

На правах рукописи



Пугин Алексей Витальевич

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ
АППРОКСИМАЦИЙ И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА**

25.00.10 - Геофизика,
геофизические методы поисков
полезных ископаемых

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2007

Работа выполнена в Горном институте Уральского отделения РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Долгаль Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
Блох Юрий Исаевич (Российский государственный
геологоразведочный университет)

доктор физико-математических наук
Шестаков Алексей Федорович
(Институт геофизики УрО РАН)

Ведущая организация – Пермский государственный университет

Защита состоится «25» мая 2007 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д.004.009.01 при Институте геофизики Уральского отделения РАН, по адресу: 620016, г.Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики Уральского отделения РАН

Автореферат разослан «23» апреля 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор



Хачай Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

В настоящее время геологические исследования характеризуется переходом на качественно новый уровень изучения и освоения недр Земли. Особое внимание при проведении геокартировочных и прогнозно-поисковых работ уделяется геофизическим методам, в том числе гравиметрии и магнитометрии. Определяющую роль в развитии теории и практики современных геофизических исследований играют следующие факторы: появление измерительной аппаратуры, обеспечивающей высокую точность наблюдений; совершенствование методик выполнения геофизических наблюдений; аккумуляция знаний и практических результатов и глубокая проработка на их основе теории и методологии интерпретации геолого-геофизических данных; стремительное увеличение производительности вычислительной техники и создание эффективных компьютерных технологий хранения, обработки и интерпретации цифровой информации.

Современное состояние методов интерпретации геопотенциальных полей во многом определяется работами В.И.Аронова, Ю.И.Блоха, Е.Г.Булаха, Г.Я.Голиздры, А.И.Кобрунова, А.К.Маловичко, П.С.Мартышко, А.А.Никитина, В.М.Новоселицкого, В.И.Старостенко, В.Н.Страхова, А.Н.Тихонова, А.В.Цирульского и др. Одним из приоритетных направлений развития теории и практики интерпретации аномальных физических полей, сформулированных В.Н.Страховым, является широкое применение аппроксимационного подхода к решению прямых и обратных задач и его синтез с методами анализа структуры данных (распознавание образов).

Вследствие развития аппаратно-технической базы возрастают потребности в создании современных методов и алгоритмов извлечения геологической информации из данных полевых измерений. Практическая реализация их в виде компьютерных технологий требует разработки новых подходов, базирующихся на вычислительной математике, учитывающих реальные физико-геологические условия и большую размерность исходных данных. Применение такого рода технологий в значительной мере расширяет область прикладных задач геофизики, решение которых ранее не представлялось возможным либо имело ряд существенных ограничений в виду малой мощности ЭВМ предыдущих поколений.

Цель диссертации:

Повышение информативности геофизических исследований и снижение вычислительных затрат путем разработки методов, алгоритмов и компьютерных технологий интерпретации геопотенциальных полей на основе аналитических аппроксимаций и вейвлет-анализа.

Основные задачи исследований:

1. Исследование возможностей вейвлет-преобразования:
 - а.) непрерывного – при изучении морфологии геопотенциальных полей и формировании представлений об источниках аномалий, как при отсутствии, так и при наличии априорной информации.
 - б.) дискретного – при моделировании геологических объектов в процессе решения прямых и обратных задач.

2. Создание алгоритмов и программной реализации непрерывного и дискретного вейвлет-анализа в аспекте их применения к моделированию геопотенциальных полей и геологических границ (поверхностей).
3. Разработка компьютерной технологии определения интегральных характеристик аномалиеобразующих объектов и модифицированной технологии векторного сканирования на базе истокообразных аппроксимаций с использованием сеточных эквивалентных моделей источников.
4. Разработка и техническая реализация методов и алгоритмов построения многоуровневых (иерархических) истокообразных аппроксимаций геопотенциальных полей на основе фрактального подхода, обуславливающих существенное снижение вычислительных затрат на этапе трансформаций полей при решении задач большой размерности (более 10^5 - 10^6 точек задания поля).
5. Тестирование созданных алгоритмов и программ на модельных и практических данных.

Методы исследований:

- методы вычислительной математики: метод простой итерации, метод Зейделя, метод Монте-Карло, метод усечения отрезков и др.;
- элементы и положения теории и методологии интерпретации аномальных геофизических полей;
- истокообразная аппроксимация с использованием сеточных эквивалентных моделей источников;
- элементы векторной алгебры;
- непрерывное и дискретное вейвлет-преобразование, кратномасштабный анализ, вейвлет-аппроксимации;
- элементы теории фракталов, метод квадродерева;
- спектральный анализ и аппроксимации гармоническими функциями на основе Фурье-преобразования;
- методы интерполяции (крайгинг, сплайны и др.);
- методы модельных исследований и вычислительный эксперимент.

Научная новизна:

1. Разработан подход к построению многоуровневых истокообразных аппроксимаций, учитывающий фрактальные особенности измеренных геопотенциальных полей, и базирующийся на последовательных приближениях разномасштабных элементов их морфологического строения;
2. На основе данного подхода разработаны методы построения аналитических моделей потенциальных геофизических полей, позволяющие минимизировать число источников в аппроксимационной конструкции при сохранении необходимой точности аппроксимации значений поля на исходном множестве точек его задания;
3. Предложен подход к моделированию геологических поверхностей методом кратномасштабного анализа на основе вейвлет-функций Хаара, позволяющий минимизировать количество аппроксимирующих элементов (прямоугольных призм) в процессе моделирования геологических объектов.

Теоретическая значимость:

В рамках аппроксимационного подхода к интерпретации потенциальных геофизических полей предложен ряд методов и алгоритмов, ориентированных на минимизацию вычислительных затрат в процессе решения прямых и обратных задач. На основе модельных и практических примеров проведен анализ возможностей и особенностей применения методов вейвлет-преобразований при интерпретации данных гравиметрии и магнитометрии.

Практическая значимость:

Предложенные разработки реализованы в виде компьютерных технологий для IBM-совместимых персональных компьютеров. Применение данных технологий позволяет решать широкий круг прикладных задач, возникающих в современной разведочной геофизике. Ориентация разработанных методов и алгоритмов на снижение вычислительных затрат позволяет более эффективно использовать возможности вычислительной техники, особенно при решении интерпретационных задач на множествах, содержащих более 10^5 - 10^6 точек задания поля в пределах одного объекта исследований и при постоянном повышении уровня сложности преобразований.

Созданные алгоритмы и компьютерные технологии использовались при поисках нефтеперспективных площадей на территории Юрюзано-Сылвенской депрессии (ЮСД) в пределах Пермского края и при прогнозировании богатого платино-медно-никелевого оруденения на территории Северо-Сибирской никеленосной провинции. Результаты интерпретации приведены в соответствующих научно-исследовательских отчетах.

Личный вклад автора:

Основу диссертационной работы составляют результаты исследований, выполненных автором в период с 2003 по 2006 год в Горном институте УрО РАН. Основные теоретические и прикладные результаты исследований, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии.

Защищаемые положения:

1. Применение разработанных методов и алгоритмов, базирующихся на последовательных разномасштабных приближениях геопотенциальных полей, позволяет уменьшить количество элементарных источников в сеточной эквивалентной модели, адаптируя их геометрию к морфологическим особенностям поля разного ранга, что обуславливает снижение вычислительных затрат как в процессе построения аппроксимационной конструкции, так и на этапе трансформаций при сохранении требуемой точности восстановления поля на множестве точек его задания.
2. Использование непрерывного вейвлет-преобразования при изучении морфологии измеренных геопотенциальных полей дает возможность сформировать начальные представления об аномалиеобразующих объектах, а применение дискретного вейвлет-преобразования для кусочно-призматической аппроксимации геологических поверхностей позволяет минимизировать число аппроксимирующих элементов при аналитическом решении прямой задачи гравиразведки.
3. Разработанные алгоритмы и компьютерные технологии адаптированы к условиям и потребностям современной геофизической практики и обеспечивают эффективное решение широкого круга прикладных задач большой размерности при поисках месторождений полезных ископаемых.

Фактический материал:

Фактической основой исследований послужили данные гравиметрических съемок, проводимых Горным институтом УрО РАН, а также материалы, полученные в процессе работы над геолого-геофизическими отчетами по договорной тематике с основными нефте- и горнодобывающими предприятиями России и при выполнении подпрограммы «Минерально-сырьевые ресурсы» федеральной целевой программы «Экология и природные ресурсы России (2002-2010 г.г.).

Апробация и публикации:

Основные положения и результаты работы докладывались на Уральской молодежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2004, 2006; Пермь, 2005); на региональной научно-практической конференции «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (Пермь, 2004, 2005, 2006); на Международных семинарах «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» им. Д.Г.Успенского (Пермь, 2005; Екатеринбург, 2006; Москва, 2007); на третьих научных чтениях памяти Ю.П.Булашевича (Екатеринбург, 2005); на Пятой Международной научно-практической геолого-геофизической конференции-конкурсе молодых ученых и специалистов «ГЕОФИЗИКА-2005» (Санкт-Петербург, 2005); на Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2006» (Новосибирск, 2006); на международной конференции EAGE (Санкт-Петербург, 2006); а также на научных сессиях Горного института УрО РАН (Пермь, 2004, 2005, 2006).

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 22 печатных работах, одна из которых опубликована в Докладах Российской Академии наук, рекомендованных для публикации Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения общим объемом 140 страниц, содержит список литературы, включающий 137 наименований, а также 35 иллюстраций и 5 таблиц.

Автор выражает благодарность за непосредственную помощь в проведении исследований и конструктивные замечания коллективу лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН и заведующему лабораторией, к.г.-м.н. С.Г.Бычкову. За неоценимую поддержку в процессе исследований автор выражает огромную благодарность д.г.-м.н., профессору В.М.Новоселицкому.

Огромную роль на формирование научных идей автора оказало общение на научно-практических конференциях с известными исследователями-геофизиками к.ф.-м.н. В.М.Гординым, д.ф.-м.н., профессором Ю.И.Блохом, член-корреспондентом РАН П.С.Мартышко. Значительный вклад в расширение научного мировоззрения автора привнесло неоднократное участие в работе Уральской молодежной научной школы по геофизике. Особую признательность автор выражает член-корреспонденту РАН В.И.Уткину, как одному из организаторов и замечательному руководителю молодежного научного движения на Урале. Автор признателен д.ф.-м.н., профессору М.Н.Юдину за научные консультации в области вейвлет-анализа и преобразований, возникших на его основе.

Глубокую признательность и благодарность автор выражает своему учителю – д.ф.-м.н А.С.Долгалю.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Аппроксимационный подход к решению интерпретационных задач гравиметрии и магнитометрии

В первой главе рассмотрена роль аппроксимаций при интерпретации геопотенциальных полей; кратко изложены общеметодологические принципы их применения при решении различных задач разведочной геофизики; приводится общая характеристика используемых в работе методов аналитического представления пространственного распределения геолого-геофизических параметров, таких как аппроксимации тригонометрическими и вейвлет-функциями, истокообразные аппроксимации с использованием сеточных эквивалентных моделей. Кроме того, приводится обзор методов, ориентированных на решение задачи восстановления значений геолого-геофизических параметров в узлах регулярной сети.

2. Развитие методов истокообразной аппроксимации при интерпретации геопотенциальных полей

2.1. Теоретические основы аппроксимации полей сеточными эквивалентными моделями

В теоретическом плане полевые метрологические аппроксимации базируются на свойстве единственности гармонических функций: "две гармонические функции, совпадающие на замкнутой поверхности, совпадают всюду внутри нее. Гармоническая функция вполне определяется своими значениями на замкнутой поверхности" (Е.Г.Булах, В.Н.Шуман, 1998).

Общие принципы построения аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей на основе эквивалентных моделей выглядят следующим образом:

- а) исходное потенциальное поле $U(x,y,z)$ аппроксимируется полем $U^*(x,y,z)$, обусловленным некоторой совокупностью источников;
- б) выбранная совокупность источников должна описываться небольшим числом параметров, определяющих их физические и геометрические характеристики, и при этом обеспечивать высокую степень близости исходного $U(x,y,z)$ и модельного $U^*(x,y,z)$ полей;
- в) все последующие преобразования поля сводятся к решению прямой задачи от аппроксимационной конструкции в точках пространства вне области, содержащей источники поля.

Использование сеточных эквивалентных распределений источников с фиксированными геометрическими характеристиками для аналитического представления внешних элементов геопотенциальных полей впервые предложено В.И.Ароновым (1976, 1990). Потенциальное поле, заданное в узлах регулярной сети ($\Delta x = const$), аппроксимируется системой истокообразных функций – полей элементарных источников, расположенных всюду ниже поверхности наблюдений под каждой точкой задания исходного поля. В качестве источников выбираются тела простой формы (точечные массы, тонкие полубесконечные стержни, элементарные диполи и пр.).

В вычислительном плане задача построения аналитической модели поля сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида:

$$\mathbf{GA} = \mathbf{U} \quad (2.1)$$

относительно вектора неизвестных параметров $\mathbf{A} = \{a_i\}$ - "масс" источников, где $\mathbf{G} = \{g_{ij}\}$ - матрица, элементы которой представляют собой потенциальные функции (поля элементарных источников при $a=1$), $\mathbf{U} = \{u_j\}$ - вектор исходных значений поля, заданных на поверхности $S = S(x, y, z)$; $i = 1, 2, \dots, m$ - число эквивалентных источников, создающих модельное поле U^* ; $j = 1, 2, \dots, n$ - число точек задания исходного поля. Источники располагаются на поверхности S' , удаленной на фиксированное расстояние z_0 от поверхности S задания поля U и полностью повторяющей ее форму.

В.И.Ароновым показано, что в этом случае СЛАУ будет хорошо обусловленной при $\Delta x \leq z_0 \leq 2\Delta x$, что обеспечивает устойчивость получаемых решений. При неравномерной сети $\Delta x \neq const$, задания поля U В.И.Ароновым и В.О.Михайловым предложено располагать аппроксимирующие массы на ряде поверхностей S'_1, S'_2, S'_3, \dots , расстояния $z_0^1, z_0^2, z_0^3, \dots$ от поверхности S до которых соизмеримы со средними расстояниями r между точками в соответствующих выборках значений поля из множества T . Максимальное значение z_0^1 в этом случае соответствует радиусу наибольшего белого пятна в области задания поля.

Данный подход к построению аппроксимаций обеспечивает асимптотически оптимальное по точности вычисление трансформант V^* исходного поля, которое достигается применением линейных операторов L определенного вида к множеству физических параметров \mathbf{A} , определенных при решении СЛАУ (2.1):

$$\mathbf{V}^* = \mathbf{AL}. \quad (2.2)$$

2.2. Учет "эффекта разновысотности" при анализе площадных геофизических наблюдений

Характерной особенностью измеренных геофизических полей является наличие в них аномалий-помех, обусловленных искажающим влиянием рельефа земной поверхности. По происхождению эти аномалии делятся на два типа: первые - обусловлены собственно возмущающим воздействием гравитирующих или магнитных масс горных пород, слагающих верхнюю часть геологического разреза и выходящих на дневную поверхность; вторые - возникают вследствие совместного влияния криволинейного характера поверхности наблюдений и аномального вертикального градиента поля - "эффект разновысотности" (А.С.Долгаль, 2002).

Основная проблема заключается в том, что большинство традиционных методов интерпретации идеализируют реальные условия выполнения геофизических работ, представляя поверхность измерений в виде горизонтальной плоскости. В диссертационной работе автором рассмотрен ряд примеров, когда подобного рода идеализация вследствие влияния разновысотности пунктов наблюдений может привести к существенным ошибкам при интерпретации аномальных полей. Исследованы вопросы, касающиеся проявления данного фактора как при неглубоком залегании возмущающих объектов (глубина соизмерима с перепадом высот рельефа поверхности измерений), так и при довольно глубинном происхождении аномалий поля.

Задача приведения измеренных в отдельных точках пространства, на различных высотных отметках значений поля к единому высотному уровню является одной из важнейших при интерпретации данных аэро- и наземных гравиметрических и магнитных съемок. Вопросами редуцирования потенциальных геофизических поле на плоскость в различные годы занимались М.А.Алексидзе, В.И.Аронов, В.В.Бровар, А.Бьерхаммар, В.М.Гордин, В.А.Кузиванов, М.С.Молоденский, В.А.Магницкий, Л.П.Пеллинен, В.Н.Страхов, А.В.Цирульский и др.

Построение сеточной модели элементарных источников с учетом рельефа поверхности измерений и последующее редуцирование геопотенциальных полей на горизонтальную плоскость на высоту максимальной отметки рельефа в пределах объекта исследований позволяет практически исключить влияние “эффекта разновысотности”.

Кроме того, представляется возможным выполнить оценку влияния данного геометрического фактора (“эффекта разновысотности”) на основе предложенной автором в работе схемы с использованием истокообразных аппроксимаций в целях определения степени искажений наблюдаемых полей применительно к решению целевой задачи интерпретации.

2.3. Использование аппроксимационных преобразований в технологии векторного сканирования

Интерпретационная система «ВЕКТОР», разработанная в 80^е – 90^е годы XX века коллективом лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН (научный руководитель – В.М.Новоселицкий), постоянно развивается и в течение многих лет успешно используется в практике геофизических исследований.

Базисом системы является подход, предложенный В.М.Новоселицким, основанный на технологии векторного сканирования геопотенциальных полей. Сущность подхода заключается в системном выполнении отдельных этапов анализа геопотенциальных полей:

- 1) процедуры триангуляции на множестве точек задания поля с многократным перекрытием треугольных элементов и вычислении векторов полного горизонтального градиента $\vec{G}_{набл}$ в медианных центрах треугольников;
- 2) нахождении средних векторов горизонтального градиента поля \vec{G}_{cp} в скользящих окнах различного размера и вычитании этих векторных величин, как фоновой составляющей, из каждого вектора $\vec{G}_{набл}$;
- 3) последующим интегрированием соответствующих векторных разностей градиентов $\vec{G}_{ан}$ с целью восстановления локальной составляющей поля, отображающей, главным образом строение части разреза от земной поверхности до некоторой эффективной глубины $h_{эф(i)}$, определяемой коэффициентом трансформации k_i , зависящим от размеров окна.

Метод векторного сканирования имеет высокую разрешающую способность при разделении источников поля, особенно вертикально эшелонированных, создающих визуально моногеничную аномалию потенциального поля. Тем не менее, использование векторного подхода в его классическом варианте в современных условиях зачастую

сопряжено с рядом проблем, решение которых возможно в рамках истокообразной аппроксимации.

В новой модификации технологии ВЕКТОР А.С.Долгалем и В.М.Новоселицким (2005) было предложено использовать для вычисления горизонтальных градиентов аппроксимационную конструкцию в виде эквивалентной сеточной модели среды. В новой вычислительной схеме предлагается заменить триангуляцию точек наблюдений, численный расчет векторов горизонтальных градиентов и усреднение в скользящем окне построением аналитической аппроксимации наблюденного поля в базисе истокообразных функций $g(x)$ и последующими вычислениями горизонтальных градиентов на различных высотах H_i .

Применение аппроксимационного подхода значительно снижает вычислительные затраты, связанные с фактором размерности решаемой задачи. Операция пересчета поля в верхнее полупространство, в отличие от усреднения, характеризуется отсутствием резонансных явлений и при определенном выборе параметров близка к оптимальной фильтрации.

Новый алгоритм имеет ряд преимуществ перед классическим методом:

- 1) обеспечивается возможность обработки больших массивов данных (порядка 10^5 и более точек задания поля);
- 2) используется оптимальное по точности восстановление значений горизонтальных градиентов анализируемого поля в верхнем полупространстве;
- 3) исключается влияние разновысотности точек наблюдений на аномалии горизонтальных производных поля V_x и V_y ;
- 4) осуществляется эффективная фильтрация помех негармонического характера;
- 5) выполняется строгий аналитический учет различий в характере затухания гравитационного и магнитного полей по мере удаления от источников;
- 6) отсутствуют искажения трансформант, связанные с использованием преобразований поля в скользящих окнах (явления Гиббса, краевые эффекты);
- 7) имеется возможность контроля точности численного интегрирования при восстановлении поля по значениям горизонтальных градиентов.

Алгоритм разработан и реализован при участии автора в виде новой модификации программы ВЕКТОР.

2.4. Определение интегральных характеристик аномалиеобразующих объектов

Впервые метод определения интегральных характеристик изолированных возмущающих тел по аномалиям поля силы тяжести был предложен Г.А.Гамбурцевым и в дальнейшем развивался и обобщался многими учеными - Е.Г. Булахом, П.И. Балком, Ю.И.Блохом, А.А. Заморевым, В.К. Ивановым, А.П. Казанским, Д.С. Миковым, В.Н. Страховым, К.Ф. Тяпкиным и др. К интегральным характеристикам аномалиеобразующих объектов, распределенных в некотором объеме геологической среды V , относят – суммарную массу M и координаты центра масс (Справочник геофизика, 1990).

Применение истокообразных аппроксимаций позволило более рационально подойти к практической реализации метода и разработать эффективный алгоритм определения интегральных характеристик аномалиеобразующих тел.

Основу алгоритма составляют следующие операции:

- построение аналитической модели наблюдаемого гравитационного поля с использованием сеточных эквивалентных распределений точечных масс при точности аппроксимации, сопоставимой с погрешностью вычисления аномалий Буге;
- визуальное выделение фрагмента поля Δg , содержащего моногеничную аномалию, и построение контура аномальной области \mathfrak{S} ;
- расчет суммарной массы M и горизонтальных координат x_u, y_u центра тяжести объекта по параметрам аппроксимационной конструкции с использованием выражений: $M = \iint_{\mathfrak{S}} dm$; $x_u = \iint_{\mathfrak{S}} x dm / M$; $y_u = \iint_{\mathfrak{S}} y dm / M$;

- внешний цикл интегрирования (по подобластям $S_i, i = 1, 2, \dots, N$) включает в себя определение пределов i -ой подобласти интегрирования S_i , восстановление вторых горизонтальных производных гравитационного потенциала V_{xz}, V_{yz} путем решения прямой задачи от аппроксимационной конструкции с применением соответствующих операторов L в (2.2) на горизонтальной плоскости $z=const$ в P равномерно распределенных в пределах S_i точках, вычисление двойных интегралов $J_i^1 = \iint_{S_i} |V_{xz}| dx dy$, $J_i^2 = \iint_{S_i} |V_{yz}| dx dy$, $J_i^3 = \iint_{S_i} V_{xz} x dx dy$, $J_i^4 = \iint_{S_i} V_{yz} y dx dy$ методом Монте-Карло;

- внутренний цикл (по точкам задания поля P) сводится к оценке точности расчета интегралов Δ_i , по достижении пороговой величины которой $\Delta_i \leq \Delta_{\min}$ происходит переход к подобласти интегрирования более высокого порядка S_{i+1} , в противном случае – число точек выборки P увеличивается путем генерации новых псевдослучайных значений координат с определением значений поля в этих точках;

- вычисление полных значений интегралов $J^k = \sum_{i=1}^N J_i^k$, $k = 1, 2, \dots, 4$ и расчет вертикальной координаты Z_u (глубины) центра масс: $Z_u = \frac{2}{\pi} M / J^1$; $Z_u = \frac{2}{\pi} M / J^2$;
 $Z_u = -\frac{2}{\pi} J^3 / J^1$; $Z_u = -\frac{2}{\pi} J^4 / J^2$.

Алгоритм разработан и реализован при непосредственном участии автора в виде программы INTEGRAL и протестирован на модельных и реальных примерах. Результаты тестов показали, что интегральный метод решения обратных задач дает достаточно устойчивые и приемлемые для практики оценки параметров аномалиеобразующих объектов и имеет определенные преимущества перед традиционно применяющимися методами экспресс-интерпретации геопотенциальных полей.

2.5. Фрактальный подход к аппроксимации потенциальных геофизических полей

Проблема размерности интерпретационных задач в настоящее время остается по-прежнему актуальной. Мощности современных компьютеров позволяют обрабатывать значительные по объему массивы данных. Однако наряду с ростом производительности ЭВМ, казалось бы, пропорциональным увеличению количества информации, растет и уровень сложности, и число самих задач большой и сверхбольшой размерности в рамках одного этапа исследований. С этой точки зрения целесообразно минимизировать

количество источников в процессе автоматизированного подбора параметров модели, сохранив необходимую точность аппроксимации поля.

Известно, что пространственное распределение аномалий геопотенциальных полей обладает приближенной масштабной инвариантностью. С этих позиций потенциальные геофизические поля являются мультифракталами (Ю.И.Блох, 2004; А.А.Никитин, 2006), так как основным свойством мультифрактальных объектов является самоподобие (скейлинг) их морфоструктурных элементов, независимое от масштаба рассмотрения. Изучая морфологию наблюдаемого поля на различных масштабах приближения, можно адаптировать геометрию расположения источников в эквивалентной модели к особенностям аппроксимируемого поля, что приведет к существенному снижению вычислительных затрат.

Применение разноуровневых аппроксимаций имеет разумное физико-геологическое обоснование, когда влиянием сравнительно небольшого числа глубинных источников аппроксимируется низкочастотная (региональная) составляющая наблюдаемого поля, а влиянием приповерхностных – высокочастотная (локальная) компонента. Поскольку на практике распределение локальной составляющей поля носит крайне неравномерный характер, то и количество приповерхностных аппроксимирующих элементов модели в большинстве случаев небольшое, а их местоположение определяется соответствующими особенностями морфологии поля.

На основе данного подхода автором разработан и реализован в виде программы QTree алгоритм иерархических истокообразных аппроксимаций, базирующийся на построении квадродеревьев – метод **квадродерева**.

2.6. Истокообразная аппроксимация геопотенциальных полей методом квадродерева

Рассмотрим алгоритм на примере аппроксимации наблюдаемого поля силы тяжести. В новом подходе квадродерево реализует процедуру поиска геометрии элементарных источников в модели, наиболее адекватной особенностям наблюдаемых полей. В качестве элементарных источников служат точечные массы, истокообразные функции которых имеют вид:

$$g(\xi, \eta, \zeta) = \frac{\zeta - h}{\left((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - h)^2 \right)^{3/2}}, \quad (2.3)$$

что позволяет применять в последующем довольно простые операторы преобразований L в выражении (2.2) в целях получения различных трансформант поля.

В процессе построения модели происходит декомпозиция сложной вычислительной задачи на совокупность подзадач меньшего размера (рис.2.1):

- 1) Первоначально область задания поля делится на 4 или 16 квадратов (ранговых блоков) S_1 с длиной стороны l_1 . В плане источники располагаются в центрах квадратов на глубине $l_i \leq h_i \leq 2l_i$ от поверхности наблюдений ($i=1, 2, \dots, q$ – уровень квадродерева), расстояние между узлами новой сети $\Delta x_1 = l_1$. За величину поля в квадрате принимается среднее арифметическое U_{cp} всех значений поля в пределах каждой ранговой области S_1 .
- 2) Выбор “пороговых значений” δ определяет расположение источников на каждом уровне. Условием необходимости установки источника в каждой конкретной ячейке уровня становится выполнение неравенства $U_{cp} \geq \delta$. В случае, когда значение поля

U_{cp} в квадрате меньше порога отсечения δ , либо полностью скомпенсировано полем остальных источников, ранговая область характеризуется отсутствием точечной массы.

- 3) Задача аппроксимации поля на каждом отдельном этапе ее декомпозиции сводится к решению СЛАУ вида (2.1) относительно вектора неизвестных “масс” источников и с проверкой условия наличия или отсутствия их в каждой ранговой области.
- 4) Объектом аппроксимации на следующем этапе является разность наблюдаемого и модельного полей, вычисленная в узлах исходной сети. Уточнение модели поля производится путем диадного разбиения каждого рангового блока S_1 на 4 подобласти S_2 меньшего размера $l_2=0,5l_1$, решением соответствующей СЛАУ и проверкой необходимости установки точечной массы в каждой ячейке квадродерева S_2 на глубине $h_2 = 0.5h_1$.

Построение модели завершается в следующих случаях:

- а) если достигнута максимальная глубина квадродерева q , то есть шаг сети наиболее высокого порядка $\Delta x_q=l_q$ равен шагу исходной матрицы поля $U_{набл}$;
- б) когда отклонение модельного поля (суммарного от всех уровней размещения источников) от измеренного в точках исходной сети не превысит необходимой погрешности аппроксимации ε .

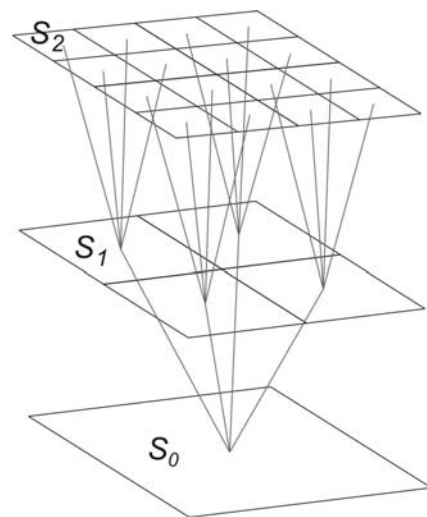


Рис.2.1. Разбиение на ранговые области методом квадродерева

Контроль аппроксимации производится в одной из двух метрик (Евклида, Чебышева), выбор которой определяется до начала работы алгоритма. По мнению большинства исследователей, среднеквадратическая (Евклидова) метрика менее подвержена влиянию случайных помех, чем метрика Чебышева, что делает ее применение более предпочтительным. Для повышения скорости нахождения решений СЛАУ на каждом уровне q применяется метод Зейделя, а для уровней, число ранговых блоков которых превышает 10^3 , итерации выполняются с выбором окна влияния каждого элемента модели.

Поле G от совокупности элементарных тел с массой $a=1$ в каждой точке j множества M можно представить как $G = g_1 + g_2 + \dots + g_n$, где g_i – гравитационный эффект i -ой точечной массы, $i=1, 2, \dots, n$. Влияние отдельно взятого источника наиболее велико в пределах некоторой локальной окрестности радиуса r относительно его центра. Следовательно, характерной особенностью матрицы $\mathbf{G} = \{g_{ij}\}$ (где $1 \leq j \leq m$ – точки задания поля $\mathbf{U} = \{u_j\}$), является резкое преобладание главной диагонали и уменьшение значений коэффициентов по мере удаления от нее. Причем данная закономерность наблюдается независимо от характера поверхности наблюдений (Долгаль А.С., Бычков С.Г., Антипин В.В., 2004).

Исходя из этого, можно выделить достаточно узкую ленточную часть $\check{\mathbf{G}}$ шириной $2r + 1$ вдоль главной диагонали матрицы \mathbf{G} и положить $g_{ij}=0$ при $|i - j| > r$. Значение r можно подобрать таким образом, что общий вклад не учитываемых источников не превысит 1-3% от амплитуды поля.

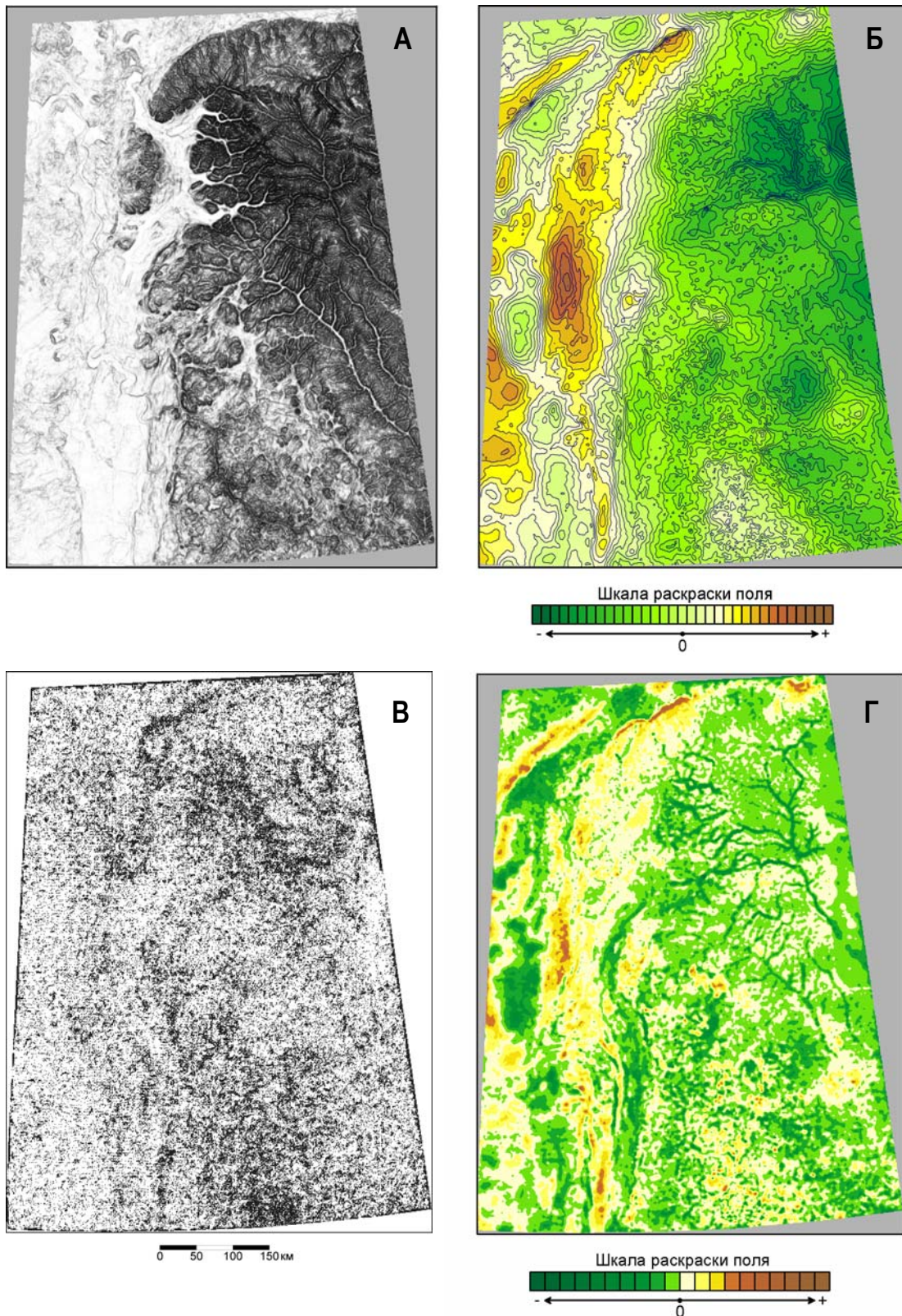


Рис.2.2. Построение аналитической модели поля силы тяжести методом квадродерева. Северо-Сибирская никеленосная провинция
 А – рельеф Земли; Б – наблюдаемое поле силы тяжести; В – распределение точечных масс в многоуровневой эквивалентной модели на ближайшем к поверхности уровне; Г – искажения поля силы тяжести, обусловленные “эффектом разности высотности”

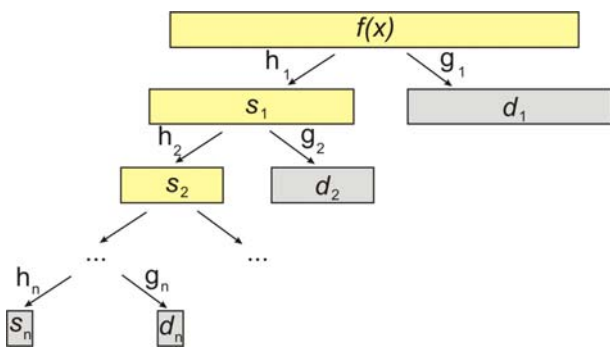


Рис. 3.1. Нуль-дерево быстрого вейвлет-преобразования (желтым цветом показаны исходная функция $f(x)$ и скейлинг-коэффициенты s_1, s_2, \dots, s_{n-1} , серым – вейвлет-коэффициенты d_1, d_2, \dots, d_n на каждом уровне разложения и аппроксимирующий скейлинг s_n) (Долгаль А.С., Пугин А.В., 2006)

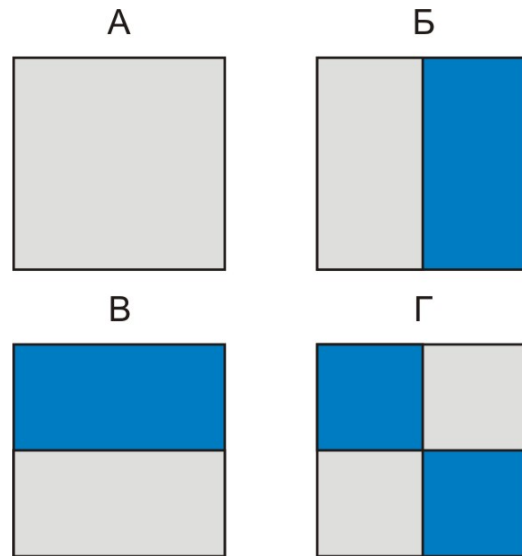


Рис. 3.2. Двумерные базисные функции Хаара: А – скейлинг-функция $\varphi_{k,l}^J$, вейвлеты: Б – $\psi\varphi_{k,l}^J$, В – $\varphi\psi_{k,l}^J$, Г – $\psi\psi_{k,l}^J$ (участки серого цвета отвечают значениям функций +1, синего цвета – значениям -1) (Долгаль А.С., Пугин А.В., 2006)

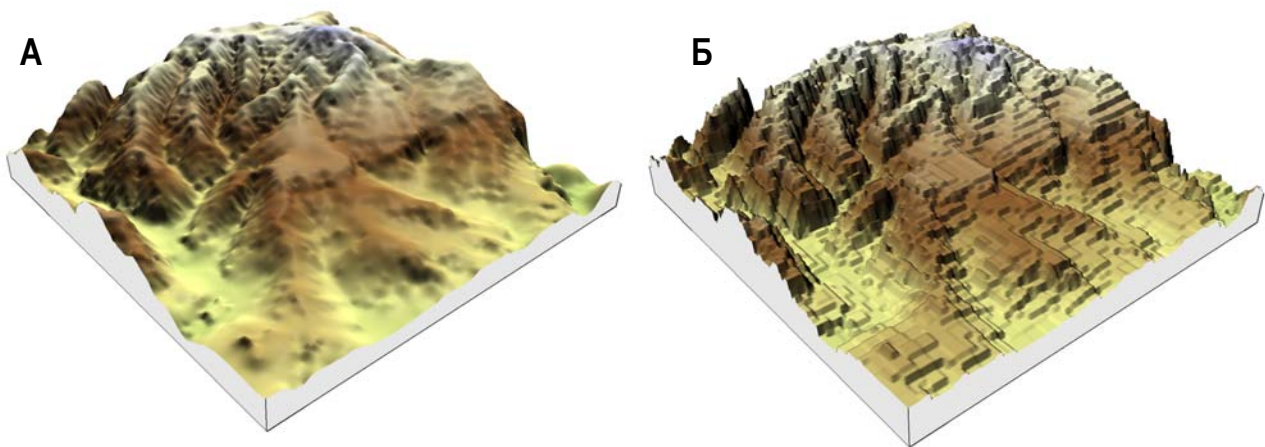


Рис.3.3. Кусочно-призматическая аппроксимация геологической поверхности с использованием быстрого вейвлет-преобразования

А – исходная цифровая модель рельефа местности (ЦММ); Б – генерализованная ЦММ на основе БВП с двумерными базисными функциями Хаара

Таблица 1

Параметры, характеризующие аппроксимационный процесс с использованием классического метода (программа APGRV) и метода квадродерева (программа QTree)

Исходные данные и характеристики процесса	QTree	APGRV
Поле силы тяжести (число значений)	387 779	387 779
Диапазон значений поля (мГал)	-97.49 ... +50.17	-97.49 ... +50.17
Цифровая модель рельефа (число значений)	387 779	387 779
Перепад высот рельефа (метров)	0 ... 1640	0 ... 1640
Общее число итераций	181 (7 – на последнем уровне)	25
Общее время процесса (часов)	45	115
Число источников в модели	230 385	387 779
Соотношение числа источников к числу значений поля (в процентах)	59,41	100
Среднеквадратическое расхождение полей (мГал)	0,031	0,030
Максимальное (по модулю) расхождение полей (мГал)	0,462	0,157
Вычисление трансформант поля		
Одной трансформанты	≈1,2 часа	≈2-2,3 часа
30 трансформант	≈36 часов	≥ 60 часов

Примечание: в обоих случаях глубина залегания элементарных источников H (измеряемая до поверхности наблюдений) определялась соотношением $H = 1.5 \Delta x$, где Δx – расстояние между узлами исходной матрицы поля.

Характеристики компьютера: Pentium IV с тактовой частотой процессора 3 ГГц и оперативной памятью 1Гбайт

Эта особенность позволяет при расчете массы каждого источника ограничиться выборкой, состоящей из k наиболее “влиятельных соседей” в пределах заданного окна, а не использовать всю совокупность элементов сеточной модели, что в зависимости от величины r , снижает время каждой итерации в десятки раз.

Данный метод опробован на модельных и практических примерах. Результаты в таблице 1 и рисунок 2.2 наглядно иллюстрируют эффективность предложенного алгоритма. Матрица наблюдаемого поля силы тяжести на территории Северо-Сибирской никеленой провинции содержит 387 779 значений. Перепад высотных отметок рельефа Земли составляет более 1.6 км. Многоуровневая эквивалентная модель источников – результат применения программы QTree, состоит из 230 385 точечных масс, что на 40% меньше, чем при использовании классического метода (программа APGRV, автор – Долгаль А.С.), где число источников равно числу точек задания поля, при высокой точности аппроксимации ($\varepsilon = \pm 0.03 \text{ мГал}$). Соответственно увеличилась скорость решения: в 2.5 раза на этапе построения аппроксимационной конструкции за счет декомпозиции задачи решения СЛАУ большой размерности на ряд подзадач значительно меньшего объема; более чем в 1.5 раза при вычислении каждой из трансформант поля за счет использования меньшего числа элементарных тел.

Использование меньшего объема памяти ЭВМ, выделяемой для хранения параметров модели по сравнению с матрицей исходных значений поля, представляет интерес с точки зрения геоинформационных систем (ГИС). Модуль QTree, реализованный автором на основе данного алгоритма, интегрирован в качестве приложения в локальную информационно-аналитическую систему, разработанную коллективом сотрудников лаборатории геопотенциальных полей Горного института, и эффективно используется при обработке и хранении результатов полевых гравиметрических работ.

3. Применение вейвлет-преобразований при моделировании геофизических потенциальных полей и их источников

3.1. Основные теоретические сведения из области вейвлет-преобразований

Под термином “вейвлет” понимают осциллирующую относительно оси абсцисс функцию, имеющую компактный носитель (область определения), обладающую локальностью в пространстве и нулевой полной энергией.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (3.1)$$

Характерным признаком вейвлет-базиса является самоподобие относительно масштаба. Все вейвлеты одного семейства имеют один и тот же вид, так как получены из одного “материнского вейвлета” посредством масштабных преобразований и сдвигов вдоль координатной оси. Вейвлет-преобразование является обратимым, то есть, возможен синтез сигнала из коэффициентов вейвлет-разложения путем обратного вейвлет-преобразования. Точная реконструкция сигнала из спектра вейвлет-коэффициентов возможна только при выполнении условий ортонормированности и полноты системы базисных функций преобразования.

Существует два типа вейвлет-преобразований в классическом виде, реализующих различные вычислительные схемы и принципы представления данных – непрерывное (континуальное) вейвлет-преобразование (НВП) и дискретное (ДВП) или быстрое вейв-

лет-преобразование (БВП). В математической литературе общепринято обозначение вейвлетов греческой буквой ψ , а масштабирующих функций φ (при БВП).

Непрерывное вейвлет-преобразование. Основная идея НВП заключается в представлении дискретной функции $f(x)$, заданной в области R , в виде следующего ряда:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N c_i \psi_i(x), \quad (3.2)$$

где в качестве базисной системы функций $\{\psi_i(x) : i = 1, 2, \dots, N\}$ используются перемещаемые по оси абсцисс x и масштабируемые (сжатые или растянутые вдоль оси x) однотипные функции с компактным носителем. В случае двумерного НВП базисная функция формируется путем тензорного произведения ее одномерных аналогов. Результат преобразования отображается в пространстве вейвлет-коэффициентов $c_{x,s} \in W(x, S)$, где S – масштаб, определяющий размеры носителя вейвлета в области пространственных координат или диапазон Фурье-частот в спектральной области.

Дискретное (быстрое) вейвлет-преобразование представляет собой многократно повторяющуюся последовательность операций по разложению сигнала $f(x)$ на аппроксимирующую и детализирующую составляющие. Принцип БВП заключается в том, что для создания «грубого образа» сигнала $f(x)$ служит скейлинг-функция (масштабирующая функция) $\varphi(x)$: $\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2x - k)$, где k – целые числа; а «уточнение» этого об-

раза происходит с помощью вейвлет-функции $\psi(x)$: $\psi(x) = \sqrt{2} \sum_k g_k \psi(2x - k)$. Вейвлет- и скейлинг-функции образуют ортонормированную систему базисных функций БВП.

Рекурсивное использование процедуры свертки сигнала с коэффициентами фильтров h_k и g_k обычно происходит с уменьшением количества отсчетов в 2 раза при переходе от одного уровня («масштаба») J к другому $J+1$. Аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты определяются по итерационной формуле $s_k^{J+1} = \sum_m h_m s_{2k+m}^J$, детализирующие коэффициенты – по формуле $d_k^{J+1} = \sum_m g_m s_{2k+m}^J$, при этом вся информация о сигнале $f(x)$ сохраняется в наборе коэффициентов $s_k^{J_n}$ и $\sum_{J=0}^{J_n} d_k^J$ (рис.3.1).

Двумерное БВП выполняется двумя способами:

- стандартная процедура – совокупность одномерных преобразований по столбцам и строками матрицы задания исходного параметра;
- нестандартная процедура – свертка сигнала с 4 двумерными базисными функциями, полученными путем тензорного умножения материнского вейвлета и масштабирующей функции по направлениям x и y .

Таким образом, при нестандартном двумерном БВП используется одна скейлинг-функция $\varphi_{k,l}^{J_n} = 2^{J_n} \varphi(2^{J_n} x - k, 2^{J_n} y - l)$ и три базисных вейвлета (рис.3.2):

1. $\varphi \psi_{k,l}^J = 2^J \varphi \psi(2^J x - k, 2^J y - l)$,
2. $\psi \varphi_{k,l}^J = 2^J \psi \varphi(2^J x - k, 2^J y - l)$,
3. $\psi \psi_{k,l}^J = 2^J \psi(x) \psi(y)(2^J x - k, 2^J y - l)$.

Пирамидальная иерархическая структура коэффициентов БВП получила название ниспадающего нуля-дерева вейвлетов. Эффективные алгоритмы “сжатия” информации с использованием нуля-деревьев базируются на преобразовании исходного сигнала в совокупность вейвлет-коэффициентов, большая часть из которых незначительны по амплитуде и, следовательно, может быть удалена из первоначального набора без ощутимых потерь качества при восстановлении сигнала. Оценку погрешности восстановления исходного сигнала при N_0 количестве отброшенных коэффициентов можно провести по формуле: $\Delta = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_0} d_{\epsilon}^2 / N\right)}$, где $d_{\epsilon} < d_{\text{порог}}$ – амплитуда отброшенных вейвлет-коэффициентов, значение которых ниже некоторого порогового $d_{\text{порог}}$, а N – общее число вейвлет-коэффициентов.

Кроме того, разрежение матрицы вейвлет-коэффициентов позволяет значительно снизить вычислительные затраты при решении задач большой размерности, если решение проводить непосредственно в вейвлет-пространстве.

3.2. Разделение потенциального поля на составляющие, обусловленные разноглубинными источниками, путем построения вейвлет-спектра

Одним из приложений вейвлетов в области разведочной геофизики является анализ наблюдаемого поля. Данные профильных или площадных гравиметрических и магнитометрических наблюдений представляют собой дискретно заданную в пространстве гармоническую функцию, осложненную помехами различного генезиса – то есть, неоднородный по частотному составу сигнал. Для анализа данных измерений использовался дискретизированный аналог НВП на основе вейвлета DOG2, описываемого аналитически выражением вида $\psi_0(x) = (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}}$, с изменением масштаба в зависимости от степени двойки:

$$s_l = s_0 2^{l\Delta s}, \quad l = 0, \dots, L, \quad L = \frac{\log_2\left(\frac{N \Delta x}{s_0}\right)}{\Delta s}. \quad (3.3)$$

Здесь s_0 – масштаб наилучшего разрешения в области пространственных координат, s_l – максимально допустимый масштаб, L – число масштабов, используемых при расчете вейвлетного спектра. Выбор величины Δs определяется шириной $\Delta \hat{\psi}$ Фурье-образа вейвлета $\hat{\psi}$: при $\Delta s > \Delta \hat{\psi}$ разрешение по масштабам будет ухудшаться, поскольку часть масштабов выпадет из рассмотрения, а $\Delta s \ll \Delta \hat{\psi}$ вследствие ограниченности вейвлетной функции по ширине не приведет к улучшению разрешения в координатном пространстве, но увеличит вычислительные затраты и внесет большое количество избыточной информации в результат преобразования.

Взаимосвязь вейвлет-спектра с наблюдаемыми значениями гравитационного поля на основе преобразования с вейвлетом известной формы позволяет рассматривать спектр вейвлет-коэффициентов W , как некоторое эквивалентное непрерывное распределение квазиплотности в нижнем полупространстве. Ось масштабов, изначально направленная вверх, пересчитывается в шкалу эффективных глубин относительно параметров сингулярных источников. Форма представления в виде

псевдоразреза является наиболее удобной при интерпретации спектра W , однако эффективная глубина имеет смысл меры, позволяющей проводить ранжирование аномалий, но ни в коем случае не должна вводить в заблуждение об ее полном соответствии истинной глубине источников реальных полей.

На практике гравитационное поле отражает влияние множества геологических объектов разного ранга, и суперпозицию полей аномалиеобразующих объектов учесть, зачастую, не представляется возможным. Поэтому любые выводы об оценках глубин их залегания, сделанные только на основе спектрального анализа наблюдаемых полей, остаются весьма условными. В работе рассматриваются модельные и практические примеры применения НВП для анализа геопотенциальных полей. Подобная интерпретация на основе эффективных параметров сингулярных источников дает возможность сформировать некоторое начальное представление об аномалиеобразующих объектах.

3.3. Построение моделей геологических поверхностей методом кратномасштабного анализа

Аппроксимация реального распределения физических неоднородностей геологической среды набором тел правильной геометрической формы является необходимым этапом при аналитическом решении прямой задачи гравиразведки (В.И.Гольдшмидт, 1984). Одна из широко используемых аппроксимационных технологий базируется на плотном заполнении моделируемых геологических объектов прямоугольными призмами, которые соприкасаются боковыми гранями, но не пересекаются друг с другом.

При решении прямых задач большой размерности крайне важно оптимизировать количество элементов аппроксимационной конструкции при сохранении требуемой точности ε описания геологических границ, то есть добиться выполнения условия

$$\left\| V - \sum_{i=1}^N \tilde{V}_i \right\|_{L_2} \leq \varepsilon, \text{ где } V - \text{объем моделируемого геологического объекта, } \tilde{V}_i - \text{объем } i\text{-ой}$$

призмы, $i = 1, 2, \dots, N$; при минимальном количестве призм N (Г.Я.Голиздра, 1977). Для этой цели предлагается использовать быстрое вейвлет-преобразование.

Двумерное БВП с базисными функциями Хаара можно рассматривать как кусочно-призматическое представление некоторой геологической границы (например – структурной поверхности, заданной в виде матрицы глубин $\mathbf{H} = \{h_{ij}\}$ в узлах равномерной сети точек). Количество прямоугольных призм при фиксированной точности ε описания поверхности зависит от величины вейвлет-коэффициентов $d_{k,l}^J$, большинство которых обычно оказываются пренебрежительно малыми по модулю.

Кусочно-призматическая аппроксимация геологических поверхностей на основе быстрого вейвлет-преобразования может успешно применяться для построения моделей геологической среды в случае решения прямой задачи на основе сведений о совокупности структурных границ в пределах изучаемой территории. Создание генерализованной (адаптивной) модели, каждый слой которой описывается набором разновеликих прямоугольных призм, позволяет значительно снизить вычислительные затраты.

Рассмотрим пример практического использования алгоритма БВП для разряжения сети высот цифровой модели местности (ЦММ). Матрица высот рельефа местности для

одной из нефтеперспективных площадей Западного Урала имеет размер 256 строк×256 столбцов; перепад высот составляет 122 метра при среднем значении 152 метра (рис.3.3). В результате применения БВП в базисе функций Хаара поверхность может быть восстановлена с использованием 6,3% исходной информации (то есть для ее описания достаточно не 256×256=65536, а всего 4150 призм) со среднеквадратической погрешностью ±2,3 метра. Соответственно, более чем в 10 раз повышается скорость решения прямой задачи гравиразведки от генерализованной ЦММ, сохраняющей все основные особенности рельефа.

Наиболее целесообразно выполнять решение прямой задачи от адаптивной модели среды непосредственно в вейвлет-области. После генерализации модели пространство вейвлет-коэффициентов становится в значительной мере разреженным (содержит большое количество нулевых коэффициентов), но сохраняет равномерность упаковки на каждом масштабе разложения в виду постоянной ширины носителя вейвлета на каждом J -ом уровне. Коэффициенты вейвлет-преобразования $d_{k,l}^J$ определяют высоту каждой призмы, входящей в состав вейвлет-функции Хаара, а главный скейлинг $s_{k,l}^{J_n}$ - среднюю глубину залегания границы. Модельное поле можно представить в виде суперпозиции полей от каждого уровня вейвлет-разложения.

Весьма высокое сокращение количества вычислительных операций будет обеспечиваться при включении БВП в алгоритмы решения обратной задачи методом автоматизированного подбора на каждой итерации. Представляется вполне реальным обеспечить за счет уменьшения размерности геологической модели сокращение времени вычислений на каждой итерации не менее чем в 3÷4 раза (А.С.Долгаль, 2005).

3.4. Адаптивный метод построения аналитических моделей потенциальных полей с использованием нуль-дерева вейвлетов

Вейвлет-преобразование характеризуется иерархически-структурированным и самоподобным базисом анализирующих функций и отлично приспособлено для анализа фрактальных и мультифрактальных множеств (И.М.Дремин, О.В.Иванов, В.А.Нечитайло, 2001). Применяя БВП можно выполнить декомпозицию сложной вычислительной задачи поиска параметров эквивалентных источников на последовательное решение нескольких СЛАУ сравнительно небольшой размерности, подобно методу квадродерева.

В этом случае этапу аппроксимации эквивалентными источниками предшествует дискретное вейвлет-преобразование поля силы тяжести $\{\Delta g_{ij}\}$, $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq p$, с двумерными нестандартными базисными функциями Хаара. Определяется пороговое значение δ , обеспечивающее необходимую точность восстановления поля ε . Затем на низшем уровне нуль-дерева $J = J_n$ проводится истокообразная аппроксимация поля Δg^{J_n} , полученного путем восстановления из соответствующих вейвлет-коэффициентов:

$$\Delta g^{J_n}(x, y) = \sum_k \sum_l s_{k,l}^{J_n} \varphi_{k,l}^{J_n} + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J_n,1} \psi \varphi_{k,l}^{J_n} + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J_n,2} \varphi \psi_{k,l}^{J_n} + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J_n,3} \psi \psi_{k,l}^{J_n}. \quad (3.4)$$

Решается СЛАУ вида (2.1) относительно известных геометрических параметров источников, которые размещаются под точками задания поля, где выполняется пороговое условие $|\Delta g^{J_n}| \geq \delta$, либо $|\Delta g^{J_n} - \Delta g_{\text{мод}}^{J_n}| \geq \delta$. Глубина расположения источников определяется шагом сети данного уровня $\Delta x^J \leq h^J \leq 2\Delta x^J$.

На следующих уровнях $J < J_n$ аналогичным образом аппроксимируются детализирующие составляющие поля, которые определяются как:

$$\Delta g^{J-1}(x, y) = \left[\Delta g^J(x, y) + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J-1,1} \psi \varphi_{k,l}^{J-1} + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J-1,2} \varphi \psi_{k,l}^{J-1} + \sum_k \sum_l d_{k,l}^{J-1,3} \psi \psi_{k,l}^{J-1} \right] - \Delta g_{\text{мод}}^J, \quad (3.5)$$

Данный прием позволяет избежать накопления погрешностей, обусловленных собственно истокообразной аппроксимацией на каждом масштабе разложения. Нижние (глубинные) уровни нуль-дерева характеризуются редкими сетями расположения источников, и определяются сравнительно небольшим числом вейвлет-коэффициентов. Как правило, вследствие аппроксимации региональных особенностей морфологии поля, нижние уровни оказываются наиболее равномерно заполненными источниками. По мере приближения источников к поверхности наблюдений сеть их сгущается, однако распределение элементарных тел становится крайне неравномерным, вследствие их расположения вблизи ярко выраженных локальных особенностей поля. Метод реализован алгоритмически и программно, успешно апробирован на модельных и практических данных и показал высокую эффективность в плане снижения вычислительных затрат.

4. Примеры решения практических задач с помощью созданных компьютерных технологий

Разработанные алгоритмы и технологии применялись для интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки с целью локализации нефтеперспективных площадей и объектов на территории Юрюзано-Сылвенской депрессии (в пределах Пермского края) и для прогнозирования богатых платино-медно-никелевых руд в Северо-Сибирской никеленосной провинции (включая Норильский район).

4.1. Юрюзано-Сылвенская депрессия (Пермский край)

Применение программы INTEGRAL, реализующей метод определения интегральных характеристик аномалиеобразующих объектов, позволило разбраковать аномалии гравитационного и магнитного полей, связанные с глубинными магматическими телами в фундаменте и с зонами уплотнения (разуплотнения) горных пород в осадочном чехле. С помощью программы QTree построена многоуровневая аппроксимационная конструкция, характеризующаяся сравнительно небольшим числом точечных масс (27358 источников при 51189 исходных точек задания поля) и высокой точностью приближения наблюдаемого поля силы тяжести ($\varepsilon = \pm 0.04 \text{ мГал}$). С использованием данной конструкции вычислены трансформанты поля, отображающие основные особенности геологического строения территории. Результаты интерпретации учитывались при создании общей модели геологического строения Юрюзано-Сылвенской депрессии по комплексу геофизических методов и выделении участков, перспективных на обнаружение месторождений углеводородов.

4.2. Северо-Сибирская никеленосная провинция (Норильский район)

Трансформанты гравитационного и магнитного полей, вычисленные с помощью новой модификации системы ВЕКТОР, подвергались эмпирической (визуальной) интер-

претации и формализованному (вероятностно-статистическому) анализу с использованием компьютерной технологии MultAlt (разработка ФГУНПП «Геологоразведка», Санкт-Петербург, авторы – Калинин Д.Ф., Калинина Т.Б.). Применение метода квадродерева (программа QTee) позволило существенно снизить вычислительные затраты при построении аналитической модели гравитационного поля и вычислении трансформант на основе истокообразных аппроксимаций относительно классического способа, реализованного в программе APGRV (автор – А.С.Долгаль). На основе вейвлет-анализа геопотенциальных полей сделаны выводы о глубинном геологическом строении территории Северо-Сибирской никеленосной провинции. В результате интерпретации с использованием приведенных компьютерных технологий на основе совокупности геолого-геофизических признаков даны прогнозные оценки и выделен ряд районов, перспективных на обнаружение месторождений платино-медно-никелевых руд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены теоретические и практические разработки, позволяющие повысить эффективность геологоразведочных исследований при поисках месторождений полезных ископаемых. Представленные в диссертации методы и алгоритмы базируются на развитии идей истокообразных аппроксимаций, вейвлет-анализа данных и принципах геометрии фрактальных множеств, а также на их совместном использовании.

Основные научные и практические результаты сводятся к следующему:

1. Исследованы возможности применения вейвлетов для анализа геопотенциальных полей. Разработан алгоритм построения моделей геологических поверхностей на основе вейвлет-аппроксимаций с двумерными базисными функциями Хаара, позволяющий выполнять решение прямой задачи гравиразведки от совокупности аппроксимирующих тел непосредственно в вейвлет-области.
2. Исследованы вопросы, связанные с искажающим воздействием разновысотности точек измерений на результаты интерпретации геопотенциальных полей.
3. Представлен алгоритм определения интегральных характеристик источников гравитационного поля и новая модификация компьютерной технологии векторного сканирования, основанные на развитии идей В.И.Аронова к аппроксимации внешних элементов геопотенциальных полей системой истокообразных функций – полей элементарных источников.
4. Предложен фрактальный подход к построению аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей. Данный подход реализован в алгоритме построения многоуровневых (иерархических) аппроксимаций геопотенциальных полей методом квадродерева, в основу которого положено совместное использование идеи истокообразных аппроксимаций и принципов фрактальной геометрии.
5. На основе фрактального подхода предложен метод и адаптивный алгоритм построения аналитических моделей геопотенциальных полей, базирующийся на создании многоуровневых аппроксимаций методом кратномасштабного вейвлет-анализа данных.
6. Предлагаемые алгоритмы и технологии апробированы на модельных и практических данных и показали высокую эффективность как в плане повышения информативности геофизических исследований, так и в плане существенного снижения вычислительных затрат в процессе интерпретации геолого-геофизических данных.

Основные публикации по теме диссертации

1. Долгаль А.С., Пугин А.В. Построение аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей с учетом их фрактальной структуры. // Доклады Российской Академии наук. 2006. Т. 410. С. 1152-1155.
2. Долгаль А.С., Пугин А.В. Аналитические аппроксимации пространственного распределения геолого-геофизических параметров. // Геоинформатика. Киев, 2004. № 3. С. 33-40.
3. Долгаль А.С., Пугин А.В. Фрактальный подход к аналитической аппроксимации потенциальных геофизических полей. // Геоинформатика. Киев. 2006. № 2. С. 37-44.
4. Долгаль А.С., Пугин А.В. Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей, базирующиеся на фрактальном подходе. // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2006. № 1. Выпуск 7. С. 95-101.
5. Пугин А.В. Вейвлеты: новый инструмент интерпретации потенциальных полей. // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. 2004. № 3. С. 20-23.
6. Долгаль А.С., Пугин А.В. Иерархическое представление данных с применением вейвлетов при решении задач гравиметрии. // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. 2005. № 1. С. 21-25.
7. Пугин А.В. Оценка целесообразности приведения наблюдаемого гравитационного поля к горизонтальной плоскости. // Современные проблемы геофизики. Сборник материалов пятой Уральской молодежной научной школы по геофизике. – Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2004. С. 125-128.
8. Пугин А.В. Количественная оценка влияния криволинейности поверхности наблюдений при гравиметрической съемке. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной науч. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2004. С. 130-132.
9. Пугин А.В. Применение непрерывного вейвлетного анализа для представления профильных гравиметрических данных в масштабно-пространственной области. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 32^й сессии Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. С. 238-241.
10. Пугин А.В. Возможности применения вейвлетного анализа для интерпретации гравиметрических данных. // Шестая Уральская молодежная школа по геофизике: Сб. научн. материалов. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. С. 188-190.
11. Пугин А.В. Вейвлетный анализ данных и возможности его применения для интерпретации данных гравиразведки. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной науч. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2004 г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. С. 96-98.
12. Пугин А.В. Возможности применения вейвлетов для решения задач гравиметрии. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Материалы научно-практической конференции. – Пермь: ПГУ, 2005. С. 180-182.
13. Пугин А.В. Вейвлеты и возможности их применения для интерпретации гравиметрических данных. // Глубинное строение. Геодинамика. Мониторинг. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей. Материалы третьих научн. чтений памяти Ю.П.Булашевича. – Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2005. С. 133-134.

14. Пугин А.В. Вейвлеты и вейвлетный подход к решению интерпретационных задач гравиметрии. // Геофизика-2005. Пятая международная научно-практическая конференция-конкурс молодых ученых и специалистов. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург: СПбГУ, ВВМ, 2005. С. 236-238.
15. Пугин А.В. Аналитическая аппроксимация геопотенциального поля методом квадродерева. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33^й сессии Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. – Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С. 292-295.
16. Пугин А.В. Применение метода квадродерева для декомпозиции задачи истокообразной аппроксимации. // Современные проблемы геофизики. Сборник материалов седьмой Уральской молодежной научной школы по геофизике. – Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С. 122-124.
17. Пугин А.В. Развитие аппроксимационного подхода к интерпретации данных гравirazведки и магниторазведки на основе методов вейвлет-анализа и фрактального анализа. // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Материалы ежегодной науч. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2005 г. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2006. С. 194-196.
18. Симанов А.А., Пугин А.В. Применение современных геоинформационных технологий при хранении и обработке геолого-геофизических данных. // ГЕО-Сибирь-2006. Т. 1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч. 1: сб. материалов междунар. научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь-2006». – Новосибирск: СГГА, 2006. С. 159-163.
19. Пугин А.В. Построение эквивалентной модели источников с использованием принципов фрактальной геометрии. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Материалы научно-практической конференции. – Пермь: ПГУ, 2006. С. 203-204.
20. Симанов А.А., Пугин А.В. Новый подход к интерпретации и хранению геолого-геофизических данных на основе геоинформационных технологий и принципов фрактального анализа. // International Conference & Exhibition EAGE, EAGO and SEG. Saint Petersburg, 16-19 October 2006. B046 (electronic format).
21. Долгаль А.С., Калинин Д.Ф., Олешкевич О.И., Симонов О.Н., Пугин А.В. Прогнозирование богатого платино-медно-никелевого оруденения в северо-западной части Сибирской платформы с использованием современных компьютерных технологий. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34^й сессии Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. – М.: ИФЗ РАН, 2007. С. 100-102.
22. Пугин А.В. Иерархические истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 34^й сессии Междунар. семинара им. Д.Г.Успенского. – М.: ИФЗ РАН, 2007. С. 207-210.

Рекомендовано к изданию Ученым советом
Института геофизики УрО РАН

Подписано в печать 12.04.2007. Тираж 120 экз.
Формат 60 × 80 / 16. Усл. печ. л. 1,2

Отпечатано сектором научно-технической информации
Горного института УрО РАН
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а