

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени доктора геолого-  
минералогических наук**  
**ЛЫГИНА ИВАНА ВЛАДИМИРОВИЧА на тему:**  
**«ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ**  
**ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ»**  
**по специальности 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки)**

Представленная диссертация **Лыгина Ивана Владимировича** состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 233 страницы текста, включая 67 рисунка, 8 таблиц, список литературы из 261 наименований. Список основных работ автора по теме диссертации состоит из 31 наименований, включая 22 работы в журналах, индексируемых в базе ядра РИНЦ, и входящих в список, рекомендованный МГУ для данной специальности, 6 учебных пособий, и другие издания.

Диссертация Лыгина И.В. посвящена развитию относительно новой области знаний – пространственно-временным вариациям гравитационного поля, которую внедрение спутниковых измерений вывело на качественно новый уровень, позволяющий получать результаты, недоступные ранее. Предлагаемые соискателем способы обработки данных и методика их интерпретации формируют комплекс чрезвычайно востребованных процедур для геодинамического анализа широкого класса параметров, меняющихся во времени. Результаты работы могут применяться не только для геодинамически активных районов, но и для любых регионов с практическими и фундаментальными целями при оценке природных рисков и ранее неизвестных причинно-следственных связей между явлениями.

**Актуальность** работы определяется тем, что современный инструментальный комплекс получения данных гравиразведки вышел на качественно новый уровень, который позволяет проводить измерения с точностью в доли микрогалл, недостижимые до этого при наличии достоверной калибровки гравиметров. Точность новых данных требует развития алгоритмов их обработки, повышения эффективности математического аппарата, новых подходов к совместной интерпретации

данных различной природы и решений прямых и обратных задач. Особое место занимают развитие, связанное с появлением измерений временных вариаций силы тяжести, которое открывает принципиально новые горизонты решаемых гравиразведкой задач.

**Новизна и фундаментальная значимость** работы определяется разработанными алгоритмами обработки новых точных данных в трехмерном пространстве на основе метода градиентного спуска с переменной скоростью и определения параметров источника с учетом сферичности пространства, на котором получены данные. Самостоятельную научную ценность представляет собой введенный соискателем метод корректирующей весовой функции на основе априорных данных других методов, что играет роль пространственного стабилизатора для получаемых решений при геологической интерпретации. Разработаны способы долговременных стационарных наблюдений и обработки данных временных вариаций спутниковых миссий типа Грейс.

Фундаментальная значимость исследований определяется их новизной, и, соответственно, тем, что полученные результаты и разработанные новые алгоритмы выводят область знаний, к которой относится работа Лыгина И.В., на качественный новый уровень. Это также расширяет и практическую значимость работы в силу того, что разработанные способы обработки данных и новые алгоритмы встроены в новое программное обеспечение GravMagInv, которое делает доступным их использование широкому кругу специалистов и повышению качества анализа потенциальных полей при решении как производственных задач, так и академических проблем. Новые подходы внедряются в программу обучения студентов, что увеличивает практическую значимость работы на длительную перспективу.

**Личный вклад** автора в решении и постановке задач работы проиллюстрирован в полной мере и отражен в публикациях, учебных пособиях и апробациях работы, а также в реализации полевых экспериментальных работах.

**Введение** содержит все необходимые сведения о целях, задачах, защищаемых положениях, научной новизне работы, ее практической

значимости и достоверности результатов, личном вкладе автора и апробации работы, соответствующие требованиям МГУ. **Глава 1** имеет вводный характер, а также в ее разделах 1.3 и 1.4 дан обзор методик, модификация которых использована для защищаемых положений 3 и 4. **Глава 2** посвящена детальному описанию методики и алгоритмам решения прямых и обратных задач гравиразведки и подхода к геоплотностному интерактивному моделированию с примерами их реализации (защищаемые положения 1 и 2). Глава 3 посвящена детальному анализу материалов по защищаемым положениям 3 и 4 и возможностям геодинамического анализа. Результаты работы суммированы в **заключении**.

**Глава 1 (частично защищаемые положения 3 и 4)**, кроме методики обработки данных, содержит иллюстрацию геодинамического анализа осредненного поля GRACE в районе с проекцией активного мантийного плюма на поверхность в районе рифта Афар. Представленная методика создает разнообразные перспективы изучения многих периодических тектонических явлений (магматизм, разрядка тектонических напряжений, сейсмический цикл, компонентные данные GPS и проч.) и интерпретации их генезиса в зависимости от плотностного и реологического состояния мантии, их определяющего. Глава также содержит описание методов калибровки относительных гравиметров в условиях долговременных повторных наблюдений, которые позволяют выявить вклад природных условий в наблюдения при осуществлении гравиметрического мониторинга.

**Глава 2 (защищаемые положения 1 и 2)** содержит детальное описание методики и алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиразведки и подхода к геоплотностному интерактивному моделированию с примерами их реализации. Подход, основанный на введении в моделирование ограничителей простого потенциального расчета моделей, проиллюстрирован примером, где на разрезе с приподнятой кровлей фундамента наблюдается снижение аномального гравитационного поля. Это предельно ясно демонстрирует необходимость тех регуляризационных процедур, которые предлагает соискатель. Полиэтапность этих процедур с постепенным их усложнением в зависимости

от типа структурного каркаса среды, получаемого сейсмическими или другими методами, исчерпывающе раскрыта в работе. Она показывает новые возможности в решении обратных задач с помощью интерактивного и частично автоматизированного способов задания естественных ограничителей (регуляризаторов) на инверсию гравитационного поля. Методика особенно эффективно может быть использована для осадочных бассейнов на шельфе и континенте с полученными сейсморазведкой структурными поверхностями основных отражающих горизонтов, которые задают точные геологические данные для формирования корректирующей функции и уменьшения числа альтернативных моделей инверсии гравитационных данных.

В частности, результативность данного подхода продемонстрирована на примере Северного Сахалина в условиях редкой и старой сети сейсмических профилей при расчете структурной поверхности даехуриинского палеогенового горизонта с низкочастотной фильтрацией исходного поля и привязкой результирующей поверхности и местам определения кровли горизонта по данным скважин. Подход к интерпретации с учетом избыточных плотностей после расчета поля от известных структурных поверхностей показан на примере Енисейско-Хатангского прогиба рифтового генезиса.

Наиболее информативным по априорной геолого-геофизической информации является пример Баренцева моря и в особенности его глубинных горизонтов. Множество информации позволило изучить корреляционные связи между параметрами и построить нейронные сети для получения структурной информации при помощи машинного обучения на опорных разрезах, и далее распространить этот результат на всю исследуемую площадь с выявлением морфологии поверхностей. В результате получена модель границы М с наименьшим отклонением по эталонным разрезам.

На примере Восточной Сибири проведено моделирование эффектов от неоднородной верхней части разреза и учет их маскирующего эффекта в форме статических поправок к основным глубинным разрезам МОВ ОГТ для горизонтов под приповерхностными магматическими телами.

**Глава 3 (защищаемые положения 3 и 4).** Раздел 3.1 посвящен описанию пространственно-временной характеристике объекта (дворик МГУ) в зависимости от условий, меняющихся сезонно. Получено убедительное доказательство защищаемого положения 3.

Временные ряды спутниковых гравитационных наблюдений появились только с начала 2000-х годов и возможности этого типа данных активно раскрываются, формируя недоступные ранее прогностические возможности, по оценке природных рисков. Эта область знаний по существу является пионерской, и научные разработки соискателя показывают смежным исследованиям вариант физически обоснованной интерпретации для многих природных явлений. Фундаментальные возможности этой методики обширны и их предстоит начать использовать специалистам в разных областях. Особо хочется выделить, что это формирует четкую причинно-следственную направленность исследований в цепочке явлений от мантийных неоднородностей и их вариаций через механизм передачи напряжений и деформаций к поверхности сфероида и формированию наблюдаемых на поверхности структурно-тектонических последствий.

Изучение периодических явлений, составляющих основу неотектоники (магматизм, разрядка тектонических напряжений, сейсмический цикл, компонентные данные GPS и проч.) и их интерпретации на основании связи с плотностным и реологическим состоянием мантии является передовой областью с возможностью открытия новых причинно-следственных связей и количественной их оценки. Работа Лыгина И.В. открывает обширные перспективы в этом направлении.

Они проиллюстрированы данными из одного из наиболее геодинамически активных регионов мира – западной границы Северо-Американского континента. Обнаруживается привязка глубокофокусной и наиболее высокобальной сейсмичности и всего сейсмического цикла к вариациям силы тяжести, сфокусированным на наиболее активных участках границы континент-океана со сдвиговым типом и областью перехода к зонам фронтальной субдукции. Сделано обоснованное предположение о подлитосферном генезисе вариаций, продуцирующих сейсмическую

активность. Показано глубинное распределение гипоцентров на сейсмотомографическом скоростном срезе. Комплексная интерпретация результатов может быть расширена с привлечением других типов данных, для которых фиксируются временные вариации.

Особую значимость имеет анализ данных для Северо-Африканского и Ближневосточного регионов, которые образуют сложнейший узел из геодинамически активных межплитных границ разного типа и их сочленений. Отмечается, что области этого региона – Аравийская плита и Каспийский регион – имеют сходное «поведение» по вариациям гравитационного поля, которое в настоящий момент может интерпретироваться различными гипотезами, для уточнения которых временного ряда явно недостаточно. Но проведенный сравнительный анализ закладывает отличную основу для развития геодинамических исследований на длительную перспективу и повышение качества прогнозов катастрофических событий. Также обращает внимание повышенная частота длинопериодных вариаций на Анатолийской плите. Приводимый соискателем механизм, объясняющий природу вариаций связан с автономными движениями блоков литосферы и выглядит доказанным.

Диссертация представляет собой четкое системное изложение всех аспектов исследования и его результатов, но к ее содержанию имеется несколько **замечаний**, часть которых носит технический или дискуссионный характер.

1. Выступы структурной поверхности М Баренцева моря (рис.2.22) и их смещение относительно осей мегапрогибов (рис.2.23) не проиллюстрировано в полной мере. Было бы информативно на карте границы М показать эти оси на рис.2.22 или еще какие-либо структурные элементы, например, разломную сеть, сегментирующую кору, залегающую на мантии с такой неоднородной геометрией. Поскольку речь идет о древней рифтовой системе (или нескольких ортогональных системах), целесообразно показать на рис.2.23 возраст структур.

2. Существует достаточно большой выбор сейсмотомографических моделей по Р-волнам и S-волнам различной детальности. При расчете

разрезов по разным моделям глубинное распределение скоростей сильно отличается. В представленной работе нет обоснования для выбранной модели LLNL\_G3Dv3.

3. Не ясно, насколько оправдано сопоставление профиля с вариациями по восточной части Тихого океана с моментами сильных событий на его западном обрамлении. Можно ли по результатам этого сопоставления говорить о синхронном влиянии механизма вариаций плотности на все планетарные структуры? Или о наличии пауз в сейсмической активности в периоды смена знака вариаций?

Несмотря на замечания, диссертация оставляет впечатление очень качественно выполненной и хорошо продуманной работы с большой **достоверностью и обоснованностью выводов и защищаемых положений** и, главное, дающей перспективу на развитие в затронутой новой области знаний, в форме методов и алгоритмов, которые будут применяться многими исследователями. Все защищаемые положения работы выглядят доказанными. Новизна, фундаментальная и практическая значимость, основанные на тщательно продуманных методиках, очевидны и дополняют имеющуюся базу знаний по затронутой теме и чрезвычайно важны решения современных геодинамических проблем. Основные результаты работы опубликованы в научных работах, указанных в автореферате и диссертации. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Указанные ранее замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки), 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 **Лыгин Иван Владимирович** заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки).

**Официальный оппонент:**

доктор геолого-минералогических наук,  
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геоморфологии и тектоники дна океанов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Российской академии наук (ГИН РАН)

**СОКОЛОВ Сергей Юрьевич**

(подпись)

25 ноября 2024 года

Контактные данные:

тел.: +7(495) 959-02-31, e-mail: [geophys@ginras.ru](mailto:geophys@ginras.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 25.00.03. Геотектоника и геодинамика.

Адрес места работы:

119017, Москва, Пыжевский переулок, дом 7, строение 1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук (ГИН РАН).

Тел.: +7(495) 953-18-19; E-mail: [gin@ginras.ru](mailto:gin@ginras.ru)

Подпись сотрудника ГИН РАН С.Ю. Соколова удостоверяю.

Заведующая канцелярией ГИН РАН

Букашкина З.М.

25 ноября 2024 года