

О Т З Ы В

официального оппонента
на диссертацию Петросяна Рубена Нверовича
«МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ
И ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ
МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ»
представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика

Актуальность темы исследования

Диссертация Петросяна Р.Н. посвящена совершенствованию методов решения обратных задач гравиразведки и электроразведки (методом ВЭЗ) на основе нейросетевых и других компьютерных и технологий, позволяющих повысить эффективность и достоверность результатов интерпретации измеренных данных. Существенная часть диссертационной работы посвящена анализу и оценкам неоднозначности получаемых приближенных решений обратных задач, обусловленную существованием эквивалентных решений. Поставленные цели и задачи работы отражают ее актуальность и практическую значимость.

Использование методов интеллектуального анализа данных является прямым откликом на современную тенденцию цифровизации науки и производства. Тема диссертации находится на стыке актуальной практической потребности и передовых научно-технологических подходов, что безусловно подтверждает ее научную и практическую значимость.

Степень обоснованности научных положений

На защиту вынесены три положения, обоснованность каждого из которых раскрывается в главах работы.

Первое положение касается метода устойчивого решения одномерной обратной задачи ВЭЗ на основе нейросетевой аппроксимации. Автор не ограничивается простым применением готовых нейросетевых инструментов, а предлагает альтернативный вариант, суть которого заключается в отказе от создания универсальной нейросети в пользу адаптивного обучения сети под конкретные физико-геологические условия для каждого определенного типа решаемых задач. Предлагаемая автором нейросеть по сути является представителем, так называемых, *физически-информированных нейросетей* (ФИНС), которые обучаются с учетом физических особенностей задачи, и в последнее время интенсивно внедряются в практику решения обратных задач математической физики и геофизики, в частности. Использование таких сетей позволяют преодолеть существенные трудности, связанные с обучением нейросетей, способных решать обратные задачи и в том числе, как показано автором работы на численных примерах, обратные 1D задачи ВЭЗ.

Второе положение посвящено исследованию возможностей современных методов стохастической оптимизации. Для нелинейных обратных задач гравиразведки автор реализовал и детально исследовал метод статистических испытаний (Монте-Карло) и метод роя частиц. В работе численно показано как эти алгоритмы, начиная с заведомо «плохого» начального приближения, способны генерировать популяции моделей, сходящиеся к области допустимых решений и обеспечивающие требуемую невязку наблюдаемого и модельного полей. Проведенный анализ влияния числа испытаний и уровня помех на точность и скорость работы подтверждает практическую применимость разработанных методов.

Для обратной задачи ВЭЗ в качестве основного инструмента выбран генетический алгоритм, относящийся к методам эволюционной оптимизации. Автор проводит глубокое исследование его работы, анализируя влияние гиперпараметров алгоритма не только на конечную невязку лучшего решения, но и на динамику популяции в целом, что позволяет давать комплексную оценку эффективности генетического алгоритма при решении поставленной задачи. Способность генетического алгоритма формировать разнообразное множество решений, удовлетворяющих заданному критерию, является прямым следствием его эволюционной механики и подтверждена результатами имитационного моделирования. Утверждение о том, что стохастические методы являются эффективным инструментом для генерации репрезентативных множеств геоэлектрических моделей, обеспечивающих возможность отыскания оптимальных, физически-осмысленных решений, получает в работе всестороннее и убедительное подтверждение.

Третье положение отражает утверждение о том, что пространственно-статистический анализ множества ε -эквивалентных решений является неотъемлемой частью интерпретации измеренных данных. Теоретическая часть работы содержит изложение принципов построения функций локализации и статистических оценок множества эквивалентных решений. На синтетических примерах количественно показано, как расширение зоны неопределенности (мощности множества D_2) коррелирует с уменьшением разрешающей способности метода в конкретной точке зондирования, что является ценной информацией, так как отражает фундаментальное свойство обратных задач. Получаемые на реальных данных с помощью предлагаемых технологий результаты хорошо согласуются с результатами традиционного интерактивного подбора, но при этом дополняются оценкой множеств эквивалентных интерпретационных построений. Это позволяет перейти от одной, возможно случайной, интерпретационной модели к вероятностной, но более содержательной геолого-геофизической модели. Таким образом, предложенный метод построения и анализа множества возможных эквивалентных решений обратной задачи обеспечивает качественно более

высокий уровень количественной интерпретации, что делает третье положение обоснованным.

Выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертации, логически вытекают из содержания глав и носят конкретный, взвешенный характер. Автор адекватно оценивает как преимущества (автоматизация, помехоустойчивость, новый критерий оценки), так и ограничения (зависимость от правильного формирования выборки, вычислительные затраты на анализ множеств решений обратной задачи) предложенных технологий, что свидетельствует о полноте и объективности проведенного цикла исследований.

Оценка научной новизны

Научная новизна диссертационной работы отражается в следующем:

- автором предлагается методика регуляризации решения обратной задачи электроразведки ВЭЗ, в которой регуляризатором является сам обратный нейросетевой оператор задачи, построенный с помощью физически информированной нейронной сети, обученной с учетом особенностей задачи, вытекающих из физико-математических свойств решаемой задачи. Такая сеть позволяет сузить множество априорных ограничений, что повышает устойчивость решения обратной задачи не за счет увеличения гипотетической априорной информации о среде, а за счет исключения решений, лежащих за пределами разрешающей способности применяемого геофизического метода

-существенная научная новизна связана с разработкой и адаптацией методов стохастической оптимизации (генетического алгоритма, метода Монте-Карло, метода роя частиц) с четко выраженной целевой установкой на формирование репрезентативного множества решений. В отличие от традиционного использования методов автоматизированного подбора для поиска единственного оптимума, отвечающего «наилучшему решению обратной задачи», предлагаемые в работе методы системно применяются как инструмент генерации ансамблей ε -эквивалентных геоплотностных и геоэлектрических моделей. Это справедливо как для задачи гравиразведки, где методы Монте-Карло и роя частиц целенаправленно формируют популяции допустимых 2D призматических тел, так и для задачи ВЭЗ, где генетический алгоритм используется для создания множества геоэлектрических разрезов, удовлетворяющих заданному критерию невязки для кривых кажущегося сопротивления. Такой подход позволяет перейти от анализа единичной модели к исследованию пространства возможных решений обратной задачи;

-новизной обладает разработка и реализация комплексной методики пространственно-статистического анализа множеств ε -эквивалентных моделей, получаемых в результате количественной интерпретации. Это позволяет учитывать все возможные допустимые решения обратной задачи при достигнутой невязке и, в значительной мере, исключить (по крайней мере

ослабить) влияние фактора субъективности на финальный результат интерпретации измеренных данных.

Оценка практической ценности

Практическая ценность диссертационной работы проявляется в нескольких ключевых аспектах. Наиболее весомым результатом является создание нового программно-алгоритмического обеспечения. Пять программ для ЭВМ («ANN VES», «GA VES», «PDBR ROI», «PODBOR ST», «SSA VES»), зарегистрированных в Роспатенте, представляют собой готовые инструменты для решения актуальных производственных задач в геофизических организациях.

Важно, что практическая ценность выполненных разработок подтверждена не только на синтетических примерах, но и в ходе апробации на реальных данных. Результаты апробации показали хорошее совпадение с результатами, полученными ранее традиционными методами интерпретации, что служит убедительным доказательством работоспособности алгоритмов.

Кроме того, предложенные методы обладают значительным потенциалом для оптимизации рабочего процесса при камеральной обработке результатов полевых измерений. Они позволяют существенно автоматизировать рутинную часть количественной интерпретации, сократить временные затраты и минимизировать субъективный фактор. Метод пространственно-статистического анализа решений обратной задачи ВЭЗ предоставляет геофизику и геологу не просто единичный геоэлектрический разрез, а разрез с количественной оценкой его достоверности в каждой точке. Это является важным фактором для принятия обоснованных решений, например, при планировании пространственного расположения и глубин буровых скважин.

Оценка достоверности полученных результатов

Достоверность полученных научных и практических результатов обеспечивается продуманной и многоступенчатой системой верификации.

Методологической основой диссертационной работы служит теория решения обратных задач математической физики, теории вероятности и математической статистики, а также современные положения машинного обучения. Все предлагаемые алгоритмы в первую очередь тестировались на синтетических данных (в том числе с учетом помех) для моделей с заранее известными параметрами. Переход к полевым материалам был осуществлен после отладки программно-алгоритмического обеспечения с применением имитационного моделирования.

Алгоритмы описаны с необходимой подробностью, включая ключевые формулы и блок-схемы. Факт регистрации 5 программ для ЭВМ делает алгоритмическую часть работы верифицируемой.

Сильные стороны работы

1. Актуальность и прикладная направленность выполненных исследований (инженерно-геофизические задачи).
2. Комплексный подход к решению поставленных задач: нейросетевые методы + стохастическая оптимизация + пространственно-статистический анализ.
3. Наличие апробации на реальных полевых данных и регистрация ПО (Роспатент).
4. Количество публикаций по теме подтверждает научную активность диссертанта.

Вопросы диссертанту

1. Имеются ли примеры неудачных интерпретаций?
2. Какие шаги запланированы для переноса методов из 1D в 2D/3D постановки и какие основные препятствия вы ожидаете?

Основные замечания по диссертационной работе

1. В работе нет сведений о том, проводились ли эксперименты по использованию различного числа слоёв и нейронов сети с целью выбора оптимальной архитектуры сети.
2. Не проведено сопоставление предложенных в диссертации методов с современными аналогами (ResNet-подобные архитектуры, байесовские методы инверсии) и отсутствует количественная оценка полученного выигрыша и ограничений.
3. Отсутствует глубокий анализ устойчивости разработанных алгоритмов (например, несколько запусков с непрерывной интеграцией (CI), критерии значимости и др.).
4. Отмечается несогласованность терминологии в отдельных местах, особенно во введении и выводах (вариации наименований одной и той же величины — следовало унифицировать).
5. В некоторых разделах формулы приведены без пояснения всех обозначений.

Заключение

Диссертационная работа Петросяна Рубена Нверовича представляет собой законченное, целостное и самостоятельное научное исследование, выполненное на высоком теоретическом и методическом уровне. В работе успешно решена важная научно-практическая задача, имеющая важное значение для развития методов количественной интерпретации геофизических данных.

Автор продемонстрировал понимание фундаментальных проблем прикладной геофизики, свободное владение современным математическим

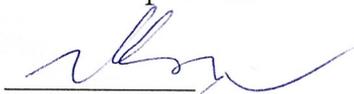
аппаратом теории обратных задач, методов оптимизации и машинного обучения, а также высокую квалификацию в области алгоритмизации и программирования. Поставленная в диссертационной работе цель достигнута, все сформулированные задачи решены. Защищаемые положения являются научно обоснованными, обладают научной новизной и получили убедительное практическое подтверждение.

Содержание диссертации изложено логично и последовательно, текст работы хорошо структурирован и сопровождается качественными иллюстрациями. Апробация результатов исследований является широкой и репрезентативной. Личный вклад автора во все разделы диссертационной работы является определяющим и не вызывает сомнений. Сделанные замечания не умаляют значимости работы и должны быть учтены в дальнейшем. Диссертационная работа в целом полностью отвечает пунктам 16, 17, 18 единого паспорта специальности 1.6.9. Геофизика.

Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" (в действующей редакции), а ее автор – квалификационным критериям, предъявляемым к соискателю ученой степени кандидата наук., На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертационной работы «Моделирование геоэлектрических разрезов и локальных геоплотностных неоднородностей методами интеллектуального анализа данных» Петросян Рубен Нверович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент,
Заместитель директора по науке
Экспериментального творческого
фонда развития науки и культуры (ЭТФ),
доктор физико-математических наук
по специальности 1.6.9. Геофизика

Шимелевич М.И.



Подпись Шимелевича М.И. удостоверяю:
Генеральный директор ЭТФ



Сыроватко Н.М.