гравиразведки наиболее широкое распространение имеют различные модификации метода подбора, базирующиеся на итерационной корректировке геометрических параметров «стартовых» петроплотностных и петромагнитных моделей

геологической среды. Процесс корректировки модели обычно заканчивается при достижении требуемого (достаточно малого) значения невязки наблюдаемого и модельного полей.

Однако во многих случаях результаты интерпретационных построений, отвечающие сравнительно малому значению невязки между наблюдаемым и подобранным полями, могут противоречить имеющимся представлениям о формах, размерах и пространственных взаимоотношениях геологических тел в изучаемом объеме среды. В качестве альтернативы традиционным методам решения обратной задачи можно рассматривать конечно-элементный подход к описанию изучаемого объема геологической среды, названный В.Н. Страховым, М.И. Лапиной, Овчаренко А.В. «монтажным методом» и получивший свое развитие в работах П.И. Балка. Монтажный подход к решению обратной задачи гравиразведки (ОЗГ) снимает проблему неустойчивости в ее классическом понимании. Конечная размерность модели и природные ограничения на ее плотностные (магнитные) и геометрические параметры изначально приводят к компактному множеству возможных решений, а учет определенного объема априорной информации обеспечивает получение геологически-содержательных решений обратных задач.

Метод регулируемой направленной кристаллизации (РНК) до недавнего времени был реализован только в двумерном варианте, т.е. для источников поля, имеющих бесконечное простираие в направлении, перпендикулярном к исследуемому профилю. Имелся также небольшой опыт использования 2.5 D – модификации монтажного метода, предполагающей наличие ограничений на размеры аномалиеобразующих объектов по простираию, при одинаковой конфигурации их сечений в любой из плоскостей, параллельных моделируемому профилю. В 2007 году П.И. Балком и др., вследствие невозможности получения удовлетворительных результатов решений обратных задач в рамках 2 D и 2.5 D задач для множества геологических тел и структур, была проведена оценка принципиальной возможности развития монтажного подхода для решения обратной задачи в 3D постановке, а также была осуществлена его программно-алгоритмическая реализация.

Новая модификация монтажного метода – регулируемая направленная раскристаллизация (РНР), впервые предложенная П.И. Балком, но программно не реализованная, может рассматриваться как конечноэлементный аналог стратегии отрицательных последовательных приращений модели. В простейшей постановке обратной задачи для изолированного тела Ω^T известной плотности $\sigma^T > 0$, решения обратной задачи при раскристаллизации состоит в том, чтобы, отправляясь от заданной связной конфигурации Ω^0 , заведомо включающей в себя аномалиеобразующий объект, выстроить конечную последовательность конфигураций $\Omega^1, \Omega^2, \dots, \Omega^n$, имеющую пределом некоторую область Ω^n , поле которой при подобранной плотности σ^n согласуется с наблюдаемым гравитационным полем. Очередное приближение к модели Ω^i , $i=1,2,\dots,n$ в данном случае образуется путем удаления из $\Gamma[\Omega]$ одного элемента ω_α , минимизирующего невязку наблюдаемого и модельного полей ε . Для каждой «пробной» конфигурации Ω^i вычисляется свое значение плотности σ^i . С увеличением

числа итераций n монотонно возрастает плотность модели, критерием достижения решения является условие $\sigma^n \approx \sigma^T$.

В рамках другой модификации монтажного метода – регулируемая направленная перекристаллизация (РНП) – возможно на отдельно взятой итерации как увеличение, так и уменьшение ранее построенной конфигурации Ω^i за счет добавления или удаления одного (или даже одновременно нескольких) элементов замощения ω_α из $O[\Omega]$ или $\Gamma[\Omega]$ соответственно, что позволило существенно снизить вычислительные затраты при моделировании сложнопостроенных геоплотностных сред, а также отобразить их фрактальные особенности.

Автором, в процессе программной реализации выше представленных идей П.И. Балка, алгоритм регулируемой направленной перекристаллизации был дополнен возможностью моделирования на сетках разного размера, что позволило сократить вычислительные затраты при решении обратной задачи гравиразведки. Следует так же отметить, что нет принципиальных отличий в возможности формализованного учета априорной информации о моделируемых объектах для модификаций РНК, РНР и РНП, что выгодно отличает их от «прототипа» – метода последовательных приращений модели. Все перечисленные алгоритмы были протестированы на модельных и практических примерах. Доказана высокая устойчивость представленных алгоритмов к наличию помех в исходных данных и к выбору начального приближения. Преимуществом является также способность алгоритмов выходить из областей локальных минимумов в процессе решения обратной задачи гравиразведки.

На рисунке 1. приведены результаты решения обратной задачи гравиразведки по данным крупномасштабной гравиметрической съемки, выполненной над месторождением платино-медно-никелевых руд Норильск-1. Предполагается, что аномалия силы тяжести в основном обусловлена рудоносной интрузией базит-гипербазитового состава, ее избыточная плотность (по отношению к вмещающим породам трапповой формации) составляет от 0.25 г/см^3 , глубина залегания – $0.2 \text{ км} \leq h \leq 2.0 \text{ км}$, распространенность вдоль профиля исследования – $1 \text{ км} \leq h \leq 4.0 \text{ км}$. Полученные по результатам применения трех анализируемых модификаций монтажного метода решения обратной задачи гравиразведки уверенно локализируют в разрезе наиболее мощную часть интрузии. Выход модельных объектов за пределы истинного положения интрузии, связан с неучтенным ореолом уплотнения вмещающих эффузивных пород, что весьма характерно для надинтрузивных зон месторождений Норильского района. Точность полученных решений для всех вариантов составила порядка 0.12 мГал , что отвечало точности проводимых на данном участке гравиметрических наблюдений.

Неоспоримым преимуществом монтажных технологий решения обратной задачи гравиразведки является возможность естественного расщепления основного итерационного процесса на ряд взаимонезависимых подпроцессов, выполнение которых может осуществляться одновременно. С использованием средств распределенной вычислительной инфраструктуры программы «Университетский кластер» (официальный сайт программы – unicluster.ru), было осуществлено распараллеливание программы оценки достоверности интерпретационных построений, базирующейся на решении серии обратных задач гравиразведки монтажным методом.

Установлено, что применение высокопроизводительных вычислительных кластеров позволяет кардинально снизить время расчета.

В заключение отметим, что все охарактеризованные подходы к решению обратной задачи гравиразведки могут быть перенесены в область магниторазведки.

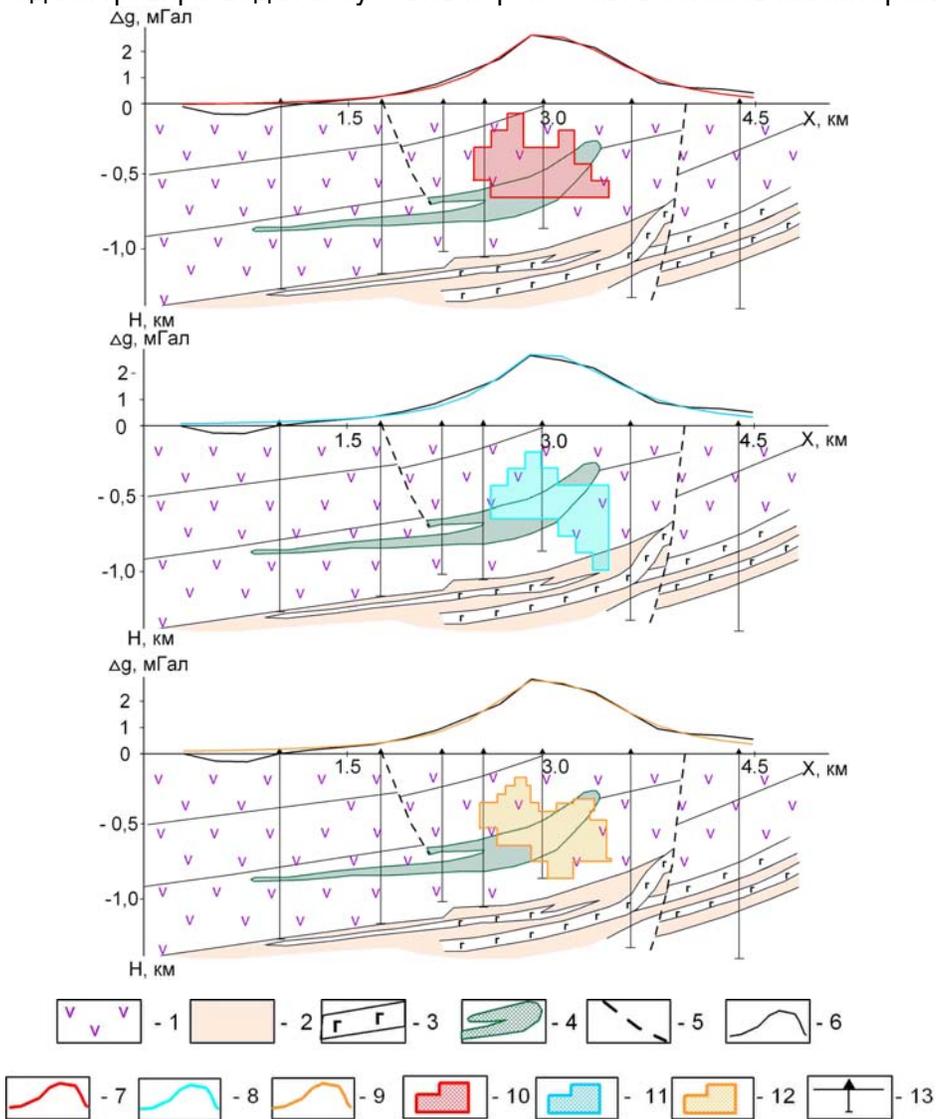


Рис. 1. Интерпретация гравитационной аномалии над месторождением платино-медно-никелевых руд: 1 - породы туфолоавовой толщи; 2 - отложения тунгусской серии; 3 - силлы габбро-долеритов; 4 - рудоносная интрузия; 5 - дизъюнктивные нарушения; 6 - график наблюдаемого поля; график модельного поля по результатам: 7 - РНК; 8 - РНР; 9 - РНП на сетках разного масштаба; модельный объект, полученный по данным: 10 - РНК; 11 - РНР; 12 - РНП на сетках разного масштаба; 13- буровые скважины

ВТОРОЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Синтез функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов в алгоритмах решения линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки существенно повышает точность определения физических параметров геологических тел при наличии интенсивных помех с асимметричным законом распределения, а также позволяет получить апостериорные оценки качества интерпретации [2, 3, 4, 24, 27].

Состоятельность любого метода решения обратной задачи гравиразведки и магнитометрии определяется его адекватностью целям и реалиям геофизических исследований, открытостью к использованию различной априорной информации о помехах и источниках поля, наличием средств оценивания точности и достоверности собственных результатов. В полной мере удовлетворить этим требованиям могут лишь методы, сочетающие достоинства детерминистского и вероятностно-статистического подходов. Если $q^T = (q_1^T, q_2^T, \dots, q_m^T)$ - вектор оцениваемых параметров в модели источников поля, D - множество решений $q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ обратной задачи, не противоречащих априорной информации детерминистского толка, то проблема совмещения двух подходов состоит в построении (на основе априорных данных о свойствах помех) функции плотности вероятностей $P(q)$ на множестве D , являющейся исчерпывающей информацией о векторе q^T .

В диссертации рассмотрено решение линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки, заключающихся в определении аномальных физических характеристик (избыточной плотности, эффективной намагниченности) геологических объектов с известными геометрическими параметрами по наблюдаемым геофизическим полям. Данный тип задач имеет важное практическое значение и широко применяется при изучении физических свойств горных пород в естественном залегании (например - при интерпретации результатов полевых измерений на буровых линиях); при независимой оценке адекватности глубинных сейсмических построений материалам гравиметрических и магнитных съемок; при построении 3D моделей пространственного распределения геоплотностных (геомагнитных) неоднородностей в алгоритмах аппроксимационной томографической интерпретации.

Поставим следующую задачу: в точках X_i произвольного рельефа земной поверхности измерены значения поля $u(X_i) = u^T(X_i) + \xi_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, обусловленные массами, распределенными с неизвестными плотностями σ_j^T по заданным областям (носителям) S_j^T , $j = 1, 2, \dots, m$, а аддитивные помехи ξ_i являются реализациями случайных величин η_i с нулевыми медианными значениями: $Me[\eta_i] = 0$. Это условие означает всего лишь, что при выполнении геофизической съемки не было объективных причин для преобладания в измерениях $u(X_i)$ помех одного знака. Никаких других ограничений на свойства помех, в том числе на их абсолютные значения, не налагается. Априорная информация G детерминистского типа (например - естественные ограничения $\sigma_j^{\min} \leq \sigma_j^T \leq \sigma_j^{\max}$, $j = 1, 2, \dots, m$) задает в пространстве R^m некоторое ограниченное замкнутое множество D векторов $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$ и $\sigma^T \in D$.

Функция плотности вероятности $P_0(\sigma)$ предоставляет дополнительные возможности для повышения информативности результатов интерпретации. Так задавшись некоторым p_0 , близким к единице, можно из множества D выделить подмножество D_0 такое, что $\int_{D_0} P_0(\sigma) d\sigma_1 d\sigma_2 \dots d\sigma_m = p_0$ и дальнейшие построения вести уже на более узком множестве D_0 допустимых решений. Предположение о нулевом медианном значении помехи позволяет построить кусочно-постоянную аппроксимацию

функции плотности: $P_0(\sigma) = p_r$, $\sigma \in \Omega_r$, $\bigcup_{r=1}^l \Omega_r = D$. Функцию $P_0(\sigma)$ можно далее использовать для минимизации эмпирического риска $J_0(\sigma)$ - математического ожидания ошибки $Q(\sigma^T, \sigma^*)$ оценивания неизвестных плотностей. Доказано, что минимум риска обеспечивает вектор σ^* с компонентами $\sigma_j^* = \sum_{r=1}^l p_r \bar{\sigma}_{r,j}$, $j = 1, 2, \dots, m$, где

$$\bar{\sigma}_{r,j} = \frac{1}{\mu(\Omega_r)} \int_{\Omega_r} \sigma_j d\sigma_1 d\sigma_2 \dots d\sigma_m, \quad \mu - \text{классическая мера Лебега в пространстве } R^m.$$

Точность решения σ^* обратной задачи напрямую зависит от того, в какой степени точка σ^* тяготеет к «центру скопления» множеств Ω_r , граница которых обусловлена наиболее точными значениями α_i . Это приводит к следующему принципу выбора разбиения $\{\Omega_r\}$: если A система всех пар (X_s, X_t) ближайших друг к другу точек измерения поля и K - число таких пар, то Ω_r , $r = 0, 1, \dots, K$, - множества допустимых решений σ , для которых число пар точек $(X_t, X_s) \in A$, в которых разности наблюдаемого и модельного полей противоположны по знаку, равно r . В случае профильной съемки $K = n - 1$, A - множество пар соседних точек (X_i, X_{i+1}) , $i = 1, 2, \dots, n - 1$ и вероятности p_r подчиняются биномиальному закону $p_r = \binom{K}{r} 2^{-K}$. Можно утверждать, что множества Ω_r с индексами r , близкими к целому $[K/2]$, не могут быть образованы без участия наиболее точных измерений поля. Именно эти множества получают в наибольшие «веса» в векторе σ_j^* и на этой эвристике строится весь алгоритм.

В процессе вычислительных экспериментов решения $\sigma^* = \sigma^{МЭР}$ по методу минимизации эмпирического риска сопоставлялись с решениями $\sigma^* = \sigma^{МНК}$ по минимуму среднеквадратической невязки $\Phi(\sigma) = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta g_i - \Delta g^M(x_i, \sigma))^2 \right)^{1/2}$ наблюдаемого и модельного полей на множестве D (такой критерий выбора наилучшего решения типичен для детерминистского подхода). Точность приближенных решений σ^* обратной задачи оценивалась по значению функционала $Q(\sigma^*, \sigma^T) = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\sigma_j^* - \sigma_j^T)^2 \right)^{1/2}$.

Возможности метода минимизации эмпирического риска проиллюстрируем на модельных примерах.

Пусть аномалия гравитационного поля $\Delta g(x)$, заданная на профиле длиной 20 км в 51 точке, обусловлена двумя однородными прямоугольными призмами, обладающими избыточными плотностями $\sigma_1^T = 0,15$ г/см³ и $\sigma_2^T = 0,2$ г/см³ относительно вмещающей среды. Априорные ограничения на неизвестные значениями плотности призм определяют множество $D = \left\{ \sigma = (\sigma_1, \sigma_2) : 0,1 \text{ г/см}^3 \leq \sigma_1 \leq 0,2 \text{ г/см}^3; 0,1 \text{ г/см}^3 \leq \sigma_2 \leq 0,3 \text{ г/см}^3 \right\}$.

Было выполнено несколько серий расчетов. Каждая серия состояла из $N = 500$ вариантов решения линейной обратной задачи гравиразведки с различными выборками случайных чисел, имитирующих помехи ξ_i . В частности, использовались

помехи, распределенные по нормальному закону со среднеквадратическими значениями δ , составляющими от 5 до 30% от амплитуды поля Δg^T . Также использовались помехи, законы распределения которых являются асимметричными. При моделировании таких помех использовался следующий прием: 50% наиболее интенсивных нормальных помех положительного знака увеличивается в 10 раз. Для нормального закона распределения помех ξ_i решения $\sigma^{МНК}$, как и ожидалось, в среднем являются более точными. Однако отмечается тенденция к уменьшению относительных различий в величине $Q(\sigma^*, \sigma^T)$ с увеличением амплитуды помех (рис. 2а). Преимущества решения обратной задачи гравirazведки методом минимизации эмпирического риска при наличие помех, распределение которых отличается от нормального, иллюстрирует рисунок 2б. Здесь уже явное преимущество предлагаемого метода. Важно, что предлагаемый метод позволяет приближенно охарактеризовать погрешность определения результативных параметров для любого частного решения обратной задачи, исходя из величины эмпирического риска $J_0(\sigma^*)$, который определяется непосредственно в процессе вычислений (в то время как истинные значения искомых плотностей σ^T , требуемые для расчета показателя Q, на практике всегда остаются неизвестными).

Для модели аномалиеобразующих объектов, использованной в предыдущих примерах, с целью моделирования геологических помех, обусловленных неоднородностями верхней части геологического разреза, использовались 15 шаров (точечных масс), случайным образом распределенных по горизонтали и в интервале глубин от 100 до 1000 м от поверхности наблюдений. Генерировались коррелируемые в точках профиля асимметричные помехи, амплитуда которых была сопоставима с амплитудой полезной аномалии. Выявлено, что решение задачи по методу минимизации эмпирического риска дает среднее улучшение качества решения примерно в 1.6 раза ($Q(\sigma^{МЭР}, \sigma^T) = 0.043$ и $Q(\sigma^{МНК}, \sigma^T) = 0.068$).

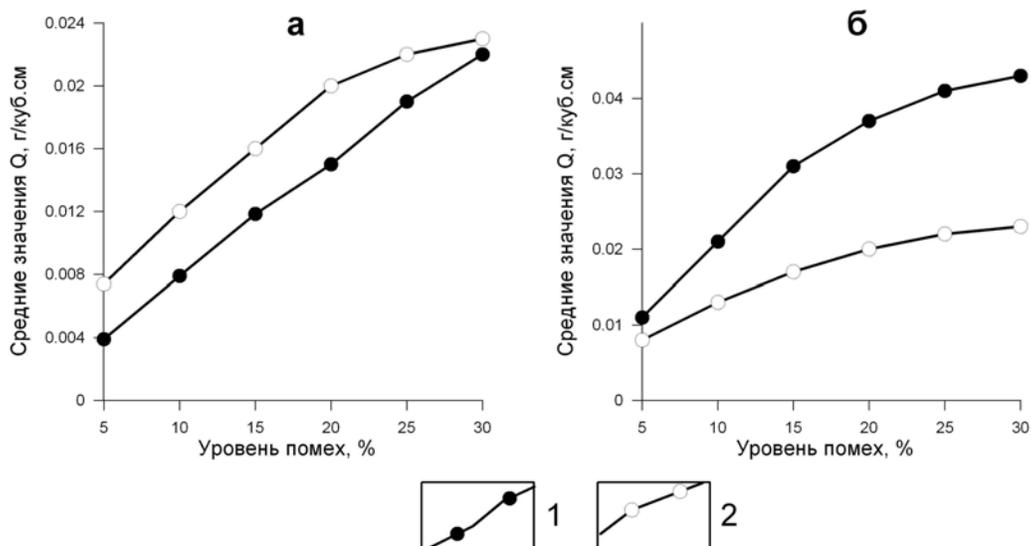


Рис. 2. Зависимость средней точности решения обратной задачи гравirazведки от уровня помех в исходном поле: а – помехи распределены по нормальному закону; б – распределение помех имеет ассиметричный характер.

1 – графики параметра $Q(\sigma^{МНК}, \sigma^T)$, 2 – графики параметра $Q(\sigma^{МЭР}, \sigma^T)$

Осуществлялось моделирование процесса оценки эффективной намагниченности $J_{эф}$ никеленосной интрузии, залегающей под трапповой мульдой на глубине 1500 м, а также перекрывающих ее эффузивных пород, по вертикальной составляющей геомагнитного поля ΔZ при наличии интенсивных логнормально распределенных помех. Выполнена серия расчетов, включающая 100 вариантов решения обратной задачи магнитометрии, Результаты этих расчетов свидетельствует о том, что метод минимизации эмпирического риска позволяет в среднем в 2.5 раза точнее оценивать величину $J_{эф}$ аномалиеобразующих объектов, чем метод наименьших квадратов ($Q(J^{МЭР}, J^T) = 0,52$ А/м, $Q(J^{МНК}, J^T) = 1,25$ А/м).

Все выполненные расчеты указывают на высокую информативность налагаемого на помехи условия $Me[\eta_i] = 0$, сопоставимую с информативностью детерминистских ограничений на физические параметры геологической среды, а по большому счету – лишней раз убеждают в плодотворности идеи комплексирования функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов в алгоритмах решения обратных задач.

ТРЕТЬЕ ЗАЩИЩАЕМОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Создана эффективная методика интерпретации результатов гравиметрических и магнитных съемок, включающая в себя трансформации полей на основе истокообразной аппроксимации, геологическое редуцирование, иерархическую классификацию и метод k-средних, позволившая охарактеризовать вещественные неоднородности кристаллического фундамента и осадочного чехла территории Пермского края [1, 6, 10 - 18, 22, 27, 28, 30, 31].

Повышение эффективности прогноза и поисков новых месторождений нефти и газа во многом зависит от правильной оценки структурных условий в осваиваемых районах. Эта оценка производится на основе комплексных геолого-геофизических исследований и преследует цель: определить местоположение современных поднятий, установить их форму, и соотношение структурных планов по основным продуктивным горизонтам. Итоги структурных исследований выражаются в схемах тектонического районирования, являющихся необходимой основой любых карт прогноза нефтегазоносности и выбора направлений геологоразведочных работ. Чем подробнее и обоснованнее выполняется тектоническое районирование, тем детальней будет разработано нефтегазогеологическое. Это напрямую влияет на объективный выбор методики и направлений геологоразведочных работ на нефть и газ, на глубину поисковых скважин, на количество и литолого-стратиграфическую приуроченность интервалов отбора керна и испытаний пластов на приток флюидов и в конечном итоге на прогноз и обоснование этажей разработки.

В настоящее время структурно-тектоническое районирование выполнено для территории Пермского края. Результаты работ по уточнению тектоники Пермского края и созданию новой тектонической модели легли в основу работ по определению новых направлений нефтегазопоисковых работ в различных тектонических условиях. Важную роль в процессе создания карт тектонического районирования играют интерпретационные построения по материалам гравиметрических и магнитных съемок,

выполняемые с применением современных компьютерных технологий, разработанных в лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН.

Исходными материалами для комплексной интерпретации геопотенциальных полей, с целью создания новой геофизической основы для тектонического районирования, являлись цифровые модели гравитационного и магнитного полей Пермского края, сформированные по данным съемок масштабов от 1:25 000 до 1:200 000. Цифровая модель рельефа земной поверхности сформирована по данным GTOPO30, охватывающие всю поверхность Земли и свободно распространяемые в сети Интернет. Сеть задания значений всех параметров составляла 5×5 км.

С использованием программ, реализующих алгоритмы истокообразной аппроксимации, вычислялись различные линейные трансформанты геопотенциальных полей, в частности модули полного горизонтального градиента, пересчет в верхнее полупространство, псевдогравитационное преобразование и т.д.

Предпринята попытка разделения гравитационных эффектов, обусловленных влиянием кристаллического фундамента $\Delta g_{кф}$ и осадочного чехла $\Delta g_{оч}$, для чего использовалось несколько подходов:

- геологическое редуцирование, базирующееся на материалах глубокого бурения и региональной сейсморазведки, а также сведениях о петроплотностной характеристике осадочного чехла;
- вычисление остаточных гравитационных аномалий, представляющих собой разность наблюдаемого поля силы тяжести и результата его пересчета на уровень 25 км;
- вычисление разности между наблюдаемым гравитационным полем и псевдогравитационным полем на уровне 15 км.

Все три варианта дали близкие между собой результаты, что дает основание доверять полученным картам гравитационного поля, отражающим влияние двух основных структурных этажей верхней части земной коры исследуемой территории.

Отдельно для полей $\Delta g_{кф}$ и $\Delta g_{оч}$ вычислялись трансформанты, которые затем подвергались качественной интерпретации. Основное внимание при этом уделялось пликативным и дизъюнктивным структурам кристаллического фундамента, определяющим развитие потенциально нефтегазоперспективных комплексов горных пород осадочного чехла. В результате с использованием имеющейся геологической основы была составлена «Схема линеаментов кристаллического фундамента Пермского края и прилегающих территорий», которая позволила уточнить его блоковое строение.

Особенности гравитационного и магнитного полей, обусловленных преимущественно влиянием кристаллического фундамента, анализировались путем последовательного применения двух кластерных процедур: по результатам иерархической процедуры кластерного анализа (построение дендрограммы) определялось количество классов для автоматической классификации данных методом динамических сгущений (k-средних).

В результате проведенного анализа была получена карта классификации геофизических полей, которая отчетливо отражает основные особенности структурно-тектонического строения изучаемой территории (рис. 3). Появились основания для выделения серии разломов, которые ранее отсутствовали на тектонической схеме

строения фундамента Пермского Приуралья. Проведено уточнение границ крупных тектонических структур. Построенная карта результатов классификации дополнила имеющиеся представления о глубинном строении Пермского края и прилегающих территорий и послужила дополнительным источником информации при создании новой тектонической модели (схемы) с целью повышения эффективности прогноза и поисков месторождений нефти и газа выполненной по заказу Министерства природных ресурсов Пермского края.

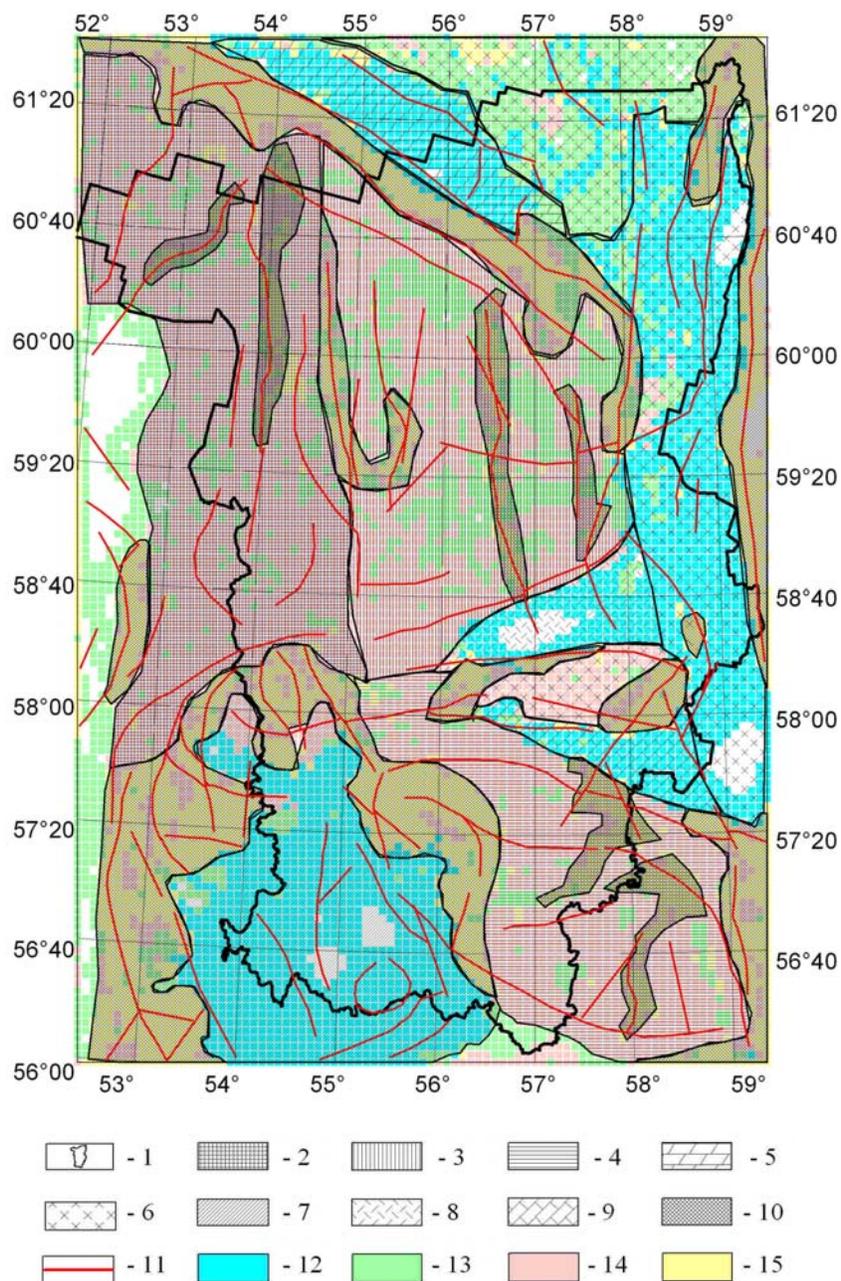


Рис. 3. Карта классификации геофизических полей методом k – средних: 1 – граница Пермского края; 2 – Коми-Пермяцкий беломорский массив; 3 – Камский беломорский массив; 4 – Кунгуро-Красноуфимский беломорский массив; 5 – Тиманский блок; 6 – Уральская складчатая зона; 7 – Калтасинский авлаоген; 8 – Краснокамско-Гремячинский выступ; 9 – Сылвенский блок-впадина; 10 – зоны разломов; 11 – линеаменты по гравиразведке и магниторазведке; 12 – первый класс; 13 – второй класс; 14 – третий класс; 15 – четвертый класс

Представленная методика интерпретации гравитационного и магнитного полей была применена для исследования Юрюзано-Сылвенской депрессии находящейся на юге-востоке Пермского края. В гравитационном плане уникальной для ЮСД является Березовская аномальная зона (Березовский максимум), простирающаяся в северо-восточном направлении. Протяженность аномалии более 100 км, ширина порядка 15 км, амплитуда достигает более 30 мГал. В работе Койфмана Л.И. сделано предположение, что аномалия образована интрузией магматических пород, кровля которой находится ниже поверхности фундамента. Учитывая характер магнитных аномалий в районе Березовского максимума, можно предположить, что интрузия представлена весьма плотными породами основного или ультраосновного состава, обладающих сравнительно низкой намагниченностью, поэтому при интерпретации Березовского максимума использовались только данные гравиразведки.

В рамках исследования было осуществлено гравиметрическое моделирование Березовского максимума с использованием новой модификации монтажного метода решения нелинейной обратной задачи гравиразведки – регулируемая направленная раскристаллизация. Представленный метод реализован в качестве отдельного модуля информационно-аналитической системы (ИАС) ГРАВИС, созданной на основе современной геоинформационной системы ArcGIS 9.0, которая предназначена для решения широкого круга прикладных задач разведочной геофизики, связанных с изучением глубинного геологического строения, прогноза и поисков залежей месторождений углеводородного сырья и месторождений твердых полезных ископаемых. Данный модуль позволяет осуществлять решение 2 D обратной задачи гравиразведки для одного аномалиеобразующего объекта, т.е. ее практическое применение пока ограничено интерпретацией моногеничных аномалий. Полученная модель подобранного аномалиеобразующего объекта хранится в виде сеточной модели (*shp*-файл) с включением в базу данных геоинформационных систем (ГИС).

В качестве исходных данных при моделировании Березовского максимума послужили сводная гравиметрическая карта и рельеф поверхности наблюдения, а так же различного рода априорная информация об исследуемом объекте: предполагаемая плотность интрузии, ее пространственное положение, карта поверхности кристаллического фундамента и т.д.

Технологическая цепочка гравиметрического моделирования Березовского максимума выглядит следующим образом:

- проведено выделение гравитационного эффекта обусловленного преимущественно влиянием кристаллического фундамента, путем вычисления поля силы тяжести в верхнее полупространство на уровень 5 км, что отвечает средней глубине поверхности фундамента на исследуемой территории;
- выделена аномалия, обусловленная преимущественно влиянием исследуемой интрузии;
- осуществлен подбор конфигурации аномалиеобразующей интрузии с учетом известной априорной информации по серии профилей, с использованием новой модификации монтажного метода решения нелинейной обратной задачи гравиразведки – регулируемая направленная раскристаллизация;
- построена объемная модель интрузии в среде ГИС ArcGis 9.0 (приложение ArcScene).

В результате интерпретации аномалиеобразующий объект подобран в виде узкой протяженной пластины длиной свыше 100 км с априорно заданной плотностью $2,98 \text{ г/см}^3$ (рис. 4). Ширина интрузии на юго-западе составляет порядка 2 км и увеличивается в северо-западном направлении до 7 км. Наблюдается постепенное плавное понижение в северо-восточном направлении глубины кровли интрузии, практически полностью находящейся ниже поверхности фундамента. Непосредственно на процесс осадкообразования в районе Юрюзано-Сылвенской депрессии внедрение интрузии в породы фундамента не повлияло. В то же время магмоподводящая зона глубинного разлома могла служить каналом для флюидов, в том числе и содержащих углеводороды, и здесь в течении длительного периода мог отмечаться повышенный тепловой поток. Поэтому надинтрузивные осадочные образования могут быть более перспективными для поисков нефтяных и особенно газовых месторождений.

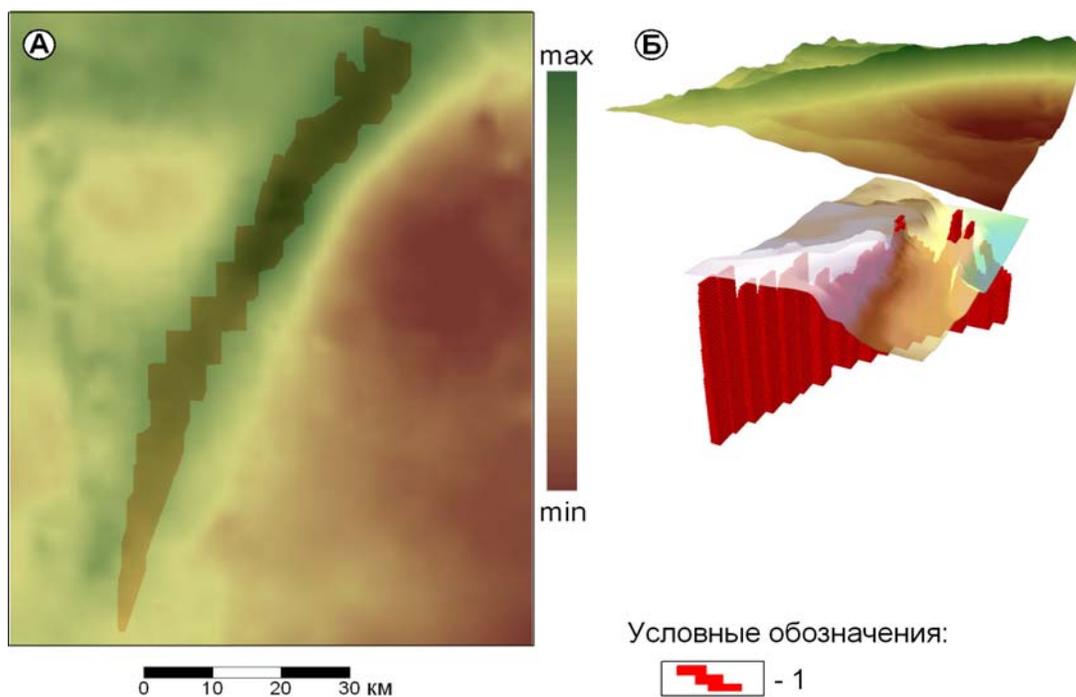


Рис. 4. Результат решения обратной задачи гравиразведки на Юрюзано-Сылвенской депрессии, полученный с помощью монтажного метода в модификации регулируемой направленной кристаллизации: А – положение в плане подобранной интрузии на карте исходного гравитационного поля; Б – трехмерная модель.
 1 – подобранная интрузия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены методы и компьютерные технологии интерпретации гравитационного и магнитного полей, базирующиеся на функционально-аналитическом и вероятностно-статистическом подходах, а также на их синтезе, ориентированные на построение геологически содержательных моделей.

Основные научные результаты сводятся к следующему:

- Впервые реализованы новые модификации монтажного метода решения нелинейной обратной задачи гравиразведки – регулируемая направленная раскристаллизация и регулируемая направленная перекристаллизация.

- Установлена возможность увеличения скорости решения нелинейной обратной задачи гравиразведки монтажным методом при использовании последовательно сгущающихся сеток, аппроксимирующих аномалиеобразующие объекты и многопроцессорных компьютерных систем.
 - Впервые доказана возможность использования критерия минимизации эмпирического риска в процессе решения линейных обратных задач гравиразведки и магниторазведки, обеспечивающего подавление интенсивных знакопеременных помех в исходных данных, обладающих асимметричным законом распределения.
 - Успешно проведено комплексирование функционально-аналитического и вероятностно-статистического подходов в алгоритме решения линейных обратных задач при условии равенства нулю медианного значения помех в измерениях.
 - Доказана возможность оценки качества собственных результатов метода эмпирического риска решения практических линейных обратных задач, что не представляется возможным при использовании стандартных детерминистских технологий интерпретации.
 - Построена эффективная технологическая цепочка интерпретации результатов гравиметрических и магнитных съемок при изучении глубинного геологического строения платформенных территорий.
- Основные практические результаты исследований:
- Предлагаемые монтажные алгоритмы снимают проблему неустойчивости решения обратной задачи гравиразведки в ее классическом понимании, что существенно облегчает и ускоряет количественную интерпретацию наблюдаемых аномалий силы тяжести.
 - Доказана высокая эффективность определения петроплотностных (петромагнитных) характеристик геологических объектов в естественном залегании путем решения линейных обратных задач с использованием критерия минимизации эмпирического риска.
 - Выделены серии разломов различного простирания, которые ранее отсутствовали на тектонической схеме строения фундамента Пермского Приуралья; проведено уточнение границ крупных глубинных тектонических структур.
 - Построена карта результатов классификации, объективно отражающая все особенности гравитационного и магнитного полей, которая дополнила имеющиеся представления о глубинном строении Пермского края и прилегающих территорий. Карта послужила дополнительным источником информации при создании различных структурно-тектонических схем, используемых для нефтегазогеологического районирования.
 - Разработанные компьютерные технологии применяются при интерпретации практических геофизических данных, полученных при выполнении по заказам недропользователей работ, выполняемых в пределах Пермского края и в других регионах России.

Представленные в работе алгоритмы могут быть развиты применительно к решению задач 3D моделирования геологических объектов по гравитационному и магнитному полям, измеренным как по серии профилей, так и в точках пространственно-неоднородных сетей наблюдений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. *Бычков С.Г., Неганов В.М., Мичурин А.В.* Нефтегазогеологическое районирование территории Пермского края: [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2010. Режим доступа к журн.: http://www.ogbus.ru/Buchkov/Buchkov_2.pdf. -22 с.
2. *Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Смешанные вероятностно-детерминистские методы решения линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Геофизика, 2011. № 2. – С. 20 - 29.
3. *Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки // Доклады Российской академии наук. Т. 438. № 4. 2011. – С. 1 - 6.

В зарубежных изданиях

4. *Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Решение обратной задачи гравиметрии монтажным методом с оценкой достоверности результатов // IX Международная конференция «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты». – Киев, 2010. – CD (Загл. с экрана).
5. *Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Вероятностно-детерминистский подход к решению линейных обратных задач в гравиметрии, магнитометрии и электроразведке // Geoinformatics 2011 [electronic resource]: Xth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. – Kiev, 2011. – A041.pdf. – (CD-ROM).

В других журналах

6. *Мичурин А.В.* Информационно-статистический анализ цифровых моделей геопотенциальных полей при геотектоническом районировании территории Пермского края // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. Научно-информационное издание №3 (37). – Пермь, 2009. – С. 24 - 28.
7. *Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Новая модификация монтажного метода решения нелинейной обратной задачи гравиметрии // Уральский геофизический Вестник. 2010 №2. – 2010. – С. 34 - 40.
8. *Балк П.И., Деменев А.Г., Долгаль А.С., Леденцов О.В., А.В. Мичурин.* Эффективность применения многопроцессорных вычислительных систем с целью оценки достоверности решения обратной задачи гравиметрии // Вестник Пермского университета. Геология. Выпуск 1 (9). – Пермь, 2010. – С. 50-58.
9. *Долгаль А.С., Мичурин А.В.* Развитие конечноэлементного подхода к интерпретации гравиметрических данных // Геофизические методы при разведке недр / отв. ред. Л.Я. Ерофеев, В.И. Исаев – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 40 - 44.

В сборниках материалов и докладов конференций разного уровня

10. *Мичурин А.В.* Трансформации геопотенциальных полей при изучении кристаллического фундамента (на примере Пермского края) // Девятая Уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2008. С. 113-116.
11. *Мичурин А.В.* Опыт применения трансформаций геопотенциальных полей для изучения кристаллического фундамента Пермского края // Материалы ежегодной

- научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2007 г. – Пермь, 2008. С. 51-53.
12. Долгаль А.С., **Мичурин А.В.** Отражение особенностей геологического строения кристаллического фундамента Пермского края в гравитационном и магнитном полях // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Материалы научно-практической конференции. – Пермь: ПГУ, 2008. С. 199-203.
 13. **Мичурин А.В.** Районирование геопотенциальных полей с использованием кластерного анализа // Десятая Уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2009. С. 139-143.
 14. **Мичурин А.В.** Возможности кластерного анализа геопотенциальных полей при изучении кристаллического фундамента // Материалы ежегодной науч. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2009. С. 114-117.
 15. **Мичурин А.В.** Анализ геопотенциальных полей Пермского края методом k-средних // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Материалы научно-практической конференции. – Пермь: ПГУ, 2009. С. 235-238.
 16. Бычков С.Г., Долгаль А.С., **Мичурин А.В.** Уточнение глубинного строения Пермского края по результатам интерпретации геопотенциальных полей // Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Пятое науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича. – Екатеринбург: Ин-т геофиз. УрО РАН, 2009. – С. 165-168.
 17. **Мичурин А.В.** Классификация геопотенциальных полей и их трансформант при структурно-геофизическом районировании Пермского края // Материалы VII Международной научно-практической конкурс-конференции “ГЕОФИЗИКА-2009”. 5-9 октября 2009 г. – СПб.: «Соло», 2010. – С. 52-55.
 18. **Мичурин А.В.**, Долгаль А.С., Бычков С.Г. Информационно-статистический анализ цифровых моделей геопотенциальных полей масштаба 1:500 000 при изучении глубинного строения западного Урала // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 37-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, М.: ИФЗ РАН, 2010, С. 278 - 282.
 19. **Мичурин А.В.** Решение плоской обратной задачи гравиметрии монтажным методом в модификации регулируемой направленной раскристаллизации // Одиннадцатая Уральская молодежная школа по геофизике: Сборник докладов. – Екатеринбург: ИГф УрО РАН, 2010. С. 149 - 152.
 20. **Мичурин А.В.** Новая модификация решения обратной задачи гравиметрии для сеточных моделей источников поля // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 109 - 111.
 21. **Мичурин А.В.** Новая реализация монтажного подхода к решению обратной задачи гравиметрии – метод регулируемой направленной раскристаллизации // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Материалы научно-практической конференции. – Пермь: ПГУ, 2010. – С. 176 - 178.
 22. Бычков С.Г., Долгаль А.С., **Мичурин А.В.** Структурно-тектоническое районирование на основе классификации геопотенциальных полей и их

- трансформант // Структура, свойства, динамика и минерагения литосферы Восточно-Европейской платформы: Материалы XVI Международной конференции 20 – 24 сентября 2010 года: в 2-х т. – Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2010. – Т. I. – С. 164 - 169.
23. Балк П.И., Деменев А.Г., Долгаль А.С., Леденцов О.В., Мичурин А.В. Эффективность применения многопроцессорных вычислительных систем с целью оценки достоверности решения обратной задачи гравиметрии // Материалы X Международной конференции «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах». – Пермь, 2010. – С. 40 - 48
 24. Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к решению линейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 38-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Пермь, 24-28 января 2011 г. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 26 - 29.
 25. Долгаль А.С., Мичурин А.В., Новикова П.Н., Христенко Л.А., Шархимуллин А.Ф. Новые направления развития монтажных технологий решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 38-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Пермь, 24-28 января 2011 г. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 26 - 29.
 26. Мичурин А.В. Совершенствование алгоритмов и методик количественной интерпретации гравитационных аномалий монтажным методом // Двенадцатая уральская молодежная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – С. 149 - 152.
 27. Мичурин А.В. Построение содержательных моделей геологических объектов с использованием компьютерных технологий интерпретации геопотенциальных полей // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 9. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. С. 126 - 129.
 28. Мичурин А.В., Симанов А.А. Применение ГИС технологий при моделировании глубокозалегающей интрузии по гравитационному полю // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы юбилейной конф., посвященной 80-летию геолог. ф-та и 95-летию Перм. ун-та. Перм. гос. Нац. Иссл. Ун-т.– Пермь, 2011. – С. 98- 100.
 29. Мичурин А.В. Анализ возможностей модификации монтажного метода при решении нелинейной обратной задачи гравиметрии рудного типа // Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Пятое науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича.–Екатеринбург:Ин-т геофиз. УрО РАН, 2011. – С. 257-259.
 30. Мичурин А.В., Симанов А.А. Конечноэлементный подход при моделировании глубокозалегающей интрузии по гравитационному полю (на примере Юрюзано-Сылвенской депрессии) // Материалы VII Международной научно-практической конкурс-конференции “ГЕОФИЗИКА-2011”. 3-7 октября 2011 г. – С. 86-89.
 31. Пугин А.В., Симанов А.А., Мичурин А.В., Новикова П.Н. Аппроксимации как инструмент успешного решения прикладных геофизических задач // Материалы VII Международной научно-практической конкурс-конференции “ГЕОФИЗИКА-2011”. 3-7 октября 2011 г. – С. 103-104.