

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - Проректор по научной деятельности федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», д.ф.-м.н., профессор
Дмитрий Альбертович Тагорский

« 2 » марта 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Петросяна Рубена Нверовича «Моделирование геоэлектрических разрезов и локальных геоплотностных неоднородностей методами интеллектуального анализа данных», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности – 1.6.9 «Геофизика»

Актуальность, цель и задачи темы диссертации

Диссертационная работа Петросяна Р.Н. посвящена совершенствованию методики решения обратных задач гравиразведки и вертикального электрического зондирования на примере синтетических данных и материалов полевых съёмок. Несмотря на значительную степень развития методик количественной интерпретации геофизических данных, проблема устойчивости решения и его однозначности сохраняется. Также результаты автоматизированного решения обратных задач в значительной степени зависимы от уровня помех и начального приближения модели. В условиях активного внедрения цифровых технологий и методов искусственного интеллекта в науки о Земле, данная работа является своевременной и практически значимой. Автор обоснованно смещает акцент с поиска единственного «оптимального» решения на формирование и анализ репрезентативного множества допустимых решений. Именно эти важные моменты и определяют актуальность поставленной в диссертации цели. Соискатель обозначил шесть задач в определенной логической последовательности, которые позволили ему добиться поставленной цели.

Новизна полученных результатов и выводов

Научная новизна работы опирается на детальный анализ публикаций отечественных и зарубежных исследователей, список которых насчитывает более 150 шт. Разработана методика решения одномерной обратной задачи ВЭЗ

на основе нейросетевой регуляризации. Устойчивость решения в данном случае обеспечивается не введением стабилизирующего функционала, а самим процессом обучения нейронной сети на ограниченной, но репрезентативной синтетической выборке. Это позволяет автоматически исключать геологически бессмысленные модели из пространства решений. Также создана методика решения обратной задачи гравиразведки основанная на методах Монте-Карло и роя частиц. Помимо прочего автором предложена методика пространственно-статистического анализа конечного множества эквивалентных решений для субгоризонтально-слоистых геоэлектрических моделей. Ранее подобный подход применялся преимущественно в гравиразведке и магниторазведке. Его адаптация для интерпретации данных ВЭЗ выполнена впервые и отличается высокой степенью проработки. Все основные результаты, выносимые на защиту, являются новыми и оригинальными.

Значимость результатов

Диссертация Р.Н. Петросяна имеет чётко выраженную прикладную направленность. Разработанные алгоритмы доведены до программной реализации и зарегистрированы в Роспатенте (5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ: ANN VES, GA VES, PDBR ROI, PODBOR_ST, SSA VES). Это свидетельствует о высокой степени готовности технологий к практическому использованию. Приведённые в работе методики и программы апробированы как на синтетических моделях различной степени сложности, так и непосредственно на реальных полевых материалах ООО «Противокарстовая и береговая защита» и данных крупномасштабной гравиметрической съёмки над месторождением Норильск-1 и в Норильско-Игарской зоне высоких значений гравитационного поля. Надеемся, что в ближайшей перспективе разработанные алгоритмы найдут широкое применение при геофизических изысканиях.

Замечания по диссертационной работе

Текстовая часть кандидатской диссертации состоит из введения, четырёх глав с выводами, заключения и списка литературы из 155 наименований. В работе содержится 124 страниц, 4 таблицы и 58 рисунков.

В диссертации Р.Н. Петросян рассматривает вопросы по совершенствованию методик и алгоритмов количественной интерпретации данных гравиразведки и вертикальных электрических зондирований.

Во Введении изложены проблематика и актуальность темы исследования, поставлены цель и задачи работы, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, сформулированы три защищаемых положения, приведена апробация результатов исследования, обозначен личный вклад автора, кратко охарактеризована структура работы и исходные материалы.

В первой главе приводится необходимая информация о фундаментальных проблемах интерпретации геофизических данных. Автором

подробно рассматривается ключевая особенность обратных задач геофизики – их некорректность, проявляющаяся в отсутствии единственности и устойчивости решений.

Далее автор анализирует историю развития и современное состояние двух перспективных направлений решения обратных задач: нейросетевых технологий и стохастических методов оптимизации. Подробно рассматриваются этапы становления искусственных нейронных сетей, а также эволюция методов Монте-Карло, роя частиц и генетических алгоритмов. На многочисленных примерах отечественных и зарубежных исследований показана высокая эффективность применения данных методов в геологоразведке, геофизике и смежных областях. К сожалению, в главе практически не рассматриваются вопросы совместной интерпретации разнородных геофизических данных (электроразведки и гравиразведки), хотя автор в дальнейших главах оперирует именно двумя методами.

Замечания к главе 1.

1. На 14й странице встречается термин «электрофотографии», вероятно имелась ввиду электротомография.

2. Автором упущена возможность систематизировать существующие подходы к регуляризации обратных задач с использованием методов искусственного интеллекта. В частности, следовало бы рассмотреть современные направления, такие как «физически-информированные нейронные сети» (Physics-Informed Neural Networks, PINNs), которые активно развиваются в зарубежной литературе и позволяют встраивать уравнения прямых задач непосредственно в функцию потерь. Это могло бы не только усилить обзорную часть, но и обозначить перспективы дальнейшего развития предложенной автором концепции «нейросетевой регуляризации».

Во второй главе излагаются теоретические и практические основы разработанного автором метода нейросетевой аппроксимации для решения одномерной обратной задачи вертикального электрического зондирования. В главе подробно рассматриваются архитектура искусственных нейронных сетей, функции активации, оптимизаторы и методы обучения, а также особенности их применения применительно к зондированиям. Ключевой идеей главы является отказ от создания «универсальной» нейросети, работающей для любых геоэлектрических условий, в пользу разработки алгоритма, обеспечивающего быстрое обучение нейронной сети под конкретные физико-геологические условия исследуемого участка.

Наиболее значимым результатом главы следует признать обоснование и введение показателя «степень изменчивости разреза», который позволяет количественно оценивать сложность геоэлектрической модели и на основе этой оценки выбирать гиперпараметры обучающей выборки. Автором сформулированы практические рекомендации по формированию обучающей выборки для простых и сложных разрезов.

Существенное внимание уделено сравнению помехоустойчивости нейросетевой аппроксимации и генетического алгоритма на примере синтетической модели с добавлением 5 % нормально распределенной помехи.

Апробация метода выполнена на синтетических моделях с различной степенью изменчивости и на полевых материалах, полученных в ходе инженерно-геологических изысканий в Пермском крае. Показано, что нейросетевые решения, несмотря на относительно высокие абсолютные значения невязки, адекватно воспроизводят общие черты геоэлектрических разрезов и могут быть использованы в качестве начального приближения для более точных методов инверсии.

В завершение главы автор формулирует первое защищаемое положение, обосновывая нейросетевую аппроксимацию как инструмент построения непрерывного оператора обратной задачи на компактном множестве моделей, заданном обучающей выборкой.

Замечания к главе 2

1. На 36й странице встречается параметр «степень изменчивости разреза C_p », далее упоминается параметр «степень изменчивости разреза C_{OB} » с аналогичным названием. Вероятно, последний параметр должен быть «степень изменчивости обучающей выборки».

2. Автор указывает, что количество эпох обучения может варьироваться от десяти до первых тысяч и обуславливается сложностью разреза. При этом не описан критерий остановки обучения, не приведены графики сходимости функции потерь на обучающей и валидационной выборках. Учитывая, что автор сам отмечает опасность переобучения, отсутствие контроля за переобучением является методическим пробелом. В диссертации следовало бы явно указать, использовалось ли разделение обучающей выборки на тренировочную и валидационную, и как выбиралось оптимальное количество эпох.

Третья глава посвящена разработке и программной реализации алгоритмов решения обратных задач гравиразведки и электроразведки на основе трех классов стохастических методов оптимизации: метода Монте-Карло, метода роя частиц МРЧ и генетического алгоритма. Автор последовательно излагает теоретические основы каждого метода, особенности их адаптации к специфике геофизических задач, а также результаты апробации на синтетических и полевых материалах.

Рассматривается решение двумерной обратной задачи гравиразведки для одиночных аномалиеобразующих объектов методом статистических испытаний. Автором реализована программа `PODBOR_ST`, в которой генерация случайных многомерных векторов координат угловых точек модели осуществляется в пределах описанного прямоугольника, построенного на основе текущего приближения. Важной особенностью алгоритма является направленный характер поиска: каждое последующее приближение строится с учетом информации о координатах центра тяжести и размерах объекта, полученной на предыдущих итерациях.

Также в главе рассматривается реализация метода роя частиц для локализации источника гравитационной аномалии в классе прямоугольных призм. Автором детально проанализировано влияние инерционной,

когнитивной и социальной компонент скорости частиц на сходимость итерационного процесса.

Помимо гравirazведки автор приводит решение обратной задачи вертикальных электрических зондирований с использованием генетического алгоритма, реализованного на языке Python с применением библиотеки DEAP. Подробно описаны операторы турнирного отбора, кроссовера и мутации, а также введено понятие эпистаза. Проведено имитационное моделирование для выбора оптимальных гиперпараметров генетического алгоритма.

Наиболее значимым результатом главы, безусловно, является разработка и апробация гибридного подхода совмещения нейросетей и генетического алгоритма. Нейросетевое решение используется в качестве высококачественного начального приближения для генетического алгоритма, что позволяет значительно снизить невязку на сложной синтетической модели и существенно повысить геологическую правдоподобность разрезов.

В завершение главы автор формулирует второе защищаемое положение, обосновывая способность стохастических методов оптимизации формировать репрезентативное множество интерпретационных моделей, характеризующее основные особенности пространственного распределения физических свойств целевого объекта или изучаемого фрагмента геологической среды.

Замечания к главе 3

1. На странице 62 в подписи к рисунку 3.1.6 два раза упоминается часть рисунка «б». При этом вероятнее всего, что в подписи к прямоугольной призме имелась в виду «в».

2. На 66-ой странице на рисунке 3.2.1 в пункте «Получение лучшего решения $G(k)$ для среди всех частиц» нарушена связность текста.

3. В главе независимо друг от друга рассматриваются три метода стохастической оптимизации (Монте-Карло, рой частиц, генетический алгоритм), однако отсутствует их прямое сопоставление на единой тестовой задаче. Автор подробно анализирует влияние гиперпараметров внутри каждого метода, но не дает количественной оценки, какой из методов следует рекомендовать для решения тех или иных классов задач.

Четвертая глава диссертации Р.Н. Петросяна посвящена разработке и применению методологии пространственно-статистического анализа конечного множества эквивалентных решений обратных задач электроразведки и гравirazведки. Автор последовательно излагает теоретические основы гарантированного подхода, его развитие в виде аддитивных технологий, а также оригинальные результаты по адаптации данного аппарата для интерпретации данных вертикального электрического зондирования в классе субгоризонтально-слоистых моделей.

Автор демонстрирует применение гарантированного подхода и аддитивных технологий для интерпретации данных гравirazведки. На примере месторождения медно-никелево-платиновых руд Норильск-1. Автором излагается адаптация аддитивных технологий для решения обратной задачи ВЭЗ в классе субгоризонтально-слоистых моделей.

Апробация методики выполнена на синтетических моделях и на полевых материалах по профилю у-пос. Октябрьский (Пермский край). Во всех случаях

продемонстрирована высокая степень соответствия аппроксимирующей ломаной как истинным границам синтетических моделей, так и границам, полученным классическим интерактивным подбором в программе «ЗОНД». Принципиально важным результатом является возможность количественной оценки разрешающей способности метода ВЭЗ.

В завершение главы автор формулирует третье защищаемое положение, обосновывая способность пространственно-статистического анализа снижать влияние практической эквивалентности и повышать достоверность результатов интерпретации за счет исключения случайных особенностей частных решений.

Замечания к главе 4.

1. На странице 104 в подписи к рисунку 4.3.4 два раза упоминается пункт «2». При этом вероятнее всего, что пункт «точка ВЭЗ и её номер» должны идти под номером «3».

2. В подписи к рисунку 4.3.4 упоминается условное обозначение «точка ВЭЗ и её номер», при этом на рисунке данных номеров не найдено.

3. Предложенная методика опирается на заранее заданное количество слоев геоэлектрического разреза, которое определяется на основе априорных сведений. В диссертации не рассматривается ситуация, когда априорная информация отсутствует или является недостоверной, и интерпретатор ошибается в выборе числа слоев. Желательно было бы оценить устойчивость предлагаемого подхода к таким ошибкам. Это важно для практического применения методики в условиях минимальной априорной информации.

Выводы

Диссертация Р.Н. Петросяна отражает новый опыт в интерпретации данных гравиразведки и вертикальных электрических зондирований. Работа, несомненно, имеет высокую практическую значимость. Содержание диссертационной работы в целом отвечает пунктам 16, 17, 18 единого паспорта специальности 1.6.9. – Геофизика.

Личный вклад Р.Н. Петросяна в участии на всех этапах работы не вызывает сомнения. Достоверность и обоснованность проведенного им научного исследования, новизна, научная и практическая значимость, обеспечиваются целостным, комплексным подходом, правильными методами исследований, соответствующим поставленным задачам. В процессе подготовки работы Соискатель получил пять свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ по решению обратных задач электроразведки и гравиразведки. Основные результаты проведенных исследований докладывались на научных конференциях разного уровня.

Автореферат диссертации отличается научным стилем, логичностью изложения, его содержание и публикации в целом соответствует тексту диссертации, отражает основные выводы и защищаемые положения, полученные автором.

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 -

Петросян Рубен Нверович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – «Геофизика».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры геофизики и геоинформационных технологий Института геологии и нефтегазовых технологий протоколом № 1 от 25.02.2026 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" (ФГАОУ ВО «КФУ»)

Адрес: 420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18, корп.1

Тел.: +7 (843) 233-71-09

Электронная почта: public.mail@kpfu.ru

Сайт: <https://kpfu.ru>

Заведующий кафедрой геофизики
и геоинформационных технологий ИГиНГТ,
к.г.-м.н.

Зиганшин Эдуард Ришадович

И.о директора ИГиНГТ

Профессор, д.г.-м.н.

Силантьев Владимир Владимирович



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИГиНГТ
УПРАВЛЕНИЕ ДОКУМЕНТООБОРОТА И КОНТРОЛЯ
ПОДПИСЬ
Зиганшина Э.Р. заверяю
вед. спец. Ук 3/ Злотова А.А.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИГиНГТ
УПРАВЛЕНИЕ ДОКУМЕНТООБОРОТА И КОНТРОЛЯ
ПОДПИСЬ
Силантьева В.В. заверяю
вед. спец. Ук 3/ Злотова А.А.