

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук В.Н. Глазнева на диссертацию Цидаева Александра Григорьевича «Прямые и обратные задачи гравиметрии при построении плотностных структур в земной коре», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Создание реалистичных трёхмерных моделей строения литосферы Земли возможно только на основе использования комплекса достоверных наблюдательных данных геофизики и применения эффективных алгоритмов решения прямых и обратных задач геофизики. Именно эти проблемы и были обозначены диссертантом в качестве основных целей исследования – разработки алгоритмов и программного обеспечения, ориентированных на развитие технологии эффективного компьютерного построения трёхмерных плотностных моделей на основе гравитационных и сейсмических данных. Несомненно, что поставленные цели исследования являются актуальными и имеют важное научное значение для развития вычислительной геофизики, в том числе в плане эффективного импортозамещения зарубежного программного обеспечения, используемого в прикладных геолого-геофизических исследованиях.

В диссертационной работе автор сформулировал и решил ряд научных задач, обеспечивших достижения поставленной цели, среди которых можно отметить следующие:

1. Обобщение метода локальных поправок для решения обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей в трёхмерной постановке.
2. Разработка ряда вычислительных аспектов комплексной трёхмерной

интерпретации гравиметрических и сейсмических данных при создании моделей земной коры и верхней мантии с неоднородным слоисто-блоковым строением.

3. Создание специализированного программного обеспечения, реализующего весь разработанный автором комплекс методов интерпретации геофизических данных в единой оболочке.

Цель работы и решённые научные задачи соответствуют современным тенденциям развития вычислительной геофизики, ориентированным на создание сложных комплексных моделей строения литосферы на основе использования современных высокоэффективных численных методов решения обратных задач геофизики.

В работе получены следующие **научные результаты**, вынесенные автором на защиту:

**1. Обобщённый метод локальных поправок для обратной структурной задачи гравиметрии позволяет находить решение задачи, как для приповерхностных, так и глубокозалегающих границ и использовать неплоскую границу начального приближения.** Обобщение проведено на основе предложенного автором понятия «структурного интеграла», который, в свою очередь, обобщает различные постановки задачи о плотностном контакте. Для реализации сформулированного обобщённого подхода, автором предложено использовать конечно-элементный принцип решения структурных задач гравиметрии, а также применить в качестве нулевого приближения априорные сейсмометрические данные о поверхности изучаемого контакта (скоростного раздела среды). В рамках такого подхода автором обоснованы два вида постановок итерационного процесса в методе локальных поправок, обеспечивающих гарантированное решение обратных задач, как для глубокозалегающих, так и для приповерхностных структурных границ раздела.

Использование обоих вариантов метода локальных поправок убедительно протестировано на реалистичных модельных примерах. Автором рассмотрен случай, когда формула для глубокозалегающих границ не может быть применима, поскольку граница выходит на поверхность, но при этом итерационный процесс с использованием формулы для приповерхностного контакта сходится с невязкого порядка  $10^{-6}$  уже после первой итерации. Другой показательный модельный пример демонстрирует уменьшение невязки восстановления плотностного контакта в зависимости от имеющейся априорной (сейсмической) информации. Использование построенной по нескольким профилям границы нулевого (сейсмического) приближения демонстрирует существенное уменьшение невязки обратной задачи гравиметрии для контактной поверхности. Эти примеры наглядно свидетельствуют об эффективности принципов комплексной интерпретации в построении трёхмерных плотностных моделей литосферы.

Наряду с модельными примерами, автором даны убедительные практические примеры уточнения положения структурных коровых границ раздела в моделях, построенных по реальным данным.

В целом развитый автором подход на основе понятия о «структурном интеграле», несомненно, является значимым вкладом в обоснование вычислительных аспектов использования метода локальных поправок при решении обратных задач для потенциальных полей.

**2. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для построения плотностных разрезов по сейсмическим данным с последующим сведением их в трёхмерную модель позволяют создавать геофизически содержательные модели распределения плотности в земной коре.** В отличие от традиционного подхода, принятого в практике структурно-картировочных и разведочных геофизических работ, основанного на построении разломно-блоковых моделей, предложенная в диссертации методи-

ка позволяет получать более содержательные градиентные модели распределения плотности в литосфере. Предложенная автором методика включает в себя ряд последовательных шагов комплексной обработки гравиметрических и сейсмических данных по системе двухмерных профилей: уточнение характера зависимости между скоростью и плотностью изучаемой среды; выделение мантийных неоднородностей; интерполяцию сводных данных в трёхмерную сетку и дальнейшую послойную интерполяцию для заполнения пространства среды между опорными профилями. Правомерность сформулированной методической последовательности продемонстрирована автором в диссертации на большом количестве практических моделей, построенных с использованием разработанной технологии.

В рамках общей проблемы построения плотностных разрезов по сейсмическим данным, следует отметить развитие автором методов расчёта аномального литостатического давления в двухмерном и трёхмерном вариантах, позволяющих изучать региональные мантийные плотностные неоднородности. Выявление таких неоднородностей в верхней мантии, опирающееся на данные анализа аномалий литостатического давления, имеет принципиальное значение для локализации корневых частей крупных тектонических структур, развитых в конкретном изучаемом регионе. Результативность такого подхода убедительно продемонстрирована автором на практических примерах по совокупности сейсмических профилей для Тимано-Печорской плиты и северной части Уралид.

**3. Разработано программное обеспечение, позволяющее в частично-интерактивном режиме осуществлять построение трёхмерных моделей распределения плотности на основе двумерных сейсмических данных.**

В четвёртой главе диссертационной работе приводится подробное описание авторского программного комплекса, предназначенного для построения трёхмерных плотностных моделей земной коры по совокупности двумер-

ных сейсмических профилей. В данном комплексе программ реализованы все изложенные в диссертации алгоритмы и вычислительные схемы, обеспечивающие гарантированное решение поставленной задачи гравиметрического моделирования. Следует особо отметить, что программное обеспечение, **реализующее** обобщённый метод локальных поправок, составлено на основе технологий параллельных вычислений, что позволяет эффективно использовать его на суперкомпьютерах. Автором приводятся полученные сравнительные данные скорости вычислений в сравнении с однопоточным вариантом, которые показали ускорение счёта почти на три порядка для реального суперкомпьютера на базе 8 видеокарт Nvidia M2050.

Несомненным достижением автора является также разработка общей оболочки вычислительного комплекса, позволяющая управлять ходом вычислений и оперативно корректировать параметры различных этапов решения задач, что позволяет автоматизировать рутинные операции.

Рецензент считает, что реализованный автором подход к созданию программного обеспечения комплексной инверсии данных гравиметрии и сейсморазведки нуждается в дальнейшем развитии и расширении возможностей, в связи с возникшими потребностями замещения импортного программного обеспечения, пока преобладающего в отечественной геофизической производственной практике.

Основные научные результаты достаточно **полно опубликованы** в рецензируемых научных изданиях – всего 23 статьи, в изданиях входящих в перечень Scopus, Web of Science и список ВАК. В перечень работ автора входит также одна коллективная монография, реализующая практические примеры применения развитых технологий решения обратных задач.

Автор неоднократно принимал участие с докладами на международных

научных конференциях и семинарах по прикладной математике и проблемам вычислительной геофизики.

Структурно диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы – 172 страницы текста, 76 рисунков, 6 таблиц. Библиографический список содержит 158 наименований. Оформление работы соответствует предъявляемым требованиям, все моменты исследования и результаты достаточно подробно и понятно изложены.

Представленный автореферат диссертации соответствует собственно содержанию диссертационной работы.

Существенных недостатков работа не содержит, тем не менее, у оппонента имеются **замечания**, сформулированные ниже.

1. В модельных примерах главы 1 не выполнено сравнение результатов восстановления одной и той же структурной границы на основе двух предложенных видов итерационных процедур метода локальных поправок. Исключением здесь является модельный примера № 4, в котором оговаривается, что применение формулы в «классическом» варианте невозможно.
2. Автор, ссылаясь на работы М.Е. Артемьева и его коллег, обосновывает глубину изостатической компенсации в мантии на уровне 80 км, как единую для всей территории исследований, включающей крупные разнородные тектонические единицы. Справедливо отмечая, что «вопрос о глубине уровня, на котором наблюдается изостатическая компенсация» является дискуссионным (стр. 68), автор приводит значения плотности в мантийных блоках по конкретным интерпретационным профилям (рисунки 26, 31, 47, 57) именно для выбранного единого уровня в 80 км. При этом не

рассматриваются термические модели литосферы, во многом определяющие реологию нижнекорового и верхнемантийного геоматериала, а также данные палео- и современных вертикальных движениях дневной поверхности. Рецензент предполагает, что включение таких данных усилило бы выводы по тектонической эволюции всего региона исследований.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки проведённых исследований и скорее являются пожеланиями автору для дальнейшей работы в избранном направлении.

Рецензент считает, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой (от научной идеи до практического применения), в которой решена важная научная проблема по разработке новых методов и алгоритмов для построения плотностных структур в земной коре. Разработанные диссертантом алгоритмы и программы всесторонне протестированы на модельных примерах и использованы при обработке практических материалов по региону. Корректное использование аппарата вычислительной математики и широкая апробация на практических данных позволяют сделать вывод о высокой степени обоснованности и достоверности проведённого исследования. Полученные в диссертации результаты подтверждают обоснованность защищаемых положений, полностью отражены в опубликованных работах.

Рецензент считает, что диссертационная работа Цидаева Александра Григорьевича «Прямые и обратные задачи гравиметрии при построении плотностных структур в земной коре» соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (физико-математические науки) и соответствует критериям п. 9 По-

ложения о присуждении учёных степеней в УрФУ, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

Глазнев Виктор Николаевич,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор кафедры геофизики геологического факультета  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет».  
394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1.  
Тел. +7 (473) 220-83-85.

Email: [glaznev@geol.vsu.ru](mailto:glaznev@geol.vsu.ru)

Дата « 20 » августа 2024

 / Глазнев В.Н. /

Подпись сотрудника геологического факультета  
Воронежского государственного университета  
В.Н. Глазнева удостоверяю

