

**ОТЗЫВ официального оппонента о диссертации на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук
Шимелевича Михаила Ильича на тему: «Решение обратных
задач геоэлектрики с применением нейронных
сетей и оценкой неоднозначности» по специальности
1.6.9 – Геофизика**

Диссертация М.И. Шимелевича посвящена развитию методов решения обратных коэффициентных 2D, 3D задач геоэлектрики методами магнитотеллурического (МТЗ), и магнитовариационного (МВЗ) зондирований. Хорошо известно, что в случае нелинейности общего типа экстремальная задача минимизации Тихоновского функционала невязки не сводится к задаче выпуклого программирования, что осложняет обоснование и формализацию применяемых численных методов решения обратных задач геоэлектрики. Проблема усугубляется большой размерностью этих задач.

В работе диссертанта развивается подход к решению нелинейных обратных задач геоэлектрики на компактных множествах, основанный на построении приближенного обратного оператора задачи с использованием предварительно построенного множества («банка») опорных решений задач. Простейшая реализации данной идеи на практике издавна использовалась в *палеточном методе*, в котором интерпретация измеренных данных проводилась в классе горизонтально-слоистых сред на основе множества опорных решений, представленного в виде *альбома палеток*. Современная версия данного подхода реализована в аппроксимационном нейросетевом (АНС) методе, развиваемом М.И. Шимелевичем, в котором приближенный обратный оператор задачи, так называемый *нейросетевой аппроксиматор*, строится с помощью нейросетевой аппроксимационно-интерполяционной конструкции. При таком подходе сложная нелинейная экстремальная задача построения

приближенного обратного оператора решается один раз для заданного класса решений, а затем с его помощью обратная задача для конкретных измеренных данных решается без задания первого приближения, за первые десятки секунд вне зависимости от физической размерности задачи. Для обеспечения устойчивости решений предусмотрена практическая адаптивная регуляризация задачи, а для получаемых решений вычисляются оценки их неоднозначности (погрешности).

Численная реализация решаемых автором задач стала возможной в настоящее время благодаря современному уровню развития теории некорректных задач, а также компьютерных и интеллектуальных технологий. Это отражает **актуальность темы представляемой работы**, а быстрый рост технологий обеспечивает дальнейшее широкое развитие и распространение предлагаемых методов. Диссертация М.И. Шимелевича состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

В первой главе представлены общие математические постановки нелинейных обратных задач геоэлектрики, в том числе многокритериальных; обсуждаются методы оценки практической неоднозначности (погрешности) их решений, применяемые в теории обратных и некорректных задач. Приводится математическая формулировка обратной задачи ЭМ мониторинга динамики электропроводности среды в сейсмоактивных зонах на основе локальных и/или разреженных сетей наблюдения.

Во второй главе исследуются особенности характеристик неоднозначности (погрешности) решений задач геофизики и, в частности многокритериальных задач геоэлектрики. Автором показано, что априорные характеристики неоднозначности многокритериальных задач монотонно не возрастают при увеличении числа критериев, что служит **обоснованием** для комплексной интерпретации геофизических данных. В диссертации вводятся специального типа локальные характеристики

неоднозначности обратных задач геофизики, которые позволяют вычислять неоднозначность получаемых решений нелинейной обратной задачи обратной задачи с учетом чувствительности и скорости поглощения геофизического поля, свойственных применяемому геофизическому методу. На основе числовых оценок локального модуля непрерывности обратного оператора автором разработан метод адаптивной регуляризации задачи, который обеспечивает компромисс между детальностью и устойчивостью решений дифференцированно по глубине исследований. Исследуются особенности обратных задач в классах конечно-параметрических сред. Теоретически показано, что степень неоднозначности решений монотонно не убывает с увеличением размерности параметризации исследуемой среды. Результаты, полученные во второй главе, служат **обоснованием** для применения численных методов решения обратных задач геоэлектрики, предлагаемых автором в последующих главах.

Во третьей главе представлены предлагаемые автором численные методы и схемы алгоритмов расчета различных типов характеристик неоднозначности решений нелинейных обратных задач геофизики, в том числе задач геоэлектрики, в конечно-параметрических классах сред. В алгоритмах используются методы Монте-Карло; доказывається сходимость алгоритмов. Приведены примеры численного расчета априорных характеристик неоднозначности для некоторых типовых задач интерпретации данных геоэлектрики, а также - численные примеры адаптивной регуляризации обратных 2D, 3D задач геоэлектрики.

В четвертой главе дается **обоснование** регуляризованного АНС метода решения нелинейных обратных задач геоэлектрики с позиций теории аппроксимации функций многих переменных. Суть метода заключается в построении аппроксиматора задачи с помощью нейросетевых полиномов при условии минимума ошибки замены точного

обратного оператора приближенным; строятся оценки ошибки этой замены. Рассматриваются вопросы корректности задачи построения аппроксиматора; доказано существование непрерывного НС аппроксиматора с минимальной ошибкой. При необходимости найденное с помощью построенного аппроксиматора решение уточняется предложенным автором аппроксимационно-итерационным методом. В работе показано, что с помощью аппроксиматоров специального типа может быть также решена обратная задач ЭМ электромагнитного мониторинга электропроводности среды в сейсмоактивных зонах на основе локальных и/или разреженных сетей в режиме реального времени.

В пятой главе представлены схемы алгоритмов АНС метода, а также примеры решения обратных задач геоэлектрики на модельных данных. В основе алгоритмов лежит решение экстремальной нелинейной задачи построения (обучения) НС аппроксиматора. Эта детерминированная задача рандомизируется и решается с использованием **современных технологий глубокого обучения** (deep learning) нейросетей, которые адаптированы автором диссертации к особенностям решаемой обратной задачи. Это позволило существенно увеличить эффективность развиваемой в диссертационной работе современной версии нейросетевого метода, **по сравнению с ранними версиями**, в частности - увеличить более, чем на 2 порядка число определяемых параметров обратной задачи и проводить локальную инверсию больших данных, **измеряемых на обширных площадях**. Приводятся примеры решения АНС методом обратных 2D, 3D коэффициентных задач геоэлектрики и задач ЭМ мониторинга на модельных данных.

В шестой главе приводятся примеры решения обратных 2D, 3D коэффициентных задач геоэлектрики АНС методом на полевых данных.

Тестирование алгоритмов на модельных и полевых данных подтверждает, что разработанная автором современная версия

нейросетевого метода позволяет формализовано, исключая человеческий фактор, находить устойчивые решения обратных задач геоэлектрики большой размерности без задания первого приближения; время решения составляет первые десятки секунд независимо от физической размерности задачи.

Результаты, полученные в работе в целом, обладают научной новизной, а представленные к защите положения являются полностью обоснованными. Предлагаемые методы и алгоритмы являются оригинальными авторскими разработками и при некоторой адаптации могут использоваться для решения нелинейных обратных задач других геофизических методов. Работа безусловно имеет практическую ценность: процедура получения первоначального нейросетевого решения с помощью построенного аппроксиматора чрезвычайно проста и не требует специальной квалификации, поэтому может производиться оператором непосредственно в поле с помощью персонального компьютера. Развиваемый М.И. Шимелевичем нейросетевой метод не заменяет другие классические методы решения обратных задач геоэлектрики, но является необходимым инструментом в арсенале геофизика-интерпретатора. Я считаю, что результаты, полученные М.И. Шимелевичем, вносят существенный вклад в комплекс математического обеспечения задач интерпретации больших геофизических данных.

Отмечу некоторые недостатки по тексту диссертации. Глава 1 является вводной и текст ее можно частично сократить за счет исключения фактов и положений, которые в последующих главах излагаются достаточно подробно. Текст диссертации содержит некоторое количество опечаток, однако при прочтении их смысл без особого труда восстанавливается.

Указанные 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 (по физико-математическим наукам), 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 Шимелевич Михаил Ильич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика.

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова»

18

А.Г.Ягола

22.11.2024

Контактные данные:

тел.: 84959391033, e-mail: yagola@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.02: Теоретическая физика и математическая физика

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, Москва

Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова,

дом 1, строение 2, физический факультет

тел.: 84959391033, e-mail: yagola@physics.msu.ru

Подпись профессора физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова А.Г.Яголы заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова доктор физико-математических наук

С.Ю.Стремоухов

