

На правах рукописи



ВОРОШИЛОВ Владислав Алексеевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ**

Специальность 1.6.9 – «Геофизика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ФГАОУ ВО ПГНИУ)

Научный руководитель: **Костицын Владимир Ильич,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета

Официальные оппоненты: **Калинин Дмитрий Федорович,**
доктор технических наук, профессор кафедры геофизики Санкт-Петербургского горного университета

Иголкина Галина Валентиновна,
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории скважинной геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО ВГУ)

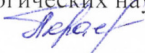
Защита диссертации состоится « 23 » марта 2023 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, ПГНИУ, ученому секретарю диссертационного совета Красильникову Павлу Анатольевичу.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 202__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
доцент



Красильников Павел Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Решение проблемы воспроизводства и расширения минерально-сырьевой базы России требует повышения эффективности геофизических исследований на всех этапах геологоразведочных работ.

Весьма актуальным является создание новых компьютерных технологий истолкования геофизических полей, позволяющих решать сложные геологические задачи. Применение современных технологий извлечения геологической информации из данных полевых наблюдений, в сочетании с резко возросшей производительностью современных электронных вычислительных машин, существенно расширяет возможности методов гравиразведки и магниторазведки.

В диссертации представлены программно-алгоритмические и методические разработки по совершенствованию построения аналитических моделей геопотенциальных полей с использованием истокообразной аппроксимации, вычислению трансформант по материалам разномасштабных геофизических съемок, а также новая модификация метода эмпирической модовой декомпозиции GEMD, предназначенная для анализа результатов измерения нестационарных геофизических полей, выполненных в 2D (профильном) и 3D (площадном) вариантах. Ее отличительной особенностью является использование кусочно-постоянных функций и эффектов эквивалентных источников при построении огибающих сигнала.

Степень разработанности. Исследованиями в области трансформаций геопотенциальных данных в разные годы занимались В. И. Аронов, В. М. Березкин, Ю. Д. Буланже, С. Г. Бычков, В. Б. Виноградов, В. Н. Глазнев, Ф. М. Гольцман, Г. Я. Голиздра, А. С. Долгаль, Г. В. Иголкина, Т. Б. Калинина, И. А. Керимов, В. И. Костицын, А. А. Никитин, А. В. Петров, А. В. Пугин, А. С. Розенберг, А. Ш. Файтельсон, А. В. Цирульский, D. Kahaner, S. Moler, S. Soler и другие исследователи.

Развитие аппроксимационного подхода к обработке данных геопотенциальных полей связано с именами известных ученых: В. И. Аронова, Е. Г. Булаха, В. М. Гордина., А. С. Долгалья, И. А. Керимова, А. К. Маловичко, П. С. Мартышко, В. М. Новоселицкого, А. В. Пугина, В. И. Старостенко, И. Э. Степановой, В. Н. Страхова, С. А. Тихоцкого, и других исследователей.

Вопросами использования эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD) занимались П. И. Балк, М. А. Бабуркина, А. В. Давыдов, В. А. Давыдов, А. С. Долгаль, Л. А. Долгих, Д. Б. Иванов, Д. Ф. Калинин, П. Н. Новикова, А. Н. Павлов,

А. Е. Филатова, Л. А. Христенко, Ю. А. Яновская, Н. Hassan, N. Huang, S. Shen и другие.

Основные результаты исследований названных ученых были учтены при выполнении работы над диссертацией.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является создание эффективных алгоритмов моделирования и трансформации данных гравиразведки и магниторазведки для более полного извлечения геологической информации из данных полевых измерений.

Основные задачи, решаемые в рамках диссертации:

1. Разработать и апробировать методику учета аномалеобразующих объектов, находящихся вне территории проведения крупномасштабных полевых геофизических работ при построении аналитических моделей геопотенциальных полей.

2. Провести обоснование эмпирической модовой декомпозиции с целью моделирования и трансформации двумерных и трехмерных данных гравиразведки и магниторазведки. Разработать программу, реализующую EMD-преобразование и апробировать алгоритм на модельных и реальных данных.

3. Разработать и обосновать алгоритм, позволяющий проводить трехмерное EMD-преобразование данных гравиразведки и магниторазведки.

4. Разработать программу, реализующую двумерное, псевдотрёхмерное и трехмерное EMD-преобразование.

Научная новизна:

1. Разработана методика учета объектов, расположенных за пределами площади съемки при аппроксимационном подходе построения трансформант.

2. Теоретически обосновано и апробировано использование эмпирической модовой декомпозиции для обработки и моделирования данных гравиразведки и магниторазведки.

3. Разработан алгоритм управляемой эмпирической модовой декомпозиции (Guided Empirical Mode Decomposition или GEMD), позволяющий проводить разложение данных площадных геофизических съемок на независимые эмпирические модовые составляющие.

4. Реализована программа, позволяющая проводить Guided Empirical Mode Decomposition двумерных и трехмерных геофизических данных.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Разработаны технологии высокоточного вычисления трансформант гравитационных и магнитных аномалий, совместного использования разномасштабных съемок в процессе истокообразной аппроксимации, а

также даны рекомендации по использованию EMD-разложения и его модификаций для анализа геофизических данных.

Разработанные алгоритмы позволяют существенно улучшить результаты выделения компонент геопотенциальных полей, связанных с различными геологическими объектами (или структурами) для их последующей геологической интерпретации. Применение созданной программы на основе эмпирической модовой декомпозиции позволяет извлекать из данных полевых измерений скрытую информацию о геологическом строении недр.

При использовании предложенных алгоритмов значительно повышается эффективность геофизических работ при решении картировочных, прогнозно-поисковых и инженерно-геологических задач. Разработанные автором методы и алгоритмы применялись для уточнения геологического строения соляной толщи Верхнекамского месторождения солей.

Методология и методы исследований. В состав исследований входило: изучение теоретических основ используемых методов; разработка алгоритмов; моделирование геофизических полей; написание программ в среде объектно-ориентированного программирования; выполнение вычислительных экспериментов; анализ результатов экспериментов; проведение полевых работ; качественная интерпретация материалов гравиразведки на Верхнекамском месторождении солей, участие в написании отчетов по результатам научных работ с использованием созданных компьютерных технологий.

В процессе проведения исследований автор использовал известные положения теории потенциала, математического анализа, линейной алгебры, вычислительной математики, физики, методологии интерпретации геофизических полей и программирования. В качестве конкретных методов были использованы: математическое моделирование, истокообразные аппроксимации, линейная фильтрация, эмпирическая модовая декомпозиция, спектральный анализ, вейвлет-анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика моделирования гравитационного и магнитного полей, основанная на истокообразной аппроксимации результатов разномасштабных геофизических съемок, позволяет повысить точность вычисления трансформант за счет минимизации искажений, проявляющихся в периферических частях территории исследований.

2. Применение эмпирической модовой декомпозиции, с использованием истокообразных аппроксимаций при построении огибающих сигнала, уменьшающих влияние краевых эффектов, позволяет решать широкий спектр задач моделирования и преобразования двумерных и трехмерных данных гравиразведки и магниторазведки.

3. Компьютерная технология трехмерной контролируемой эмпирической модовой декомпозиции, позволяющая приближённо выделять компоненты интерпретируемого поля, обусловленные разноглубинными геоплотностными (геомагнитными) границами и объектами.

Степень достоверности и апробация результатов.

Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, выполненных в период учебной и трудовой деятельности автора с 2017 по 2022 г. в организациях ФГАОУ ВО «ПГНИУ» и АО «ВНИИ Галургии».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена использованием современных методов обработки и интерпретации геолого-геофизической информации, согласованностью полученных результатов исследований с теоретическими положениями и опубликованными материалами других исследователей. Результаты, представленные в диссертации, прошли рецензирование и были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

Результаты, полученные при качественной интерпретации данных гравиметрической съемки на участке с аномалией типа «эрозионный врез» соотносятся с известным геологическим строением и приносят новую информацию о геологическом строении. Разработанные методики и технологии внедрены в процесс разведочных работ на Верхнекамском месторождении солей.

По теме диссертации опубликовано 19 статей, из них 3 статьи входят в перечень ВАК, 7 – в базу SCOPUS. Получен 1 патент и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные результаты исследований и положения диссертационной работы докладывались на научных конференциях и семинарах:

- XVIII Уральская молодежная научная школа по геофизике (2017);
- 46-я сессия Международного семинара имени Д.Г. Успенского «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных магнитных и электрических полей» (2019);
- 39-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (2019);
- XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Геология в развивающемся мире" (2020);

- 40-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Геология и полезные ископаемые Западного Урала» (2020);
- международная научно-практическая конференция «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (2020);
- 47-я сессия Международного семинара имени Д.Г. Успенского – В. Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей» (2020);
- 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020» (2020);
- 17-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2021» (2021);
- всероссийская научно-практическая конференция «Пермская система земного шара – 180 лет» (2021).

Благодарность от автора. Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Костицыну Владимиру Ильичу за поддержку и консультации на протяжении образовательной и научной деятельности в аспирантуре. Зарождением интереса к научной деятельности автор обязан к.г.-м.н. Новиковой Полине Николаевне и к.ф.-м.н. Пугину Алексею Витальевичу.

Большое влияние на взгляды автора оказало общение и научное сотрудничество с д.ф.-м.н., профессором Александром Сергеевичем Долгалем.

Глубокую признательность и благодарность автор выражает к.т.н. Жукову Александру Анатольевичу за неоценимую поддержку в проведении исследований.

Автор выражает благодарность за поддержку и помощь в работе над диссертацией, за создание прекрасной атмосферы и конструктивные замечания творческому коллективу АО «ВНИИ Галургии»: к.т.н. А. М. Пригаре, к.т.н. Р. И. Цареву, Д. С. Грибкову, А. В. Глухих.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Изложена на 115 страницах, включая 40 рисунков, 11 таблиц, 14 формул, список сокращений и условных обозначений, список использованной литературы из 85 наименований.

На величину гравитационных и магнитных аномалий в каждой из точек наблюдений оказывают влияние многочисленные геологические объекты, имеющие различную форму, залегающие на разных глубинах, петрофизические характеристики которых (плотность и намагниченность) изменяются в широком диапазоне. По этой причине аномальные поля

оказываются достаточно сложными, что не только затрудняет их геологическое истолкование, но во многих случаях мешает даже визуальному обнаружению аномалий от слабоконтрастных или глубоко залегающих объектов. В такой ситуации для проведения интерпретации целесообразно прибегнуть к разделению сложных полей на более простые компоненты, каждую из которых можно проанализировать отдельно, а затем, на основе всех полученных сведений, сформировать геоплотностную (или геомагнитную) модель изучаемого объема геологической среды. Эта идея, возникшая на ранних этапах развития прикладной геофизики, получила очень широкое распространение в практике интерпретации геопотенциальных полей.

При любом преобразовании экспериментальных данных (наблюденного поля) общее количество информации об источниках поля не может возрасти (строго говоря – убывает). Однако контрастное выявление тех или иных «порций» информации, связанных с определенными геологическими объектами, часто настолько важно, что теоретическая потеря информации не имеет значения. Таким образом, исходным материалом для качественной интерпретации данных геопотенциальных полей являются их трансформанты. Набор трансформант также может использоваться в качестве исходных данных для методов безэталонной классификации и распознавания образов. Процесс трансформации заключается в применении различных фильтров к наблюдаемым данным с целью выделения полезной информации и подавлению сигналов-помех. Сигнал, являющийся полезной информацией, определяется как аномалия от целевого геологического объекта.

Первое защищаемое положение. *Методика моделирования гравитационного и магнитного полей, основанная на истокообразной аппроксимации результатов разномасштабных съемок, позволяет повысить точность вычисления трансформант за счет минимизации искажений, проявляющихся в периферических частях территории исследований [2, 17, 18].*

В настоящее время созданы и успешно применяются на практике различные алгоритмы трансформации и интерполяции геопотенциальных полей, базирующиеся на использовании истокообразных функций (полей элементарных источников).

Для моделирования аномалий силы тяжести в прикладной геофизике используется истокообразная аппроксимация, которая базируется на приближении наблюдаемого поля U теоретическим полем U^* , созданным сеточным распределением Ω эквивалентных источников. Несомненные достоинства этого подхода – подавление помех негармонического характера и учет перепада высот точек измерений поля. Пространственное расположение эквивалентных источников является

априорно заданным и согласованным с сетью наблюдений. Для простейшей одноуровневой аппроксимационной конструкции, предложенной В.И. Ароновым, число источников равно числу точек наблюдений. Сам процесс аппроксимации сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$A\sigma = u, \quad (1)$$

где A – матрица коэффициентов, представляющих собой аномальные эффекты каждого;

σ – вектор неизвестных значений эффективной плотности элементарных источников;

u – вектор наблюдаемых значений гравитационного поля с аддитивно наложенной помехой.

На теоретических примерах было продемонстрировано, что увеличение глубин h аппроксимирующих масс повышает точность последующих пересчетов поля. Однако при этом повышается число обусловленности матрицы коэффициентов СЛАУ, поэтому обычно при расчетах соблюдается условие $\Delta x \leq h \leq 2\Delta x$, Δx – шаг сети наблюдений. Более 40 лет назад был предложен весьма эффективный подход, базирующийся на последовательном выделении разночастотных компонент поля при пошаговом изменении плотности нерегулярной сети исходных данных, который применялся при интерполяции системой гармонических функций. На каждом шаге устойчивость решения СЛАУ обеспечивалось выполнением условия $h/\Delta x_{min} \cong 1$, где Δx_{min} – минимальное расстояние между точками.

Сравним точность аппроксимации модельных данных при использовании одноуровневой и двухуровневой аппроксимационной конструкции. В случае одноуровневой аппроксимационной конструкции с глубиной источников равной 120 м диапазон изменения погрешности δT составляет от минус 10,1 нТл до плюс 11,1 нТл, а среднее значение 0,16 нТл, среднеквадратическое отклонение 1,68 нТл. При этом в пределах ~22 % площади разность исходного и восстановленного полей превышает по модулю 1 нТл, а вблизи ее рамок составляет более 10 нТл (рисунок 1). Такие "краевые эффекты", вероятно, связаны с дискретным характером данных о поле и ограниченными размерами области задания исходного поля S . Можно убедиться, что высокая точность ε аналитической аппроксимации исходного поля не гарантирует высокой точности его трансформации.

Для подавления краевых эффектов использована двухуровневая аппроксимационная конструкция, отвечающая соотношению $h_1/\Delta x_1 = h_2/\Delta x_2 = 1.2$, $\Delta x_2/\Delta x_1 = 5$ с последующей оценкой точности

получаемых результатов. Увеличение глубин источников приведет к более плавному уменьшению магнитного поля возле границы области S.

Восстановленное на высоте 500 м магнитное поле определялось двумя наборами элементарных источников, расположенных на конкордатных рельефу поверхностях с глубинами $h_1 = 120$ м (шаг сети $\Delta x_1 = 100$ м) и $h_2 = 600$ м (шаг сети $\Delta x_2 = 600$ м).

Значения разностного поля $\delta T = \Delta T(500) - [\Delta T_1^*(500) + \Delta T_2^*(500)]$ при двухуровневой аппроксимации лежат в диапазоне от минус 4,1 нТл до плюс 4,3 нТл, при среднем значении 0,10 нТл и среднеквадратическом отклонении 0,72 нТл. Пространственное расположение аномальных значений δT на периферии участка сохраняется, но величина этих искажений снижается примерно в 2,5 раза.

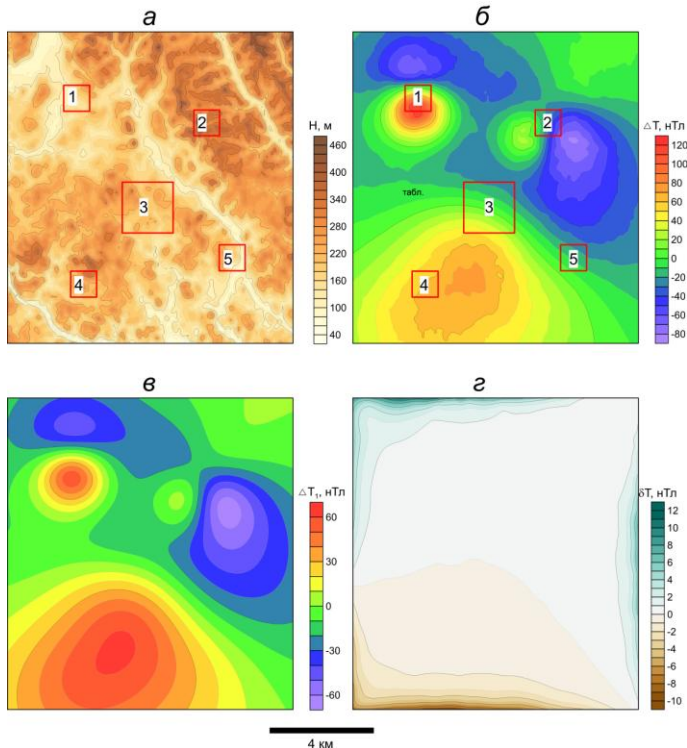


Рисунок 1 – Карты: а – изогипс поверхности S; б – изодинам магнитного поля ΔT ; в – изодинам магнитного поля $\Delta T(500)$, г – изодинам магнитного поля δT . Примечание: на карты а, б нанесены аномалиеобразующие призмы и их номера

Вполне возможно, что использование более сложных многоуровневых аппроксимационных конструкций (даже без их адаптации к морфологии поля) приведет к дополнительному снижению такого рода погрешностей. При этом затраты времени на их построение будут близкими к одноуровневым аппроксимациям, т.к. размерность дополнительно возникающих систем уравнений будет резко уменьшаться по сравнению с исходной СЛАУ. Это обеспечивает принципиальную возможность хранения матриц A коэффициентов СЛАУ сравнительно небольшой размерности в оперативной памяти компьютера.

Естественным развитием идеи В.Н. Страхова построения региональных и локальных линейных аналитических аппроксимаций потенциальных полей является частичное совмещение разномасштабных цифровых моделей магнитного поля при построении двухуровневой аппроксимационной конструкции.

Рассмотрим целесообразность такого совмещения на примере средне- и крупномасштабной аэромагнитных съемок (АМС), выполненных на северо-западе Сибирской платформы. Первичной информацией являются: выборки из результатов АМС масштаба 1:100 000 – далее "съемка 1" и АМС масштаба 1:25 000 – далее "съемка 2". Площадь съемки 1, проведенной на постоянной барометрической высоте 2400 м (поверхности S_1), составила 108000 кв. км, сеть 2×2 км; глубина аппроксимирующего поле источников $h_1 = 2,6$ км, точность $\varepsilon \cong 5$ нТл. Площадь съемки 2, проведенной с обтеканием рельефа на поверхности S_2 , составила 2000 кв. км, сеть $0,2 \times 0,2$ км; глубина аппроксимирующего поле источников – $0,161 \text{ км} \leq h_2 \leq 0,267 \text{ км}$, точность $\varepsilon \cong 1$ нТл. Поле источников с глубиной h_1 , аппроксимирующее данные съемки 1, восстанавливалось на поверхности S_2 . Затем разностное поле двух АМС, вычисленное на поверхности S_2 (сеть $0,2 \times 0,2$ км), моделировалось набором элементарных источников (точность $\varepsilon \cong 1$ нТл) и восстанавливалось на высоте 750 м. Полученные результаты суммировались с результатами пересчета съемки 1 на этот же уровень. Таким образом, было получено поле ΔT_{1+2}^* двухуровневой аппроксимационной конструкции для $z = 750$ м. Поле ΔT_2^* одноуровневой аппроксимационной конструкции было восстановлено на той же высоте. В первом случае для трансформации магнитного поля использовались данные съемок 1 и 2 (рисунок 2), во втором – только данные съемки 1.

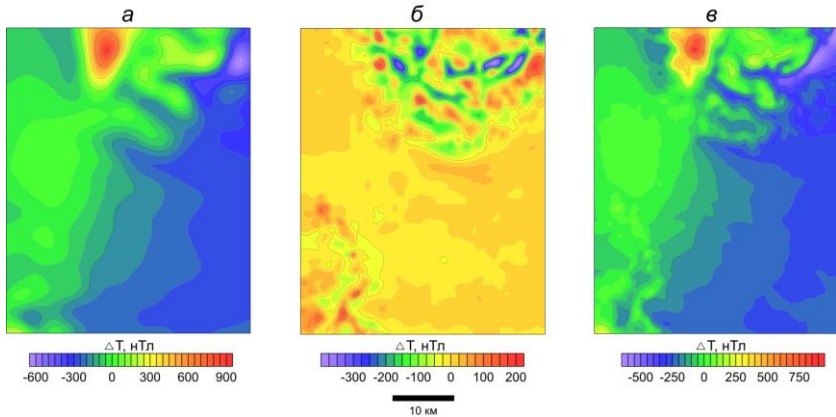


Рисунок 2 – Карты изодинам аномального магнитного поля ΔT на высоте 750 м, полученные в результате: *а* – пересчета данных съемки 1; *б* – пересчета разностного поля съемок 2 и 1; *в* – суммарное поле ΔT^{1+2}

Разность полей ($\Delta T_{1+2}^* - \Delta T_2^*$) более, чем на 50% площади превышает по модулю 2 нТл, при среднеквадратическом отклонении 16,9 нТл, достигая в краевых частях 200 нТл. Наиболее сильные различия полей наблюдаются в пределах интенсивно намагниченных трапповых структур, выходящих за рамки площади – Хараелахской и Норильской мульды, западного фланга плато Путораны. С физической точки зрения методика расчета поля ΔT_{1+2}^* представляется более корректной, поэтому описанная выше разность может отождествляться с погрешностью одноуровневой аппроксимации дискретно заданных значений магнитного поля.

На основе описанных выше экспериментальных результатов и их анализа можно сформулировать методику моделирования гравитационных и магнитных полей, существенно уменьшающую погрешность истокообразной аппроксимации и как следствие – всех вычисляемых на ее основе трансформант:

1. Расчет цифровой модели поля ΔT_1^* с использованием истокообразной аппроксимации мелкомасштабной съемки на поверхности крупномасштабной съемки S_2 ;

2. Вычисление разностного поля $\Delta T_2^* - \Delta T_1^*$ и его восстановление на высоту z ;

3. Пересчет результатов мелкомасштабной съемки на уровень z и суммирование с цифровой моделью поля, полученной на шаге 2.

Проведение подобных операций представляется целесообразным при трансформации данных аэромагнитных и аэрогравитационных съемок.

Эффект телескопирования аномалий позволяет использовать данную методику с целью разделения аномального магнитного поля на региональную и локальную составляющие.

Таким образом, первое защищаемое положение по методике моделирования гравитационного и магнитного полей, основанное на истокообразной аппроксимации результатов разномасштабных геофизических съемок, обосновано и доказано. Полученные результаты позволяют повысить точность вычислений трансформант за счет минимизации искажений периферических частей территории исследований.

Второе защищаемое положение. *Применение эмпирической модовой декомпозиции, с использованием истокообразных аппроксимаций при построении огибающих, уменьшающих влияние краевых эффектов декомпозиции, позволяет решать широкий спектр задач трансформации и моделирования двумерных и трехмерных данных гравиразведки и магниторазведки [1, 5, 10, 11, 12, 14, 16, 25].*

Метод эмпирической модовой декомпозиции (Empirical Mode Decomposition – EMD) был предложен Норденом Хуангом в 1995 г. и первоначально использовался при изучении поверхностных волн тайфунов. В 1998 г. метод был обобщен применительно к анализу произвольных временных рядов. Метод является важнейшей составляющей преобразования Гильберта-Хуанга (Huang-Hilbert Transform – ННТ), получившего в дальнейшем широкое применение в различных областях науки и техники, наряду с преобразованием Фурье и вейвлет-анализом.

В методе EMD предполагается, что анализируемый сигнал состоит из серии составляющих с различными частотами (intrinsic mode functions – IMF). IMF обладают следующими свойствами:

- Число максимумов и минимумов функции, а также и количество пересечений нуля отличаются не более, чем на единицу;
- Среднее значение обгибающих, построенных по локальным максимумам и локальным минимумам близко к нулю;
- Каждая IMF может иметь переменную амплитуду и частоту в разные моменты времени (или в разных точках пространства).

В отличие от гармоник, получаемых при представлении дискретного сигнала рядом Фурье, каждая IMF может иметь переменную амплитуду и частоту в разные моменты времени t (или в разных точках пространства x).

После проведения всех циклов просеивания и разложения исходный сигнал удается представить в виде суммы всех IMF и остаточной составляющей:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m \psi_{i,m}(x) + r(x), \quad (2)$$

где $f(x)$ – исходный сигнал;
 $\psi_i(x)$ – эмпирическая мода IMF,
 $r(x)$ – остаточная составляющая

Сигнал $f(x)$ согласно (2), оказывается разложенным по отвечающему исходным данным конечному адаптивному базису, не имеющему аналитического описания. Этот базис является полным, ортогональным и, по мнению Н. Хуанга, единственным.

Для геофизических полей характерна нестационарность, т.е. естественное изменение их статистических характеристик в пространстве. Природа этих изменений различна, и, в частности, может быть связана с фрактальными особенностями полей, обладающих самоподобной иерархически упорядоченной структурой. EMD разработана для анализа нестационарных данных, т.е. является адекватным геофизической практике, в отличие от большинства известных методов.

В области геофизики известны примеры успешного использования ННТ и EMD при анализе сейсмической активности и землетрясений, анализе структуры сейсмических сигналов, изучении сейсмоакустической эмиссии горных пород, подавлении помех в каротажных данных, обработке материалов аэрогравиметрических исследований. Полученные компоненты IMF при разложении геофизических сигналов можно использовать для геологической интерпретации.

Основной интерес к эмпирической модовой декомпозиции в геофизике исходит из того, что компоненты EMD практических данных обычно физически значимы и отображают различные объекты или физические процессы, сформировавшие сигнал. Таким образом, полученные IMF при разложении геофизических сигналов можно использовать для геологической интерпретации.

Важнейшим элементом EMD является построение огибающих сигнала: $p(x)$ и $q(x)$ проходящий через максимумы и минимумы сигнала соответственно. От выбора способа построения зависят результаты и точность декомпозиции. Для построения огибающих широко используются кубические сплайны (принято считать, что это наиболее простой, быстрый и надежный способ), также апробировано применение В-сплайнов. Однако методы сплайн-интерполяции нередко вносят заметные искажения в крайевые части сигнала, для уменьшения которых предлагается использование истокообразной аппроксимации при вычислении огибающих.

При измерении геопотенциальных данных доминируют площадные (трехмерные) системы наблюдений. Применение обычного алгоритма, разработанного для двумерных данных на 3D съемке зачастую некорректно. Во-первых, данные по каждому отдельному профилю при двумерном подходе раскладываются на разное количество IMF, что усложняет их анализ. Во-вторых, неизвестно какое направление профилей следует использовать как «базовое». В-третьих, полученные IMF являются независимыми друг от друга и их межпрофильная корреляция может существенно нарушаться. В-четвертых, в результате множественных двумерных разложений площадных данных всегда будут присутствовать линейные артефакты. Но несмотря на указанные причины, результат множественного 2D разложения 3D данных все же в ряде случаев может использоваться и показывает адекватные результаты. В связи с этим, на основе двумерного алгоритма EMD-разложения были программно реализованы 2,5D (псевдо-3D, множественное 2D) и 3D EMD. Суть псевдо-3D модификации EMD заключается в автоматизации двумерных преобразований данных площадных съемок путем независимо выполняющегося преобразования для каждого из профилей. Основным изменением трехмерного варианта EMD является то, что поиск локальных экстремумов, аппроксимация и восстановление поля происходит на всю площадь исследования, а не по профильным линиям. Данный подход значительно ускоряет процесс обработки и позволяет выделить общие IMF, характеризующие всю площадь исследования.

Разработанный алгоритм эмпирической модовой декомпозиции 2D и 3D данных с истокообразной аппроксимацией сигналов при вычислении огибающих реализован автором в программе, написанной на языке Object Pascal с использованием интегрированной среды кроссплатформенной разработки приложений Lazarus (версия 1.8.4).

Использование адаптивного базиса разложения сигнала в ряде случаев позволяет выделить его физически значимые компоненты, отвечающие влиянию отдельных аномалиеобразующих факторов. Предлагается следующая, близкая к традиционной, аддитивная модель наблюдаемого поля $f(x)$: $f(x) = f_{\text{лок}} + f_{\text{рег}} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, где $f_{\text{лок}}$ – локальная компонента (полезный сигнал), $f_{\text{рег}}$ – региональный фон, ε_1 – погрешность геофизической съемки (белый гауссовский шум), ε_2 – геологическая помеха (с отличающимся от нормального законом распределения).

Полученный в процессе исследований объем экспериментальных данных позволяет приближенно отождествлять наиболее высокочастотную IMF 1 с составляющей ε_1 , остаток разложения $r(x)$ – с составляющей $f_{\text{рег}}$. Следует отметить, что для гравиметрической съемки величина ε_1 может примерно в 1,2 – 1,5 раза превышать формальную

точность определения аномалий Буге и, возможно, является объективной оценкой точности съемки. Адаптивное выделение регионального фона в виде составляющей $r(x)$ представляет несомненный интерес для практики. Для выделения составляющей $f_{\text{лок}}$ нужна априорная информация о целевых аномалиеобразующих объектах, либо о предполагаемых источниках геологических помех ε_2 . В частности, если требуется подавление влияния сравнительно небольших по размерам приповерхностных неоднородностей разреза, то можно принять $\varepsilon_2 = \psi_2$ или $\varepsilon_2 = \psi_2 + \psi_3$.

Также EMD-преобразование положительно зарекомендовало себя при фильтрации данных полевых измерений с высоким отношением шум/сигнал.

Были выполнены две площадные микромагнитные съемки: основная по сети 1×1 м и мониторинговая по сети $1,5 \times 1$ м. В первом случае магнитовариационная станция (МВС) была установлена вблизи участка исследования, во втором – использовались две МВС, одна из которых располагалась непосредственно на участке. Данные, полученные МВС, показали наличие интенсивных техногенных помех, обладающих скрытой периодичностью (рисунок 3). Поскольку техногенные помехи, не отвечающие нормальному закону распределения, плохо поддаются фильтрации с использованием общепринятых алгоритмов (Фурье-, вейвлет-преобразования и другие) было использовано EMD-преобразование имеющихся временных рядов. С использованием EMD удалось выделить IMF, сопоставимую с солнечно-суточными вариациями, максимальная амплитуда которых составила 30 нТл. Интенсивность мод сигнала составила от 20 до 400 нТл, а частота изменяется от 0,133 до 0,56 Гц.

Для сопоставления техногенных помех в наблюдаемых данных и данных, снятых с МВС, было выполнено EMD-разложение профильных измерений. Такой анализ показал, что как относительно высокочастотные, так и низкочастотные компоненты профильных измерений, хорошо коррелируют с низкочастотными вариациями. Также для удаления высокочастотных составляющих из данных съемок были использованы спектрально-корреляционные алгоритмы, реализованные в системе Coscad-3D.

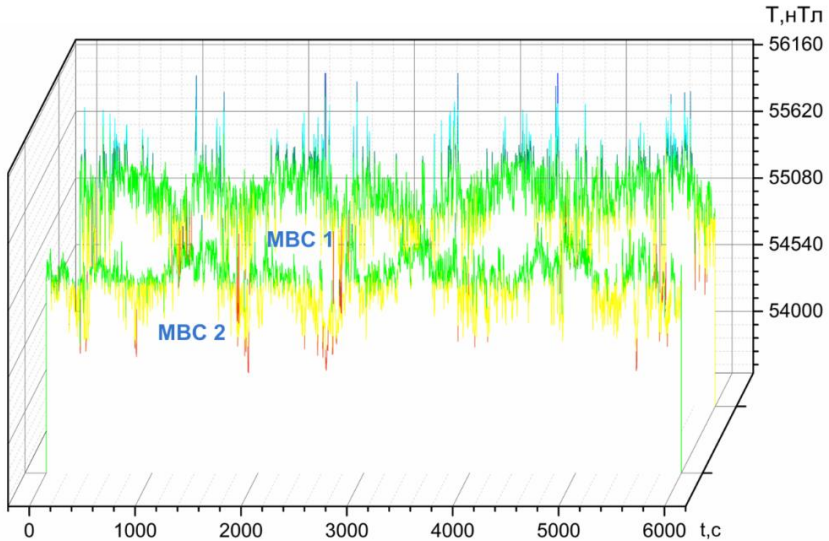


Рисунок 3 – Техногенные помехи в пределах урбанизированной площади по данным двух магнитовариационных станций: MBC 1 – удаленная магнитовариационная станция; MBC 2 – магнитовариационная станция, установленная непосредственно на участке микромагнитной съемки

Результатирующие карты (рисунок 4, а, б) показывают сложный мозаичный характер аномального магнитного поля с изменением значений от минус 50000 нТл до плюс 6500 нТл. Прослеживаются как отрицательные и положительные цепочки линейных аномалий меридионального и широтного направлений, так и отдельные изометричные знакопеременные аномалии. Мониторинговая съемка показала хорошее совпадение местоположения и интенсивности подавляющего большинства аномалий магнитного поля (рисунок 4, б). Сравнивая амплитуду вариаций магнитного поля и локальных аномалий, следует отметить, что на фоне зафиксированных техногенных помех большинство аномалий являются слабыми, т.е. с интенсивностью полезного сигнала, сопоставимой с помехой или ниже.

Качественная интерпретация материалов микромагнитных съемок выявила несколько видов магнитных аномалий, соответствующих определенным типам подземных коммуникаций и наземных объектов: фонарный столб, чугунные люки, трубопроводы, кабельные линии.

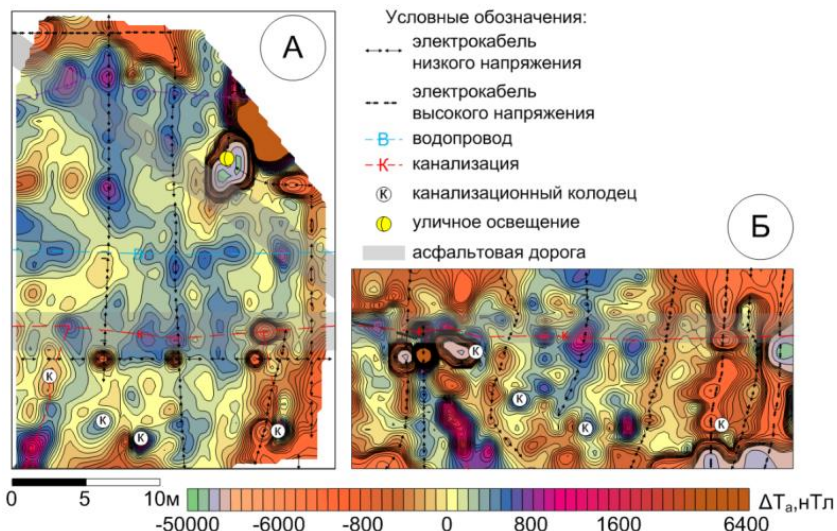


Рисунок 4 – Качественная интерпретация аномального магнитного поля по результатам площадных микромагнитных съемок: а – основная микромагнитная съемка; б – мониторинговая микромагнитная съемка

Использование EMD-преобразования не ограничивается фильтрацией и моделированием геофизических данных, а также может использоваться для расширения признакового пространства при комплексной интерпретации и в корреляционных методах интерпретации геопотенциальных полей.

Таким образом, второе защищаемое положение по применению эмпирической модовой декомпозиции, с использованием истокообразных аппроксимаций при построении огибающих сигнала, уменьшающих влияние краевых эффектов аппроксимации, обосновано и доказано. Полученные результаты позволяют решать широкий спектр задач моделирования и преобразования двумерных и трехмерных данных гравиразведки и магниторазведки.

Третье защищаемое положение. *Компьютерная технология трехмерной контролируемой эмпирической модовой декомпозиции, позволяющая приближённо выделять компоненты интерпретируемого поля, обусловленные разноточными геоплотностными границами и объектами [3, 4, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24].*

У канонического EMD-преобразования есть несомненные плюсы: простота программной реализации алгоритма практически для любого типа данных и быстрая скорость разложения, но есть и существенные недостатки, такие как:

- эффект смешивания мод;
- краевые эффекты аппроксимации;
- неуправляемость алгоритма;
- сложность и неустойчивость площадных модификаций алгоритма EMD.

В настоящее время разработано множество модификаций EMD-разложения (EEMD, SEEMD и др.), в которых частично или полностью устранены эти недостатки. Но применение таких подходов к обработке геофизических данных осложнено низкой скоростью расчета IMF в связи с большой и сверхбольшой размерностью матриц исходных данных площадных съемок (до 10^5 – 10^7 значений поля и более).

Поэтому появляется необходимость создания модификации алгоритма EMD, который был управляем, решал существующие проблемы и мог использоваться для анализа геофизических данных большой размерности.

Предлагается новый алгоритм разложения сигналов на составляющие вида (2), использующий априорные ограничения на спектральный состав функций $\psi(x)$, близких к IMF, но не являющихся таковыми. В этом алгоритме используется кусочно-постоянное представление огибающих $p(x)$ и $q(x)$ при рассмотрении исходного сигнала $f(x)$ в серии последовательно расширяющихся окон, как при кратномасштабном вейвлет-преобразовании (FWT). Это делает процесс разложения более управляемым и устойчивым, но несколько уменьшает точность получаемых результатов в высокочастотной области. Подобный алгоритм получил название управляемая эмпирическая модовая декомпозиция (Guided Empirical Mode Decomposition или GEMD).

Разработанный алгоритм объединяет вместе использование адаптивного базиса (EMD) и преобразований сигнала вида "масштаб-время" (FWT) за счет использования дополнительных ограничений на частоты квазиортогональных компонент разложения исходного сигнала. Эти ограничения являются препятствием для смешивания мод. Кусочно-постоянное представление огибающих сигнала незначительно загрубляет результаты разложения, но полностью исключает возможность пересечения кривых $p(x)$, $q(x)$, $\psi(x)$. Также полностью снимается вопрос выделения многоточечных (плоских) экстремумов. Использование в циклах отсеивания истокообразной аппроксимации обеспечивает возможность использования данного алгоритма при анализе геопотенциальных полей. Отличительными особенностями алгоритма является практически полное отсутствие краевых эффектов и возможность управления процессом за счет изменения параметров k_1 – начальный размер окна разложения и α – коэффициентом увеличение размера окна.

Одним из недостатков EMD-декомпозиции является высокое влияние погрешности исходных данных на результаты решения системы линейных алгебраических уравнений при аппроксимации $p(x)$ и $q(x)$ набором точечных источников. Для оценки обусловленности СЛАУ при аппроксимации $\varphi(x)$ выполнено обращение матрицы коэффициентов A итерационным методом Шульца второго порядка с использованием в качестве начального приближения для A^{-1} матрицы β^T , $\beta = 10^{-7}$. Установлено, что числа обусловленности $cond A$, характеризующие влияние неточностей исходных данных на результаты решения систем линейных уравнений в GEMD-алгоритме на 2 – 3 порядка ниже, чем в EMD. Описанные выше преимущества и свойства GEMD-разложения создают весьма благоприятные предпосылки для его использования при реализации трехмерной модификации.

Апробация алгоритма 3D GEMD осуществлялась на материалах опытных гравиметрических работ, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения калийных солей (ФГБОУ «Институт геофизики» им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, 2020). На исследуемой площади размером 8,7 кв. км находится эрозионный врез в своде поднятия. В этом месте соли теряют в мощности порядка 60 м, при глубине залегания соляного зеркала (СЗ) до 200 м, а на соляное зеркало выходят пласты карналлитовой пачки (КП).

Здесь был выполнен обширный комплекс геофизических работ, включавший в себя наземные методы (сейсморазведка 2D и 3D, электроразведка методами вертикальных электрических зондирований, зондирование становлением поля в ближней зоне, технология электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, аудиоманнитотеллурическое зондирование), подземные (сейсморазведка по способу поперечных волн разделения отражений (ПВРО), электротомография, вертикальные электрические зондирования), а также новый способ наземно-подземного электромагнитного зондирования. Наиболее точно структуру и природу встреченного эрозионного вреза удалось определить с помощью шахтной сейсморазведки по способу ПВРО, при непосредственном участии автора. Аномалия в дальнейшем была заверена бурением скважины с поверхности. Выявленная структура представляет из себя эрозионный врез в своде поднятия.

Для предварительной оценки возможности обнаружения аномалии типа «эрозионный врез» гравиразведкой было проведено моделирование гравитационного поля с использованием информации об абсолютных отметках соляного зеркала и рельефа земной поверхности. Результатом решения прямой задачи гравиразведки стало модельное гравитационное поле исследуемой соляной толщи в узлах сети 25×25 м. Диапазон изменения значений поля составил 0,7 мГал. По локальной компоненте

гравитационного поля (рисунок 5) была оценена амплитуда аномальной области – 0,2 мГал, отвечающей искомому объекту. Такая амплитуда свидетельствует о том, что с помощью высокоточной гравirazведки можно зафиксировать и локализовать изучаемую аномалию, обусловленную изменением глубины границы соляного зеркала в пределах эрозионного вреза.

Высокоточная площадная съемка проведена с сетью пунктов наблюдения 50 x 150 м. Поле силы тяжести измерено на 1121 рядовых гравиметрических пунктах. Съемка выполнялась гравиметром марки CG-5 фирмы Scintrex (Канада).

После ввода всех необходимых поправок была получена карта изоаномал наблюдаемого поля в редукции Буге (погрешность определение гравитационного поля в редукции Буге составила $\pm 0,035$ мГал). Коэффициент корреляции между наблюдаемым полем в редукции Буге и модельным полем (рисунок 5) составил 0,9, что свидетельствует о том, что наблюдаемое поле преимущественно обусловлено характером залегания соляного зеркала.

Для учета влияния разновысотности пунктов наблюдений поле в редукции Буге необходимо пересчитать на горизонтальную плоскость. Для пересчета на горизонтальную плоскость был использован алгоритм истокообразных аппроксимаций. При пересчете наблюдаемого поля на высоту 500 м коэффициент корреляции с модельным полем повысился до 0,94.

Для локализации аномального объекта типа «эрозионный врез» необходимо отделить локальную компоненту от региональной путем вычитания региональной составляющей в виде полинома 2-ой степени. Для дальнейшей фильтрации поля была использована модификация метода EMD – GEMD. Наибольшая корреляционная зависимость наблюдается между локальной составляющей модельного поля (результат разности модельного поля и региональной составляющей в виде полинома 2-ой степени) и трансформантой наблюдаемого поля «Остаток GEMD, гор. плоскость 235» (рисунок 6). Можно заметить, что в целом аномальные поля имеют близкий характер, но отмечаются и расхождения. По данным моделирования отсутствует отрицательная аномалия вблизи скв. 18, а аномалия, создаваемая эрозионным врезом, имеет меньшую амплитуду и продолжается на восток.

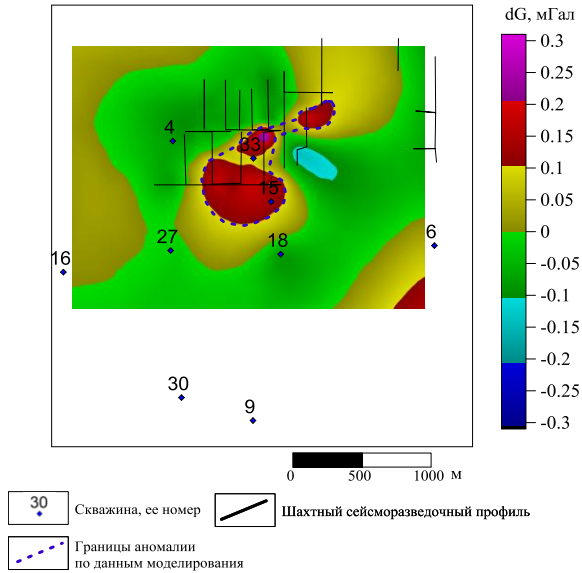


Рисунок 5 – Локальная составляющая модельного поля

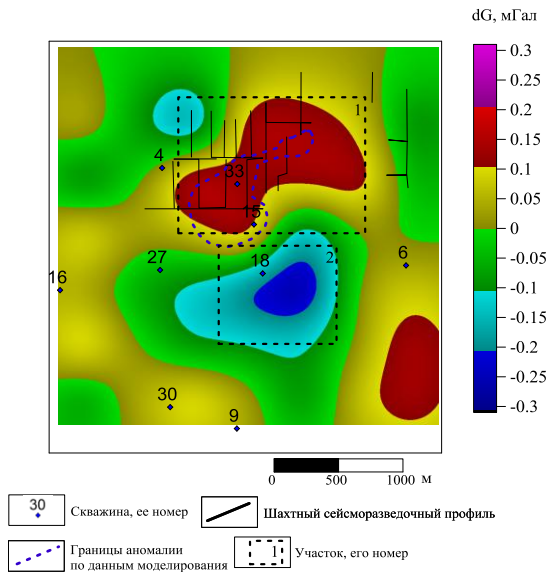


Рисунок 6 – Трансформанта аномального гравитационного поля «Остаток GEMD, горизонтальная плоскость 235 м»

Незначительные различия практических материалов и модельных построений, возможно, связаны с погрешностями геологической модели, пространственной изменчивостью плотности горных пород, недостаточной достоверностью локальных изменений абсолютных отметок кровли соляного зеркала за пределами участка, влиянием более глубоких гравиактивных границ и объектов.

Разработанный и реализованный алгоритм управляемой эмпирической модовой декомпозиции снимает многие существующие недостатки EMD. Алгоритм реализован в программе «EMD v 2.0 (MMF)», которая зарегистрирована в базе Федеральной службы по интеллектуальной собственности, свидетельство № 2021610509 от 14.01.2021.

Таким образом, третье защищаемое положение по компьютерной технологии трехмерной контролируемой эмпирической модовой декомпозиции обосновано и доказано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы сводятся к следующему:

1. При трансформации данных аэромагнитных съемок представляется целесообразным использование двухуровневых аппроксимационных конструкций и декомпозиции задачи, основанной на использовании результатов исследований разного масштаба, выполненных на различных высотах. Аналогичный подход применим к данным аэрогравразведки;

2. Эмпирическая модовая декомпозиция является эффективным алгоритмом фильтрации дискретно заданных значений геопотенциальных полей, поскольку предназначена для анализа нестационарных и нелинейных процессов, какими и являются любые геофизические сигналы. Включение эмпирической модовой декомпозиции в граф обработки данных гравиразведки и магниторазведки позволяет отфильтровать помехи, сопоставимые по амплитуде с полезным сигналом, в т.ч. с отличающийся от нормального законом распределения. Применение EMD для этих геофизических методов выходит за рамки фильтрации исходного сигнала и может быть использовано для расширения признакового пространства при комплексной интерпретации, при корреляционной интерпретации геопотенциальных полей;

3. Создан и программно реализован алгоритм эмпирической модовой декомпозиции, совмещающий в себе использование адаптивного базиса и преобразования сигнала вида «масштаб-время» позволяет избавиться от недостатков классического EMD за счет незначительного закругления аппроксимации исходных данных в высокочастотной области.

Рекомендуется задавать начальное окно k_1 , равное автокорреляционной функции сигнала. Трехмерная модификация GEMD позволяет не только получить трансформанты поля, ассоциируемые с геологическими структурами и объектами определенного ранга, но и разбитую на ранговые блоки разноточных эквивалентных источников аппроксимационную конструкцию, необходимую при дальнейшем построении различных трансформант геопотенциальных полей.

4. Разработана программа «Разложения геофизических данных на модифицированные модовые функции EMD (MMF)» в IDE Lazarus, реализующая GEMD-декомпозицию в модификациях 2D, псевдо-3D и 3D, успешно используемая при решении инженерно-геологических задач.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Новикова, П. Н. Обнаружение подземных коммуникаций в условиях техногенных помех по данным магнитного поля / П. Н. Новикова, **В. А. Ворошилов** // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 4-9.
2. Долгаль, А. С. Совершенствование методики аналитической аппроксимации данных магниторазведки / А. С. Долгаль, В. И. Костицын, П. Н. Новикова, **В. А. Ворошилов** // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 31-38.
3. Жуков, А. А. Влияние направленности источников и приемников на результаты шахтной сейсморазведки / А. А. Жуков, А. М. Пригара, Р. И. Царев, И. Ю. Шусткина, **В. А. Ворошилов** // Геофизика. – 2019. – № 5. – С. 26-36.

Публикации в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus

4. Пригара, А. М. Исследование процесса распространения волн при сейсмоакустических воздействиях в породном массиве методами математического моделирования / А. М. Пригара, В. Н. Аптуков, Р. И. Царев, **В. А. Ворошилов**, А. А. Жуков // Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – С. 38.
5. Dolgal, A. S. Adaptive Separation of Abnormal Geomagnetic Field Components / A. S. Dolgal, **V. A. Voroshilov** // Engineering and Mining Geophysics 2020: 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020», Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – Р. 133.
6. Пригара, А. М. Совершенствование технологии шахтной сейсморазведки / А. М. Пригара, **В. А. Ворошилов**, А. А. Жуков, Р. И. Царев, И. Ю. Пушкарёва // Инженерная и рудная геофизика 2021: 17-я научно-

практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2021», Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. –Геленджик: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 7.

7. **Ворошилов, В. А.** Возможность применения наземной гравиразведки для локализации эрозионного вреза в пределах месторождения солей / **В. А. Ворошилов** А. А. Жуков // Инженерная и рудная геофизика 2021: 17-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2021», Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. –Геленджик: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 9.

8. Царев, Р. И. Методика выделения геологических неоднородностей при проведении поверхностной сейсморазведки, основанная на конечно-разностном численном моделировании / Р. И. Царев, А. М. Пригара, **В. А. Ворошилов** // Инженерная и рудная геофизика 2021: 17-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2021», Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. –Геленджик: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 11.

9. **Ворошилов, В. А.** Применение трехмерной модификации метода GEMD для аппроксимации геофизических полей / **В. А. Ворошилов** В. И. Костицын // Инженерная и рудная геофизика 2021: 17-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2021», Геленджик, 26–30 апреля 2021 года. –Геленджик: Общество с ограниченной ответственностью "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2021. – С. 9.

10. Integration of Surface and Mine Gravity Data for Localization Structural Faults on the Verkhnekamskoye Potassium-Magnesium Salt Deposit / **V. Voroshilov**, A. Zhukov, A. Prigara [et al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 342 LNNS. – P. 304-311. – DOI 10.1007/978-3-030-89477-1_30.

*Публикации в научных журналах, сборниках статей,
индексируемых в РИНЦ*

11. Новикова, П. Н. Инженерная магниторазведка при обнаружении подземных коммуникаций в условиях помех техногенного происхождения / П. Н. Новикова **В. А. Ворошилов**, В. В. Копытин, П. А. Субботин, М. М. Калашникова, П. А. Темиров // Восемнадцатая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. Пермь, ГИ УрО РАН, 2017. С. 147-151

12. Долгаль, А. С. Анализ геофизических полей методом эмпирической модовой декомпозиции (EMD) / А. С. Долгаль, О. М. Муравина, **В. А.**

Ворошилов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2019. – № 2(39). – С. 212-222.

13. Жуков, А. А. Особенности применения сейсморазведки на поперечных волнах в условиях подземных выработок калийного рудника / А. А. Жуков, А. М. Пригара, Р. И. Царев, И. Ю. Шусткина, **В. А. Ворошилов** // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: Материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института "Уралмеханобр", Екатеринбург, 06–08 ноября 2019 года. – Екатеринбург: ОАО "Уралмеханобр", 2019. – С. 86-89.

14. Долгаль, А. С. Адаптивный алгоритм разложения геофизических полей на составляющие / А. С. Долгаль, **В. А. Ворошилов** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2020. – № 3(40). – С. 173-180.

15. **Ворошилов, В. А.** Эмпирическая модовая декомпозиция площадных геофизических данных / **В. А. Ворошилов**, А. С. Долгаль // Теория и практика разведочной и промышленной геофизики: сборник научных трудов, Пермь, 19–20 ноября 2020 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – С. 67-72.

16. **Ворошилов, В. А.** Особенности обработки данных 2.5D и 3D эмпирической модовой декомпозиции (EMD) / **В. А. Ворошилов** // Геология в развивающемся мире: Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Пермь, 15–17 апреля 2020 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – С. 204-207.

17. Долгаль, А. С. Повышение точности трансформации магнитного поля с использованием истокообразных функций / А. С. Долгаль, **В. А. Ворошилов**, П. Н. Новикова // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д. Г. Успенского - В. Н. Страхова, Воронеж, 27–30 января 2020 года. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2020. – С. 110-114.

18. **Ворошилов, В. А.** Оптимальное дискретное замощение геологической среды элементарными ячейками при решении прямой задачи магниторазведки / В. А. Ворошилов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Сборник научных трудов по материалам 46-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, Пермь, 20–26 января 2019 года. – Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 75-79.

19. **Ворошилов, В. А.** Автоматизация расчета геометрии нерегулярных систем наблюдения для данных сейсморазведки / В. А. Ворошилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Сборник научных трудов по материалам международной научной-практической конференции, Пермь, 22–23 ноября 2018 года. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 89-93.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

20. Патент № 2709415 С1 Российская Федерация, МПК G01V 1/00, G01V 1/28, G01V 1/30. Способ шахтной сейсмической разведки: № 2019109747: заявл. 02.04.2019: опубл. 17.12.2019 / А. М. Пригара, А. А. Жуков, Р. И. Царев, И. Ю. Шусткина, **В. А. Ворошилов**; заявитель Акционерное общество "ВНИИ Галургии" (АО "ВНИИ Галургии").

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610568 Российская Федерация. Программа атрибутного анализа AtAn. Версия 1.0: № 2019667160: заявл. 23.12.2019: опубл. 16.01.2020 / Р. И. Царев, **В. А. Ворошилов**, А. М. Пригара [и др.]; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610309 Российская Федерация. Программа поиска годографов дифрагированных волн GodFind. Версия 1.0: № 2019667093: заявл. 23.12.2019: опубл. 13.01.2020 / **В. А. Ворошилов**, А. М. Пригара, Р. И. Царев [и др.]; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610268 Российская Федерация. Программа обработки шахтных сейсмических данных FastMineProc. Версия 1.0: № 2019667231: заявл. 23.12.2019: опубл. 13.01.2020 / А. М. Пригара, **В. А. Ворошилов**, А. А. Жуков [и др.]; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660506 Российская Федерация. Программа контроля и документирования полевых сейсморазведочных работ EJ. Версия 1.0: № 2020619619: заявл. 26.08.2020: опубл. 04.09.2020 / **В. А. Ворошилов**, А. М. Пригара, Р. И. Царев [и др.]; заявитель Акционерное общество «ВНИИ Галургии» (АО «ВНИИ Галургии»).

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610509 Российская Федерация. Программа разложения геофизических данных на модифицированные модовые функции EMD (MMF). Версия 1.0: № 2020667200: заявл. 22.12.2020: опубл. 14.01.2021 / **В. А. Ворошилов**, А. С. Долгаль; заявитель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».