

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Чепиго Льва Станиславовича
«Методы анализа гравитационного поля с учетом сферичности»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.6.9 – Геофизика (технические науки)

Актуальность темы диссертации

Исследования диссертанта включают в себя разработку новых подходов к решению прямой и обратной задач гравиразведки с использованием сферической системы координат в 2D и 3D вариантах, а также реализацию созданных алгоритмов в виде программного комплекса GravMagInv. Сферическое приближение формы уровенной поверхности при количественной интерпретации гравитационных аномалий не только отвечает условиям глобального моделирования глубинного строения Земли и небесных тел, но также может использоваться на стадии региональных геофизических исследований масштаба 1:1 000 000 – 1:200 000 в процессе геологоразведочных работ. В последнем случае значительные размеры изучаемой территории часто не позволяют пренебречь кривизной земной поверхности. По мнению В.Н. Страхова сферическое приближение следует применять для площадей с размерами от 100 км в поперечнике и выше.

Следует отметить, что подавляющее большинство современных методов интерпретации данных гравиразведки базируются на модели «плоской Земли» и предусматривают выполнение интерпретационных построений в прямоугольной системе координат. Область применения этих методов ограничена сравнительно небольшими площадями, до 6° по широте, где допускается использование системы плоских прямоугольных координат Гаусса-Крюгера. Таким образом, тема диссертационной работы Чепиго Л.С. является весьма актуальной, т.к. предусматривает решение важных научных и прикладных с использованием данных гравиметрических наблюдений на основе новых теоретических разработок.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертационной работе Чепиго Л.С. представлено к защите три положения. Первое из них содержит алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для сферической призмы, второе – способы решения обратной задачи гравиразведки для тел правильной геометрической формы в сферической системе координат, третье посвящено подбору сеточной плотностной модели геологической среды методом градиентного спуска, скорость которого представляет степенную функцию от глубины исследования. Анализ содержания опубликованных работ, текста диссертации и автореферата свидетельствует, что все защищаемые положения раскрывают основные составляющие темы исследований, каждое из них является научно обоснованным и аргументированным с теоретических и практических позиций. Все доказательства представленных положений подробно рассмотрены в тексте диссертации и иллюстрируются картами, рисунками, таблицами, а также формулами.

Первое защищаемое положение представляет собой алгоритм решения прямой задачи гравиразведки для сферической призмы (тессероида), базирующийся на аппроксимации набором тонких радиальных стержней. Сферическая призма ограничена частями двух сферических поверхностей с разными радиусами; двумя плоскостями, пересекающимися на полярной оси, положение которых определяется азимутальными углами в экваториальной плоскости; двумя коническими поверхностями с разными зенитными углами с вершиной в начальной точке сферической системы координат. Радиальная составляющая гравитационного поля этого тела выражается в виде тройного интеграла, не имеющего аналитического решения. Для вычисления гравитационного эффекта сферической призмы может использоваться численное интегрирование (в частности – с использованием квадратурных формул Гаусса-Лежандра) или аппроксимация ее многогранником с решением прямой задачи в декартовой системе координат.

Диссертантом предлагается выполнять разбиение тессероида на тонкие радиальные стержни с последующим суммированием их гравитационного

влияния. Этот вычислительный метод сопоставлялся по точности и быстродействию с двумя рассмотренными выше подходами по точности и быстродействию применительно к сфере радиусом 1728 км (Луне). Экспериментально установлено, что для глубин верхнего основания более 50 км, при размерах тессероида $0.7^\circ \times 0.5^\circ$ и вертикальной мощности 2 км, наиболее эффективным является именно разбиение на тонкие стержни. Это позволило в дальнейшем существенно уменьшить вычислительные затраты при изучении геоплотностного строения Луны в классе конечноэлементных моделей.

Второе защищаемое положение объединяет решения обратной задачи гравиразведки для тел правильной геометрической формы в сферической системе координат методом характерных точек. Этими телами в данном случае являются точечный источник (шар) и тонкий радиальный стержень. Диссертантом получены формулы для оценки глубин точечного источника (центра шара) и его массы, а также для определения глубины верхней кромки стержня и его линейной плотности. Также представлены аналитические выражения для решения прямой задачи гравиразведки от этих тел, которые затем могут использоваться в технологиях количественной интерпретации аномалий методом автоматизированного подбора.

Значительный интерес вызывают результаты тестовых вычислений, в процессе которых оценивается глубина точечного источника поля методом характерных точек с учетом и без учета сферичности. В качестве поверхностей, на которых задано гравитационное поле, выбраны сферы радиуса 2000 км, 6371 км и 25000 км (прототипы Луны, Земли и Нептуна). Л.С. Чепигу установил, что замена сферических моделей плоскими приводит к завышению значений глубин источника аномалии. Максимальная относительная погрешность 43% отвечает максимальной глубине источника (500 км) и минимальному радиусу планеты (2000 км). Это убедительно свидетельствует в пользу необходимости использования сферических интерпретационных моделей для целого ряда практически важных случаев.

Отметим, что в 2021 г оппонент показал, что учет сферообразной формы Земли приводит к уточнению результатов пересчета гравитационного поля в

верхнее полупространство на высоту 25 км для одиночного изолированного тессероида более чем на 28%. Эта цифра представляет собой отношение размаха разностного поля к максимальной амплитуде аномалии над центром возмущающего объекта.

Третьим защищаемым положением является метод подбора сеточной геоплотностной модели с использованием зависящей от глубины ячеек скорости градиентного спуска при итерационном решении системы алгебраических уравнений. Использование степенной зависимости от глубины шага градиентного спуска, позволяет избежать негативного эффекта концентрации аномалиеобразующих масс в верхней части разреза. Причиной этого эффекта является широкая эквивалентность обратной задачи для сеточных моделей геоплотностной среды. Данное явление глубоко рассматривалось А.И. Кобруновым с теоретических позиций и получило название «скрытой эквивалентности» (Кобрунов А.И. Математические основы теории интерпретации геофизических данных: учеб. пособие. М.: Центр-ЛитНефтеГаз, 2008). Для борьбы с ним М.С. Жданов достаточно успешно использовал близкий по сути подход - численную реализацию схемы сопряженных градиентов с пересчетом весовой матрицы, т.н. «фокусирующую инверсию» (Жданов М. С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. С. 244–248).

Отличительной особенностью алгоритма, разработанного Чепиго Л.С., является решение прямой задачи в частотной области, существенно повышающее скорость вычислений. Рассмотрена асимптотика времени решения разных типов обратной задачи. По выполненным оценкам при большом количестве элементарных ячеек в модели выполнение преобразования Фурье может сократить затраты машинного времени в 2–4 раза.

В диссертации приведены решения 2D и 3D обратной задачи гравиразведки, в последнем случае – при использовании плоской и сферической поверхностей задания значений интерпретируемого гравитационного поля. Величина показателя степени изменялась от 0 до 2. С

выводом о том, что при выборе оптимального показателя степени требуется использовать априорную информацию о возможной глубине неоднородностей, можно полностью согласиться. Для всех тестовых примеров при определенном значении показателя степени подобраны плотностные модели, достаточно точно локализирующие аномалиеобразующие объекты.

***Оценка научной новизны, практической ценности
и достоверности полученных результатов***

Научная новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений и может рассматриваться в двух разных аспектах. Первый аспект касается совершенствования методики количественной интерпретации данных гравиметрических измерений, второй – построения сеточных плотностных моделей Луны. Отказ от выполнения приближенных оценок параметров аномалиеобразующих тел правильной геометрической формы в прямоугольных координатах, с использованием горизонтальной поверхности относимости – важный и закономерный шаг развития интерпретационно-обрабатывающих компьютерных технологий. Предлагаемый диссертантом математический аппарат является полностью адекватным реальной геофизической практики и представляет собой (по В.Н. Страхову) дальнейшее развитие «геофизического диалекта языка математики».

Значительные перспективы имеет применение в области прикладной геофизики конечноэлементных моделей изучаемого объема (или разреза) геологической среды. Возможности конечноэлементного подхода к решению обратных задач геофизики существенно расширились в XXI веке в связи с ростом вычислительных возможностей компьютером (закон Мура – удваивание производительности процессоров каждые 18 месяцев и развитие параллельных вычислений). Конечноэлементная параметризация моделируемых геологических тел снимает многие ограничения, существующие в традиционных технологиях автоматизированного подбора конфигурации источников в априорно заданных модельных классах тел. Созданный Чепиго Л.С. алгоритм решения обратной задачи гравиразведки для сеточных плотностных моделей,

подавляющий негативное влияние эквивалентности за счет выбора переменного шага наискорейшего градиентного спуска, позволяет получать геологически-содержательные пространственные распределения масс при минимуме априорной информации.

Можно полностью согласиться с мнением диссертанта о том, что «минимизация временных затрат и автоматизация процесса плотностного моделирования – крайне актуальная задача современной гравиразведки». Анализу скорости вычислений в тексте диссертационной работы уделено достаточно много внимания и это является весьма положительным моментом.

Значительный интерес представляют результаты интерпретации аномального гравитационного поля Луны в редукции Буге, полученного при выполнении миссии GRAIL (пространственное разрешение до 0.2°). Были построены две геоплотностные модели небесного тела с шагом по долготе 0.7° , по широте – 0.5° и шагом по глубине 11 км (до центра Луны) и 2 км (до 200 км). Известно, что характерной особенностью литосферы Луны являются масконы, происхождение связывают с ударами крупных космических тел и последующим подъемом уплотненного мантийного вещества. Как правило, масконы находятся под лунными морями, имеющими изометричную форму.

Оценки глубин источников шести гравитационных аномалий над масконами, расположенными в пределах кратеров Гримальди, Бейс-Баллот и Ридберг, а также морей Кризисов, Гумбольдта и Восточное, выполненные методом характерных точек, варьируют в диапазонах от 100 до 196 км (для точечного источника) и от 31 до 63 км (для тонкого радиального стержня). Результаты инверсии гравитационного поля также согласуются с этими оценками и служат подтверждением гипотезы Р. Болдуина о генезисе масконов.

Практическая ценность результатов Чепиго Л.С. определяется тем, что созданные в процессе исследований компьютерные технологии (комплекс программ GravMagInv) могут успешно использоваться при формировании плотностных моделей Земли, других космических тел или их отдельных фрагментов.

Достоверность результатов определяется применением теоретически обоснованного научно-методического аппарата, тестированием созданного программно-алгоритмического обеспечения на модельных и практических примерах, а также согласованием построенных моделей с априорной физико-геологической информацией. Значительный объем выполненных расчетов подтверждает преимущества новых алгоритмов по сравнению с традиционными методами.

Основные замечания по диссертационной работе

1. Приведенная на стр. 20–21 диссертации классификация типов обратных задач далеко не полностью характеризует предмет исследований. Существуют 2D, 2.5, 3D линейные и нелинейные постановки задач, а также т.н. смешанные задачи, в которых требуется совместное определение как эффективной плотности, так и геометрических параметров аномалиеобразующих тел. Также принято выделять три несколько идеализированных класса пространственного распределения масс, отвечающих задачам рудного и структурного типов, а также задачам со сложным (слоисто-блоковым) распределением масс (Гравиразведка. Справочник геофизика). Методы особых точек и не включенные в данную классификацию методы определения гармонических моментов (интегральные, спектральные и аппроксимационные) скорее относятся к способам экспресс-интерпретации гравитационных аномалий.
2. Метод характерных точек является едва ли не самым старым методом оценки параметров аномалиеобразующих объектов правильной геометрической формы. При его описании было бы желательно сослаться не только на две публикации XXI века, но и на классическую работу Шванк О.А., Люстих Е.Н. «Интерпретация гравитационных наблюдений. Теория и практика решения прямой и обратной задачи гравиметрической разведки», изданную в 1947 г.

3. Помимо метода деконволюции Эйлера, существует еще ряд эффективных методов определения особых точек, но в тексте диссертации информация о них отсутствует.
4. По результатам тестирования разных методов решения прямой задачи для тессероида возникают два вопроса. Первый вопрос – какой метод численного интегрирования использовался в данном случае? Методы прямоугольников, трапеций, Симпсона, квадратурные формулы Гаусса и др. имеют разную скорость сходимости. Второй вопрос – почему в качестве параметра для эффективного применения разбиения сферической призмы на тонкие радиальные стержни используется только глубина этого тела (табл. 4, рис. 11), а не расстояние между ним и точкой расчета поля?
5. Формула (31) отвечает только решению прямой задачи гравirazведки в матричном виде. Для линейной обратной задачи значения наблюдаемого поля являются свободными членами системы уравнений и должны находиться в правой части.
6. По тексту работы есть ряд замечаний терминологического характера. Названия «простые модели», «тела простой формы» скорее отвечают телам правильной геометрической формы. «Ручной метод подбора» принято называть неформализованным подбором или методом подбора в диалогом режиме. Термин «Решение плоской обратной задачи гравirazведки... для трехмерных моделей» содержит логическое противоречие, т.к. плоской принято называть 2D обратную задачу гравirazведки.

Заключение

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств диссертации Чепиго Л.С. Она является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, научной новизной и практической значимостью. В диссертации представлено самостоятельное решение актуальной научной задачи разработки новых методов решения прямых и обратных задач в сферической системе координат.

Результаты исследований можно классифицировать как *научное достижение* в области разработки математических методов и программно-алгоритмического обеспечения, использующихся при количественной интерпретации данных гравиметрических исследований Земли и небесных тел. Все три защищаемых положения полностью раскрыты в тексте диссертации. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание работы. Автореферат и 13 публикаций (в т.ч. 4 – в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ и включенных в базы данных SCOPUS, WoS, RSCI) отражают основное содержание диссертационной работы. Также имеются 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные научные положения докладывались на международных, российских и региональных научных конференциях и семинарах.

Текст диссертации написан грамотным профессиональным языком, содержит все необходимые формулы и высококачественные цветные рисунки. Иллюстративный материал и таблицы хорошо дополняют содержание разделов.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9 – Геофизика (технические науки, пп. 16, 17), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а также оформлена, согласно требованиям «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова».

Таким образом, соискатель Чепиго Лев Станиславович *заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук* по специальности 1.6.9 – Геофизика (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории геопотенциальных полей Горного института Уральского отделения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН

ДОЛГАЛЬ Александр Сергеевич

«21» ноября 2023 г

Контактные данные:

тел.: +7(342) 216 10 08, e-mail: dolgal@mi-perm.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Адрес места работы:

614007, Российская федерация, Пермь, Сибирская, 78а.

Тел.: +77(342) 216 75 02; e-mail: arc@mi-perm.ru

Подлинность подписи Долгаля А.С. заверяю:

Главный специалист

отдела кадров «ГИ УрО РАН»

С.Г. Дерюженко

