

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу ВОРОШИЛОВА Владислава Алексеевича

«Развитие методов моделирования и трансформации гравитационных и магнитных аномалий»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.6.9 – «Геофизика»

Диссертационная работа соискателя посвящена развитию современных подходов к моделированию и интерпретации трансформант геопотенциальных полей, полученных посредством аналитических (истокообразных) аппроксимаций и различных вариантов эмпирической модовой декомпозиции (ЕМД-преобразований). Целью работы явилось создание и опробование эффективных высокоточных алгоритмов обработки данных гравиразведки и магниторазведки в рамках указанных подходов, позволяющих усилить геологическую содержательность выводов на этапе интерпретации.

Диссертационная работа, изложенная на 115-ти страницах, содержит введение, 4 главы основного содержания, включающие 40 рисунков, 11 таблиц, 14 формул, и заключение. В работе приведен список сокращений и условных обозначений, а также список литературы из 85-ти наименований. Автореферат диссертации структурирован по трем защищаемым положениям, изложен на 27 страницах и содержит 6 рисунков. Приведенный в автореферате список работ с участием автора включает 3 публикации в изданиях, рецензируемых ВАК, 6 публикаций в изданиях, рецензируемых в наукометрических базах SCOPUS и WoS, 9 публикаций в научных журналах и сборниках статей, рецензируемых в РИНЦ, а также 6 патентов и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

В обзорной главе 1 диссертант рассматривает известные методы трансформации геопотенциальных полей, разделяя их на два класса. К методам трансформаций первого класса он относит трансформации на основе спектральных Фурье-преобразований и цифровой линейной фильтрации. К методам трансформаций второго класса – истокообразную аппроксимацию полей с использованием пространственных распределений элементарных (эквивалентных) источников. Диссертант справедливо указывает, что обоснованное использование трансформаций при обработке сложных полей позволяет выделить полезную информацию и уменьшить влияние помех. При этом не вполне понятно употребление словосочетания «теоретическая потеря информации» (стр.22) в связи с трансформационными преобразованиями экспериментальных данных и выявлением аномалий от целевого геологического объекта.

Первую часть главы 2 диссертант посвящает оценке влияния вектора эффективной намагниченности на точность истокообразной аппроксимации, приводя пример трансформации магнитного поля от нескольких наклонно намагниченных призм с учетом рельефа для заданной сеточной модели источников. Сравнивая восстановленное магнитное поле на высоте 500 м с ранее полученным истинным полем на этом же уровне, а также соответствующие вертикальные производные, диссертант приходит к выводу, что получаемые «краевые» эффекты связаны с ограниченными размерами площади исходного поля, причем высокая точность аналитической аппроксимации исходного поля не гарантирует высокой точности его трансформации. Диссертант приводит таблицу оценки точности вычислений 1-й вертикальной производной напряженности магнитного поля на

высоте 500 м в случае решения прямой задачи магниторазведки и в случае аналитической аппроксимации, свидетельствующую о несущественном расхождении статистических параметров при усложнении модели. Во второй части главы 2 автор предлагает использовать двухуровневую аппроксимационную конструкцию с целью подавления краевых эффектов при восстановлении магнитного поля на фиксированной высоте пересчета (с учетом рельефа) и формулирует методику моделирования гравитационных и магнитных аномалий, существенно уменьшающую погрешность истокообразной аппроксимации. Эффект телескопирования аномалий позволяет выигрышно использовать данную методику с целью разделения наблюдаемого магнитного поля на региональную и локальную компоненты при ярко выраженном снижении вычислительных погрешностей по сравнению с одноуровневой аппроксимацией. Диссертант приводит убедительный пример совмещения разномасштабных (разновысотных) цифровых моделей магнитного поля при построении двухуровневой аппроксимационной конструкции с использованием данных средне- и крупномасштабных аэромагнитных съемок (северо-запад Сибирской платформы).

Весьма содержательной частью диссертационной работы является глава 3, посвященная описанию и применению метода эмпирической модовой декомпозиции (EMD) для обработки нестационарных геопотенциальных полей. Диссертант приводит общую блок-схему «классического» алгоритма EMD и указывает на ряд проблем, связанных с эффектом смешивания мод, наличием аппроксимационных краевых эффектов, неуправляемости и неустойчивости алгоритма при обработке площадных данных. В качестве одной из мер преодоления краевых эффектов диссертант предлагает использовать идеи истокообразной аппроксимации при построении огибающих сигнала посредством линейных комбинаций гармонических функций. При определенных условиях модифицированный алгоритм позволяет уменьшить краевые эффекты построения огибающих по локальным экстремумам функций и увеличить точность эмпирического разложения.

В качестве развития методики автор предлагает алгоритмы 2.5D (псевдо-3D) и 3D эмпирической модовой декомпозиции. Первый из них автоматизирует двумерные преобразования, осуществляемые отдельно по каждому из параллельных профилей, в совокупности образующих грид площадных данных. Второй – подразумевает поиск локальных экстремумов, их аппроксимацию огибающими поверхностями с последующим восстановлением сразу на всю площадь исследований, а не по совокупности отдельных профильных линий. На стр.47 указывается, что 2.5D EMD преобразование подразумевает отбор геофизиком-интерпретатором компонент разложения, несущих полезную информацию, однако критерии отбора не уточняются. Диссертант признает, что результаты 2.5D EMD преобразования требуют дополнительной обработки, и зачастую содержат меньше полезной информации по сравнению с классическими методами фильтрации. Относительно алгоритма 3D EMD диссертант отмечает, что его использование может быть сильно осложнено неравномерным распределением локальных плоских экстремумов в анализируемых данных, что приводит к плохой обусловленности решаемых систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и низкому числу компонент разложения. В этой связи рекомендуется проводить преобразования 3D EMD только для данных, обладающих относительно равномерным распределением локальных экстремумов в пределах как можно более квадратной матрицы (грида) исходных значений поля. Последнее обстоятельство является серьезным ограничением алгоритма, однако

результаты сопоставления 2.5D и 3D EMD-разложений, представленные на рис.3.4., убедительно свидетельствуют о несомненных преимуществах трехмерного варианта.

Глава 3 содержит практические примеры использования EMD, включающие:

а) моделирование геофизических полей с оценкой точности гравиметрической съемки по первой, наиболее высокочастотной компоненте разложения; б) адаптивное выделение регионального фона в виде остатка EMD-разложения магнитного поля над платобазальтами Восточной Сибири. Соискатель признает, что для выделения локальной составляющей поля нужна априорная информация о целевых аномалиеобразующих объектах, либо о предполагаемых источниках геологических помех. Для подавления влияния небольших приповерхностных неоднородностей разреза он рекомендует эмпирически выделять, а затем суммировать соседние локальные компоненты EMD-разложения с малыми номерами. Приводится пример использования двух площадных микромагнитных съемок с различными комбинациями расстановок магнитовариационных станций относительно исследуемого участка, причем для фильтрации шумовой компоненты магнитного поля используется EMD-преобразование. В результате частотного разложения вариаций магнитного поля был выделен ряд разночастотных модовых компонент техногенной природы, сопоставимых по амплитуде с целевыми микромагнитными аномалиями. На стр. 56 диссертант отмечает, что помимо фильтрации техногенных помех были использованы спектрально-корреляционные алгоритмы, реализованные в системе COSCAD-3D для удаления высокочастотных составляющих из данных первичной съемки, но не указывает, какие именно. В целом, проведенное исследование, включающее качественную интерпретацию аномалий, доказывает эффективность использования EMD-преобразований при обработке данных микромагнитных съемок в условиях существенных техногенных помех. Нельзя также не согласиться с соискателем в том, что эмпирические модовые функции, ассоциируемые с локальными аномалиями и «трендовым» остатком разложения, позволяют дополнительно расширить пространство независимых признаков при проведении формализованной комплексной интерпретации, а также при построении корреляционно-регрессионных моделей интерпретации геопотенциальных полей.

Несомненной научной новизной характеризуется и заключительная глава 4, в которой диссертант развивает идею управляемой эмпирической модовой декомпозиции (GEMD), имеющей существенные преимущества перед «классическим» вариантом EMD. Алгоритм GEMD, схематически представленный на рис. 4.2, характеризуется практически полным отсутствием краевых эффектов и допускает кусочно-постоянное представление огибающих исходного сигнала в серии последовательно расширяющихся окон, что несколько загроубляет результаты разложения. Алгоритм, объединяющий адаптивный базис (EMD) и вейвлет-преобразования типа «масштаб-время», использует ограничения на частоты разложения сигнала, препятствующие смешиванию мод и выделению многоточечных (плоских) экстремумов. В качестве иллюстрации на рисунках 4.4 и 4.5 диссертант приводит результаты разложения исходного магнитного поля на серию разночастотных MMF-компонент и остаток при различных начальных размерах окна и масштабных коэффициентах. Оппоненту представляется, что для усиления преимуществ алгоритма GEMD указанные построения следовало бы сопоставить с графическими результатами «классических» разложений исходного сигнала на основе Фурье-анализа и вейвлет-преобразований. Диссертант отмечает, что алгоритм GEMD нуждается в дальнейшем тестировании на модельных и экспериментальных данных. Это абсолютно

логично, поскольку фундаментальное значение имеет выбор начального размера окна и масштабного коэффициента его увеличения. Эмпирически назначаемые параметры позволяют регулировать количество и частоту ММФ-компонент разложения, а следовательно – управлять самим процессом.

В главе 4 содержится раздел 4.2. в котором приведены сравнительные таблицы, доказывающие, что числа обусловленности, характеризующие влияние неточностей исходных данных на результаты решения СЛАУ в алгоритме GEMD на 2-3 порядка ниже, чем в «классическом» алгоритме EMD. Диссертант проводит также проверку ортогональности ММФ-компонент, используя расчеты «взаимных» средних энергий магнитного поля для различных пар компонент $\{\psi_i, \psi_j\}$ и остатка разложения r . Сопоставления параметров, расположенных на главных диагоналях матриц (табл. 4.3 и 4.4), а также низкие значения коэффициентов корреляции между любыми парами компонент разложения поля (табл. 4.5) доказывают их взаимную ортогональность.

В разделе 4.3 анализируются особенности модифицированного 2.5D (псевдо-3D) GEMD –разложения, иллюстрируемые на практическом примере применения алгоритма 2.5D управляемой модовой декомпозиции для обработки материалов крупномасштабной аэромагнитной съемки в северной части плато Путораны. Приводимый рисунок 4.6 свидетельствует, что с увеличением номера ММФ-компоненты имеет место усиление пикселизации и искусственной вытянутости (искажения) аномалий поля в двух взаимно ортогональных направлениях. По мнению оппонента информативность визуальных результатов данного разложения не дает оснований для однозначного геологического истолкования ММФ-компонент, приводимого на стр.74. Например, указывается, что компонента ММФ 2 характеризует локальные магнитные неоднородности внутри толщи платобазальтов, в то время, как низкочастотная компонента ММФ 3 ассоциируется со структурными особенностями продуктов эффузивного магматизма и приближенно характеризует их вертикальную мощность. Очевидно, что для геологически содержательных выводов необходима дополнительная априорная информация.

В разделе 4.4 диссертант сосредотачивается на трехмерной модификации GEMD – разложения. Весьма убедительным представляется рис. 4.7, на котором иллюстрируются сравнительные распределения локальных плоских экстремумов для алгоритмов EMD- и GEMD-разложений на примере обработки гравитационного поля. В последнем случае исходная область задания поля представляется в виде неперекрывающихся зон (ранговых аппроксимационных конструкций), число которых возрастает в геометрической прогрессии при переходе от более мелкого к более крупному масштабу. Увеличение глубины аппроксимирующих источников в процессе 3D GEMD-разложения производится с соответствующим коэффициентом укрупнения начального окна, о чем наглядно свидетельствует рис.4.8.

Несомненный интерес вызывает также раздел 4.6, описывающий применение модификации 3D GEMD при обработке данных полевых гравиметрических наблюдений. Посредством указанного алгоритма была получена площадная трансформанта, характеризующая локальное строение гравиактивной границы - соляного зеркала (эрозионного вреза, возникшего в результате размыва солей). Полученная гравитационная аномалия адекватно отражает геологическое строение исследуемой толщи, что подтверждается данными моделирования, шахтной геофизики и бурения. Амплитуда локальной аномалии, обусловленной изменением глубины границы соляного зеркала в

пределах эрозионного вреза, свидетельствует о возможности ее фиксации наземной гравиразведкой. Однако неясно, были ли построены и исследованы трансформанты, отражающие влияние других гравиактивных границ? В этом случае можно было бы претендовать на создание объемной геоплотностной модели среды для исследуемого площадного участка.

Подводя итог, оппонент считает необходимым дополнительно отметить ряд замечаний:

1. Формулировка третьего защищаемого положения стилистически искажена. Причастие «позволяющая» следует заменить на сказуемое «позволяет». Подобные стилистические несогласия отмечены и в формулировках пункта 3 Заключения.
2. Пункт 4 научной новизны, касающийся реализации программного обеспечения GEMD, отражает скорее практическую значимость работы.
3. В редакционном плане текст диссертации выверен довольно небрежно. Текст содержит ряд лексических и стилистических ошибок, местами нарушена орфография. В заключениях к главам некоторые выводы дословно повторяют формулировки, используемые при написании разделов.
4. В формулах для аналитических выражений, характеризующих трансформации гравитационного поля (табл. 1.2), отсутствует описание параметра ξ .
5. В описании к рисунку 2.3, иллюстрирующему характеристику итерационного процесса решения СЛАУ методом Зейделя, не указано, что вертикальная шкала погрешностей решения отражена в логарифмическом масштабе.
6. Оценка точности гравиметрической съемки путем аппроксимации гистограммы для компоненты IMF 1 функцией нормального распределения допустима лишь для одномодальных, достаточно симметричных гистограмм. В случае полимодальной гистограммы IMF 1, ее аппроксимация функцией нормального распределения может привести к ошибочной оценке точности.
7. Слабая контрастность графического отображения сглаженных вариаций магнитного поля на рисунке 3.8 затрудняет содержательное восприятие.
8. Шкала-легенда с грациями интенсивности аномального магнитного поля на рис. 3.10 содержит близкие оттенки красного цвета для диапазонов отрицательных и положительных значений, что затрудняет качественную интерпретацию поля.
9. На стр. 61 при описании построения регрессионной модели отсутствует ссылка на используемый метод группового учета аргументов (МГУА).
10. На рисунках 4.12 – 4.18 не просматривается положение шахтного сейсморазведочного профиля, заявленного в легенде.

Отмеченные замечания не затрагивают существа основных научных идей, используемого математического аппарата, методических приемов и алгоритмов, а также полученных автором результатов моделирования и трансформаций гравитационных и магнитных аномалий. Работа представляется достаточно масштабной, многоплановой и содержательной. Основные положения и результаты диссертационной работы публиковались и неоднократно апробировались автором на различных научных конференциях и семинарах. Научная новизна защищаемых положений, достоверность и обоснованность выводов диссертационной работы могут считаться доказанными. Диссертантом создана прикладная компьютерная программа «EMD v 2.0 (MMF)», используемая для разложения геофизических данных на модифицированные модовые

