ОТЗЫВ

официального оппонента Долгаля Александра Сергеевича
на диссертацию Владимира Евгеньевича Мисилова
«Итерационные методы и параллельные алгоритмы решения нелинейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация В.Е. Мисилова посвящена разработке новых методов решения трехмерных обратных задач гравиметрии и магнитометрии о восстановлении субгоризонтальных поверхностей раздела физических свойств в модели слоистой геологической среды. Основной результат исследований диссертанта – создание программно-алгоритмического обеспечения для быстрого и устойчивого численного решения систем нелинейных уравнений большой размерности, к которым сводятся эти задачи. Разработанный комплекс программ использует современные технологии параллельного программирования OpenMP.

Актуальность темы исследований

Результаты гравиметрии и магнитометрии несут важную информацию о физико-геологических неоднородностях, расположенных в земной коре и верхней мантии. Использование этой информации в комплексе с данными других геолого-геофизических методов повышает экономическую эффективность геологоразведочных работ на всех стадиях исследования недр Земли. Темпы совершенствования вычислительной техники, развитие методов обработки цифровой и графической информации существенно влияют на методы решения различных геологических задач, направленных на изучение глубинного строения крупных регионов и Земли в целом, прогнозирование, поиски и разведку месторождений полезных ископаемых.

Результативность геофизических исследований тесно связана с совершенствованием процесса извлечения информации из результатов полевых измерений, а проблема разработки эффективных компьютерных технологий интерпретации, развивающих новые положения теории интерпретации гравиметрии и магнитометрии, адекватных реальной геофизической практике, является весьма актуальной.

При глубинных исследованиях литосферы и изучении нефнегазоносных территорий интерпретация геопотенциальных полей осуществляется в рамках модельных представлений о субгоризонтально-слоистой геологической среде, т.е. используются решения прямых и обратных задач гравиметрии (магнитометрии) "структурного" типа. Обратные задачи "структурного" типа характеризу-

ются высокой степенью неоднозначности, как правило для их решения используется метод автоматизированного подбора, а формирование начальной геоплотностной (геомагнитной) модели проводится на основе имеющейся априорной информации (материалов глубокого бурения, сейсморазведки МОГТ, электроразведки МТЗ). Для исследования больших территорий и обеспечения необходимой детальности построения интерпретационных моделей требуются весьма значительные затраты времени, которые могут быть снижены за счет применения технологий параллельных вычислений.

В диссертационной работе предлагаются усовершенствованные методы решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии "структурного" типа, применение которых существенно расширяет возможности рассматриваемых геофизических методов при математическом моделировании сложно построенных геологических сред и повышает эффективность решения широкого круга как геокартировочных, так и поисковых геологических задач. В соответствии с вышесказанным можно с уверенностью утверждать о высокой актуальности темы диссертации В.Е. Мисилова.

Цель и задачи исследований

Целью исследований являлось создание эффективных итерационных градиентных методов и параллельных алгоритмов решения нелинейных интегральных уравнений применительно к обратным задачам гравиметрии и магнитометрии "структурного" типа и их реализация в виде комплекса программ, предназначенного для решения различных задач прикладной геофизики. Диссертантом были успешно решены следующие основные задачи:

- разработаны новые экономичные итерационные методы решения обратных задач – линеаризованный метод сопряженных градиентов и покомпонентный метод градиентного спуска, а также их регуляризованные варианты, предназначенные для восстановления одной контактной поверхности по предварительно выделенной составляющей аномального физического поля;
- предложены варианты линеаризованных градиентных методов с весовыми множителями: методы наискорейшего спуска и минимальной ошибки, модифицированные методы наискорейшего спуска и сопряженных градиентов, позволяющие осуществлять совместное восстановление нескольких контактных поверхностей в изучаемом объеме геологической среды;
- реализован и апробирован комплекс программ решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии о нахождении поверхностей раздела сред на основе предложенных методов, функционирующий на многоядерных вычислительных системах.

Следует отметить, что круг задач, решение которых представлено в диссертационной работе, представляет несомненный интерес как с теоретических, так и с практических позиций.

Научная новизна и практическая ценность результатов

Научная новизна диссертационной работы В.Е. Мисилова заключается в теоретической разработке и реализации новых эффективных методов решения нелинейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии "структурного" типа, предназначенных для количественной интерпретации геофизических данных большой размерности (~10^6 точек задания поля) на современных суперкомпьютерах. В математической формулировке эти задачи сводятся к минимизации функции большого числа переменных в некоторой области, заданной набором ограничений типа неравенств или равенств. В общем случае они являются условно-корректными (по А.Н. Тихонову), неустойчивыми и не имеют единственного решения.

В вычислительном плане процесс минимизации сводится к решению систем нелинейных уравнений с приближенно заданной правой частью (т.к. входящие в нее значения аномального гравитационного или магнитного поля всегда содержат неустранимые помехи аппаратурно-методического и геологического происхождения). Диссертантом строится функционал, который минимизируется итерационным методом спуска, с использованием начального приближения (стартовой физико-геологической модели). В работе представлены оригинальные алгоритмы, позволяющие получать устойчивые геологически-содержательные решения обратных задач при сравнительно небольших временных затратах: линеаризованный метод сопряженных градиентов, покомпонентный градиентный метод, градиентные методы с переменными весовыми множителями.

Необходимо отметить, что диссертант весьма успешно использовал в своих разработках идею локальных поправок И.Л. Пруткина, существенно ускоряющую скорость вычислений при восстановлении одной контактной поверхности. Несомненный интерес представляет использование весовых коэффициентов для каждой из границ и для отдельных узлов сетки при работе с более сложными геоплотностными (геомагнитными) моделями. В одной из обратных задач магнитометрии В.Е. Мисилов использовал наиболее адекватное реальной геофизической практике представление о произвольном направлении вектора эффективной намагниченности $\mathbf{J}_{эф}$ моделируемой контактной поверхности. Это отвечает типичной ситуации для подавляющего большинства горных пород, когда резкое преобладание индуцированной намагниченности приводит к ориентировке $\mathbf{J}_{эф}$ по направлению нормального магнитного поля Земли в регионе.

Все программно-алгоритмическое обеспечение реализовано для многоядерных процессоров, проведен анализ ускорения и эффективности параллельных программ. Практическая ценность исследований заключается в возможности применения этого программно-алгоритмического обеспечения для количественной интерпретации геопотенциальных полей в пределах больших территорий, с целью решения различных геологических задач.

Очень важно, что созданное программно-алгоритмическое обеспечение предназначено для эксплуатации на компьютерах, оснащенных многоядерными процессорами, что достигнуто с помощью технологии OpenMP и средств компилятора Intel C++ Compiler. Выбранный типичный размер сетки $10^3 \times 10^3$ обеспечивает решение большинства задач, встречающихся в геофизической практике.

Оппоненту известны многочисленные примеры использования созданного В.Е. Мисиловым комплекса программ для получения новой геологической информации о глубинном строении Уральской складчатой области и обрамляющих ее территорий (совместно с Лабораторией математической геофизики ИГФ УрО РАН).

Обоснованность основных положений диссертации

В процессе проведения исследований, а также при изложении полученных результатов диссертант опирался на известные элементы и положения из математики, физики, вычислительной математики, прикладной геофизики и программирования. Выполнен обзор существующих методов количественной интерпретации геофизических данных, осуществлено теоретическое описание постановок обратных задач и методов их решения и проведен большой объем вычислительных экспериментов. Убедительно доказаны преимущества применения созданных алгоритмов для решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии на сетках большой размерности. Эти преимущества заключаются в устойчивой работе с большими массивами исходных данных, высокой точности получения приближенных решений, повышенной скорости вычислений (за счет меньшего числа итераций) и возможности получения различных вариантов интерпретационных построений. Достоверность результатов подтверждается хорошо согласующимися между собой результатами вычислительных экспериментов, проведенных различными методами. Все вычислительные эксперименты объективно характеризуют преимущества алгоритмов В.Е. Мисилова, их результаты наглядно представлены в виде рисунков и таблиц. Также не вызывает сомнений возможности использования разработок диссертанта при работе с реальными материалами геофизических съемок, где значения интерпретируемых полей осложнены помехами различной природы.

Представленные в диссертации результаты прошли апробацию на российских и международных конференциях, а также при рецензирование опубликованных статей, докладов и тезисов.

Основные замечания по диссертации

1. Т.к. рассматриваемые в работе обратные задачи "структурного типа" всегда решаются в пределах ограниченного объема изучаемой геологической среды, представление уравнения асимптотической плоскости $z = h$ в виде $\lim_{|x|+|y|\to\infty}|\xi(x,y) - h| = 0$ для границы $\xi(x,y)$ не вполне корректно. В дан-

ном случае лучше говорить о минимуме среднеквадратического отклонения границы при построении этой плоскости в пределах интерпретационной модели или использовать близкие критерии. С чисто геологических позиций рассматривать наличие горизонтальных асимптот на бесконечности у границ раздела физических свойств нельзя.

2. При восстановлении одной контактной поверхности по зашумленному модельному гравитационному полю отсутствуют сведения о типе помех. Если закон статистического распределения помех был близок к нормальному при нулевом математическом ожидании, то выбранный диссертантом минимизируемый функционал всегда обеспечивает высокую помехозащищенность решения обратной задачи. В противном случае (а геологическая помеха далеко не всегда отвечает закону Гаусса) результат может быть существенно худшим.

3. Представленные в диссертационной работе оценки точности восстановления одной границы раздела на модельных примерах (задачи 1–3, разделы 3.3.2.–3.3.4) не включают в себя погрешность, возникающую за счет приближенного выделения аномального эффекта, обусловленного этой границей, путем аналитического продолжения поля (метод Мартышко–Пруткина, раздел 1.3).

4. Использование в качестве показателя качества решения обратной задачи относительной нормы невязки полей не позволяет сопоставлять точность получаемых решений с предполагаемым уровнем помех в исходных данных (как правило, отождествляемым со среднеквадратической погрешностью определения аномалий Буге или среднеквадратической погрешностью магнитной съемки).

5. В практическом примере решения структурной обратной задачи гравиметрии (задача 6, раздел 3.3.7) для Восточной части Среднего Урала (размер площади 62×145.75 км^2, сетка 82×108) применяется необоснованное фактическим материалом сгущение сети задания исходных данных (вероятно – за счет интерполяции), искусственно повышающее ее размерность. Выполненные практически на всей территории Российской Федерации гравиметрические съемки масштаба 1:200 000 характеризуются плотностью сети ~1 пункт на 8-10 км^2 и ниже.

6. Использование модели "плоской Земли" при моделировании глубинного строения площади размером 360×636 км^2 (задача 7, раздел 3.3.8) может являться источником заметных погрешностей в интерпретационных построениях. Здесь можно сослаться на мнению академика В.Н. Страхова, рекомендующего выполнять учет шарообразности Земли при изучении площадей, имеющих поперечные размеры более 100 км.

7. Имеется ряд замечаний редакционного характера, которые были высказаны автору.

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств рассматриваемой диссертации.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация В.Е. Мисилова представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решен ряд *актуальных* задач, связанных с развитием методов количественной интерпретации геолого-геофизических данных, основанных на итерационных методах приближенного решения обратных задач гравиметрии и магнитометрии "структурного типа". Использованные в работе методы, базирующиеся на передовых достижениях вычислительной математики, обеспечивают устойчивое приближенное решение систем алгебраических уравнений большой размерности при сравнительно небольших временных затратах. Это позволяет успешно решать задачи локализации источников поля и расчленения геологического разреза в 3D варианте для значительных по размерам территорий. Созданный комплекс программ, базирующийся на современных технологиях параллельного программирования, может найти широкую область применения для решения различных геологических задач. В частности, обратная задача гравиметрии для одной контактной поверхности может использоваться при поисках и разведке россыпей золота и благородных металлов.

Научная новизна и *практическая значимость* диссертационной работы находятся на высоком уровне, отвечающем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям по физико-математическим наукам. Получены оригинальные результаты в областях математического моделирования, численных методов и программирования при решении обратных задач гравиметрии и магнитометрии (что полностью отвечает формуле специальности 05.13.18 и п.п. 3,4,5,7 паспорта специальности). Результаты исследований можно классифицировать как *научное достижение* в области разработки математических методов и программно-алгоритмического обеспечения, использующихся при количественной интерпретации геофизических данных большой размерности. Все три защищаемых положения полностью раскрыты в тексте диссертации. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание работы. Автореферат и 19 публикаций (в т.ч. 10 – в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК и базы данных SCOPUS, WoS) отражают основное содержание диссертационной работы. Основные научные положения докладывались на международных, российских и региональных научных конференциях и семинарах.

По своему содержанию, научной новизне и практической ценности полученных результатов диссертация Мисилова Владимира Евгеньевича " Итерационные методы и параллельные алгоритмы решения нелинейных обратных задач гравиметрии и магнитометрии " соответствует всем критериям, указанным в Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней", а ее автор, несомненно, *заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук* по специальности

05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Я, Долгаль Александр Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
доцент, главный научный сотрудник
лаборатории геопотенциальных полей
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Горный институт
Уральского отделения
Российской академии наук
(ГИ УрО РАН) *Долгаль Александр Сергеевич*

614007, Пермский край, г. Пермь,
Сибирская, 78а, ГИ УрО РАН
Телефон: (342) 216-10-08
e-mail: *dolgal@mi-perm.ru*

10 марта 2017 г

Подпись Долгаля Александра Сергеевича заверяю:
Ученый секретарь ГИ УрО РАН,
кандидат геолого-минералогических наук *Степанов Ю.И.*