

ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации 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)

Согласно ГОСТ Р 52334–2005 гравиразведка – «геофизический метод, основанный на измерении силы тяжести с целью исследований геологического строения земной коры, поиска и разведки месторождений полезных ископаемых». В настоящее время в связи с появлением новой аппаратуры существенно повысилась точность полевых гравиметрических наблюдений, для обработки и интерпретации полученных данных используются мощные компьютеры и специализированное программно-алгоритмическое обеспечение. Расширился круг геологических задач, которые позволяет решать метод гравиразведки, в частности – связанных с прогнозированием и дальнейшим изучением месторождений углеводородного сырья, включая мониторинговые исследования разрабатываемых объектов. Данные спутниковых гравиметрических и альтиметрических измерений находят широкое применение в океанографии, гидрологии, гляциологии, при изучении последствий крупных землетрясений, а также при изучении структурно-тектонического строения больших территорий и прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Развиваются новые направления в теории интерпретации потенциальных полей, одним из которых является интерпретационная томография.

Актуальность темы диссертации Лыгина И.В. обусловлена совместным влиянием перечисленных выше факторов и не вызывает сомнений. Полученные им результаты способствуют повышению информативности материалов гравиразведки и доказывают целесообразность широкого применения этого метода в общем комплексе геолого-геофизических исследований суши и акваторий. В диссертационной работе представлено решение целого ряда различных задач, касающихся эталонирования наземных гравиметров с использованием наблюдений в высотных зданиях; анализа информативности

данных спутниковой альтиметрии; разработки методики обработки спутниковых и наземных гравиметрических наблюдений с целью разделения вариаций силы тяжести разного происхождения; создания новых алгоритмов решения прямых и обратных задач гравиметрии в 2D и 3D постановках; систематизация методик геоплотностного (геомагнитного) интерактивного моделирования методом неформализованного подбора; построение и анализ согласованных физико-геологических моделей разного масштаба на основе интерактивного плотностного моделирования (в т.ч. для крупных регионов Российской Федерации, имеющих высокий углеводородный потенциал); анализ пространственно-временных изменений гравитационного поля и их взаимосвязи с особенностями геологического строения.

В диссертации представлено к защите четыре положения. Первое из них содержит новые алгоритмы решения прямой и обратной задач гравиразведки для сложнопостроенных геологических сред; второе положение развивает возможности интерактивного геоплотностного моделирования; третье – является методикой долговременных гравиметрических наблюдений, позволяющей выделять сезонные изменения уровня грунтовых вод и влажности грунтов; четвертое положение отражает взаимосвязь низкочастотной компоненты вариаций гравитационного поля, полученных по данным миссии Грейс с геодинамическими процессами в тектонически активных регионах.

Первое защищаемое положение развивает возможности количественной интерпретации аномального гравитационного поля для решения прогнозно-поисковых, инженерно-геологических и др. задач. Созданы математические методы и реализующее их программно-алгоритмическое обеспечение для решения прямой задачи гравиразведки для 2D многоугольника с параболических законом распределения плотности, 3D многогранника и многоугольной пластины с линейно изменяющейся плотностью, а также для решения обратной задачи гравиразведки в конечноэлементном классе моделей оригинальной модификацией метода наискорейшего градиентного спуска. Это обеспечивает повышение точности геологического редуцирования в условиях уплотнения осадочных пород с глубиной, характерного для нефте-

газоносных провинций и дополняет существующий набор методов геоплотностного моделирования.

Использование зависящего от глубины шага градиентного спуска позволяет подавлять негативный эффект концентрации аномалиеобразующих масс в верхней части изучаемого разреза. Причиной этого эффекта является широкая эквивалентность обратной задачи для сеточных моделей геоплотностной среды (т.н. «скрытая эквивалентность» по Кобрунову А.И.). Отметим, что для борьбы со скрытой эквивалентностью используются также метод сопряженных градиентов с пересчетом весовой матрицы («фокусирующая инверсия» по Жданов М. С.); априорная оценка допустимых вариаций аномальной плотности искомого решения и трехмерной весовой функции, характеризующей меру достоверности начального приближения для изучаемой среды (Глазнев В.Н. и др.); включение эффективной плотности моделируемых тел в число переменных параметров в монтажном методе решения обратной задачи (Страхов В.Н., Балк П.И.).

Несомненный интерес представляет реализация метода характерных точек с целью оценки параметров точечного источника при дискретном задании поля на сферической поверхности Земли или других планет. Отказ от идеализации плоской поверхности раздела «Земля-воздух» требуется для достоверной оценки параметров источников региональных аномалий силы тяжести.

Второе защищаемое положение систематизирует существующие подходы к интерактивному геоплотностному моделированию методом неформализованного подбора. Проблема учета всей имеющейся априорной геолого-геофизической информации имеет очень большое значение при решении обратных задач геофизики и традиционные алгоритмы минимизации многопараметрических функционалов с ограничениями в виде равенств или неравенств, реализованные в компьютерных технологиях автоматизированного подбора, не могут снять ее полностью. В реальности благодаря естественным ограничениям на физические и геометрические параметры элементов подбираемой модели неустойчивости, на которую и направлена теория решения некорректных задач, изначально не существует. Сколь угодно большие

ошибки решения обратной задачи остаются лишь в умозаключениях, но при этом нет возможности фактически обеспечить сходимость и заданную точность результата интерпретации. На практике требуется извлечение максимума достоверной информации об источниках поля в конкретных физико-геологических условиях интерпретации.

Лыгин И.В. впервые ввел понятие весовой корректирующей функции, определяющей области приоритетного изменения параметров модели или области их фиксированных значений. Эта функция формируется с учетом геологических представлений и априорной геофизической информации. Она играет роль пространственного стабилизатора решения обратной задачи, что в итоге обеспечивает устойчивость и геологическую содержательность получаемых результатов. Также предлагается 4 различных технологических цепочки интерактивного геоплотностного моделирования, зависящих от специфики решаемой геологической задачи, объема и характера имеющихся у интерпретатора геолого-геофизических данных.

Эффективность предложенных диссертантом подходов доказывают представленные в разделе практические и синтетический примеры. Речь идет о моделировании кровли палеогеновых отложений Северной части острова Сахалин по данным гравиразведки и сейсморазведки; создании 3D геоплотностной модели северной (широтной) части Енисей-Хатангского прогиба; реконструкции подошвы земной коры (поверхности Мохо) для Баренцева моря; изучении строения верхней части геологического разреза Сибирской платформы, включающего в себя трапповые интрузии, по комплексу данных сейсморазведки, электроразведки, магниторазведки и гравиразведки. Во всех случаях было реализовано уменьшение неоднозначности решения обратных задач за счет комплексирования геофизических методов. Выполненные интерпретационные построения максимально учитывают априорные данные и наиболее полно соответствующие актуальной геологической концепции строения объектов исследований.

В *третьем защищаемом положении* представлена методика высокоточных гравиметрических наблюдений, позволяющая контролировать сезонные изменения уровня грунтовых вод и влажности грунтов. Используются

лишь материалы относительных измерений силы тяжести без удаленной опорной точки, что позволяет выполнять гравиметрический мониторинг на урбанизированных территориях, в т.ч. вблизи и непосредственно внутри крупных зданий. Требования к точности работ весьма жесткие: погрешность измерения поля силы тяжести в сериях не должна превышать $\pm(2-3)$ мкГал; погрешность определения высотных отметок гравиметрических пунктов – $\pm(2-3)$ мм. Практическое применение этой методики позволило оценить влияние на гидродинамический режим Главного здания МГУ старой овражной системы. Представляющие интерес результаты были получены также на территории учебно-научной геофизической базы (дер. Александровка, Калужская область).

Четвертое защищаемое положение заключается в оценке взаимосвязи пространственно-временных изменений гравитационного поля, зафиксированных миссией Грейс, с геодинамическими процессами, протекающими в пределах северо-восточного Тихоокеанского сектора и Африкано-Аравийско-Каспийского региона. В диссертации предложена оригинальная методика выделения долговременных (длительностью более одного года) пространственно-временных вариаций гравитационного поля из данных периодических спутниковых наблюдений. Источниками низкочастотных аperiodических изменений поля силы тяжести служат изменения плотности в астеносфере, имеющие тесную связь с землетрясениями планетарного и регионального масштабов. Эпицентры некоторых из выявленных динамических гравитационных аномалий (Каспийской, Загрос, Южно-Туранской) отвечают очагам глубокофокусных землетрясений.

Полученные оценки изменений плотности в мантии на временных интервалах 10 лет составляют от 1 до 10 на 10^{-3} кг/м³, что в свою очередь приводит к изменениям давления на глубинах 150–300 км до 0.5 атмосфер. По мнению диссертанта представленные цифры не противоречат современным термобарическим моделям мантии Земли. Эти результаты являются физико-геологическим обоснованием для внедрения в практику нового метода геодинамического анализа данных спутниковых наблюдений, ориентированного на характеристику стабильности блоков литосферы и локализацию глубин-

ных зон изменения плотности с количественной оценкой интенсивности изменений.

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, графиками, таблицами, а также формулами.

Нужно отметить, что содержание работы Лыгина В.И. не ограничивается только защищаемыми положениями и охватывает широкий спектр смежных вопросов. Элементы *научной новизны и практической значимости* исследований в ней переплетены между собой. Наличие целого ряда этих элементов в представленной работе не вызывает сомнений. Это относится как к инновационным методикам проведения полевых гравиметрических наблюдений и методам интерпретации геофизических данных, так и к представленным результатам комплексного анализа геолого-геофизических материалов.

Достоверность результатов, изложенных в диссертации, определяется применением современной сертифицированной гравиметрической аппаратуры и теоретически обоснованного научно-методического аппарата, использованием современных открытых геофизических данных, тестированием созданного программно-алгоритмического обеспечения на модельных и практических примерах, а также согласованием построенных геоплотностных моделей с независимо полученными результатами других геолого-геофизических исследований.

Мнение Лыгина И.В. о том, что «дальнейшее развитие алгоритмов, методов, подходов должно быть продолжено в направлении их адаптации для исследований, выполняемых на замкнутых (сферических, эллиптических и др.) поверхностях» оппонент полностью поддерживает.

По диссертационной работе можно высказать несколько замечаний:

1. Не вполне понятно, какая точность гравиметрических измерений представлена на рис 1.1 – характеристика самой измерительной аппаратуры или точности разных видов съемок? В частности, для аэрогравиметрических наблюдений на самолете точность определения аномалий Буге составляет $\pm(0.5-0.7)$ мГал, на вертолете – может достигать $\pm(0.5-0.7)$ мГал (по данным АО «ГНПП «Аэрогеофизика»). По сведениям (Могилевский, Контарович, 2011): «пространственное разрешение аэросъемки на самолетах типа Ан-26/Ан-30 составляет 3,5–4 км. На вертолете разрешение равняется 1,5–2 км». На данном рисунке минимальный размер регистрируемых аномалий составляет 1.05 км и 0.25 км, соответственно.

2. В работе приводится оценка изменения амплитуды аномалий силы тяжести на 28 мГал за счет превышения рельефа на 90 м между пунктами в ГЗ МГУ и на набережной Москва-реки (стр. 18). Вероятно, данная оценка базируется на величине нормального вертикального градиента силы тяжести. Однако при этом остался без учета гравитационный эффект плоского слоя, который при плотности $2,67 \text{ г/см}^3$ составляет около 11 мГал (поправка Буге). Таким образом, ожидаемое за счет высот пунктов изменение амплитуд должно составлять всего 17 мГал.

3. Использование переменного шага градиентного спуска при решении обратной задачи гравirazведки для конечноэлементных моделей геологической среды конечно «позволяет регулировать распределение плотностных неоднородностей по глубине» (стр. 69), но вопрос о выборе параметра α при наличии в разрезе плотностных неоднородностей разного ранга остается весьма сложным и вряд его удастся окончательно решить.

4. В диссертации представлено развитие метода характерных точек, являющегося самым старым методом оценки параметров аномалиеобразующих объектов правильной геометрической формы по аномалиям гравитационного поля. По сути – это упрощенный вариант метода подбора, в котором для весьма ограниченного числа модельных (весьма идеализированных) классов тел (шар, стержень, пластина и т.п.) по нескольким точкам поля определяются масса и геометрические характеристики возмущающих тел. Такой подход был вполне оправдан в «эпоху ручного счета» (термин В.Н. Страхова). В

настоящее время с более высокой точностью параметры источников одиночных изолированных геоплотностных неоднородностей можно получить с помощью простейшего алгоритма автоматизированного подбора, использующего сферическую систему координат. Это является скорее предложением для будущих исследований диссертанта.

5. В разделе диссертации 2.2.1 (стр. 77) сказано, «что принципиальной разницы в алгоритмах геоплотностного и геомагнитного моделирования нет», что не вызывает возражения с физико-математических позиций. Вычислительные схемы решения прямой и обратной задач для 1-й производной (гравитационное поле) и 2-й производной (магнитное поле) потенциала с учетом суперпозиции аномальных эффектов от разных источников близки между собой. С позиций петрофизики достоверность эмпирических связей между скоростью упругих волн и плотностью или намагниченностью горных пород существенно различается. Плотность горной породы определяется плотностью слагающих ее минералов, изменяется сравнительно мало и аналитически связана со скоростью упругих волн через модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Магнитные свойства горной породы зависят от наличия в ней ферромагнетиков, малые изменение концентрации которых приводят к весьма сильным (10–100 раз и более) изменениям этих свойств, практически без изменения плотности и электропроводности. Это весьма осложняет реализацию полного «геолого-геофизического» подхода № 4 (табл. 2.2., стр. 78–79) при интерактивном геомагнитном моделировании.

6. «Магнитная составляющая» синтетической физико-геологической модели верхней части разреза является весьма идеализированной: «физические свойства постоянные для всех блоков модели.... магнитная восприимчивость – 3200 ед. мкСГС» (стр. 143). Магнитные свойства интрузивных траппов Сибирской платформы варьируют в широких пределах, они различны для разновозрастных долеритов, некоторые из которых формировались в период инверсии магнитного поля Земли.

7. На многих рисунках в тексте диссертационной работы (рис. 1.4, 2.2–2.6, 2.8, 2.9, 2.15 и др.) используется слишком мелкий шрифт для надписей, оцифровки осей и шкал, что затрудняет их восприятие.

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств диссертации Лыгина И.В. Она является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, научной новизной и практической значимостью. В диссертации представлено самостоятельное решение целого ряда актуальных научных задач в области гравиметрического метода исследования недр. Результаты исследований можно классифицировать как *научное достижение в области прикладной геофизики*, включающее в себя новые теоретические положения и оригинальные методики, а также математические методы и программно-алгоритмическое обеспечение, которые могут эффективно использоваться при выполнении полевых гравиметрических работ, комплексной интерпретации полученной информации и геологическом истолковании полученных результатов. Важным положительным моментом является то, что содержание диссертационной работы используется ее автором при чтении учебных курсов для студентов и магистрантов.

Все четыре защищаемых положения полностью раскрыты в тексте диссертации. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание работы. Автореферат и 32 публикации (в т.ч. 24 – в изданиях, входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ) отражают основное содержание диссертационной работы. Основные научные положения неоднократно 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 (геолого-минералогические науки), пп. 16, 18, 19, а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», а так-

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

ДОЛГАЛЬ Александр Сергеевич

«8» ноября 2024 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