

**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**

Диссертационная работа Михаила Ильича Шимелевича посвящена совершенствованию методов решения обратных задач геоэлектрики с использованием последних достижений в области решения обратных задач и современных нейросетевых технологий. Тихоновский подход оказал огромное влияние на развитие теории геофизических методов по решению геологических задач. Вместе с тем, в случае нелинейных задач большой размерности, в задачах исследования анизотропных сред и в некоторых других задачах, подход А.Н. Тихонова на практике становится недостаточно эффективным. Однако использование современных подходов к решению поставленных в диссертации задач позволяет совершенствовать методы А.Н. Тихонова для развития теории и практики геоэлектрики при исследовании неоднородных изотропных сред, что и представлено в настоящей работе.

Работа состоит из шести глав, введения, заключения, списка литературы и охватывает теоретические и прикладные аспекты, включая численные методы и алгоритмы для решения нелинейных высокоразмерных задач, а также их практическую реализацию.

В Главе 1 рассмотрены математические постановки коэффициентных обратных задач геоэлектрики и обратных задач электромагнитного мониторинга; отмечаются основные проблемы, связанные с их нелинейностью, практической неоднозначностью и неустойчивостью. Развитие теории и методов решения обратных задач и искусственного интеллекта, а также быстрый рост вычислительных мощностей за последние

два десятилетия открывают новые возможности для расширения арсенала математических средств интерпретации геофизических данных. Это позволяет автору диссертации обоснованно сделать вывод о целесообразности и **актуальности** темы диссертационной работы.

Глава 2 посвящена исследованию характеристик практической неоднозначности (погрешности) решений обратных задач геофизики. Автор вводит локальные априорные и апостериорные оценки погрешностей, которые позволяют оценивать неоднозначность решений нелинейной обратной задачи дифференцированно по глубине исследований с учетом поглощения используемого геофизического поля. На основе априорных характеристик неоднозначности (модуля непрерывности обратного оператора) автор **количественно обосновывает неопределенность нелинейной обратной задачи** в конечно-параметрических классах сред. Неопределенность выражается в том, что с ростом числа выделяемых пространственных элементов, т.е. детальности решений, растет их неоднозначность (неустойчивость) и, таким образом, желаемая большая детальность решений фактически не может быть достигнута при заданных априорных ограничениях и ограничениях на неоднозначность. Формулируется условие неопределенности нелинейной обратной задачи, впервые введенное профессором В.И. Дмитриевым для линейных задач. На основе этого принципа автор развивает оригинальный метод адаптивной регуляризации нелинейной задачи, позволяющей достичь **компромисса между детальностью и неоднозначностью** решений обратной задачи при заданном уровне погрешности правой части с учетом реальной глубины проникновения геофизического поля и имеющейся априорной информации. Линейными аналогами такой регуляризации можно условно считать алгоритмы регуляризации, основанные на низкоранговой аппроксимации, при которой исходная матрица заданного ранга аппроксимируется матрицей, имеющей пониженный ранг путем усечения сингулярного спектра матрицы. В диссертации исследуются характеристики неоднозначности

многокритериальных обратных задач геофизики; показано, что априорные характеристики неоднозначности монотонно не возрастают при увеличении числа критериев.

В Главе 3 представлены авторские алгоритмы расчета различных типов характеристик практической неоднозначности с использованием методов Монте-Карло; доказывается сходимостью алгоритмов. Приводятся примеры расчета априорных характеристик для некоторых типовых 2D и 3D задач геоэлектрики. Дается описание алгоритма адаптивной регуляризации задачи геоэлектрики, работа которого иллюстрируется на численных примерах для задач геоэлектрики.

В Главе 4 развивается аппроксимационный нейросетевой (АНС) метод решения нелинейных обратных задач геоэлектрики, основанный **на построении приближенного непрерывного обратного оператора** задачи, так называемого аппроксиматора, с помощью нейросетевых полиномов на основе заранее построенного множества опорных решений прямых и обратных задач. Говоря простым языком, суть метода выражается тем, что он выносит суждение о строении геофизической среды на основе измеренных данных путем многомерной интерполяции между точками множества опорных решений рассматриваемой задачи. Формулируются условия существования аппроксиматоров и корректности задачи их построения.

В Главе 5 дано описание алгоритмов построения нейросетевых аппроксиматоров для задач геоэлектрики. Прогресс в алгоритмической области, по сравнению с предшествующими версиями нейросетевого метода достигается автором диссертации за счет того, что он **предлагает новую более сложную архитектуру нейросети, для обучения которой применяются современные методы глубокого обучения нейросетей, адаптированные к особенностям решаемой задачи.** Это позволяет повысить эффективность НС метода и решать обратные задачи геоэлектрики с числом искомым параметров порядка  $10^3$  и более для обширных пространственных областей измеряемых данных. Приводятся численные примеры решения обратных 2D и 3D задач

геоэлектрики на модельных данных, а также обратных задач электромагнитного мониторинга на основе локальных и/или разреженных сетей наблюдения.

Глава 6 посвящена применению разработанных методов на полевых профильных и площадных данных. Полученные автором результаты численных экспериментов подтверждают эффективность современной версии НС метода решения обратных задач геоэлектрики в общем цикле проводимых работ по интерпретации измеренных данных.

**Научная новизна и значимость** диссертационной работы М.И. Шимелевича заключаются в разработке и обосновании метода адаптивной регуляризации и создании современной версии НС метода решения нелинейных обратных задач геоэлектрики. Эти методы учитывают специфику решаемых обратных задач, обусловленную свойствами используемого квазистационарного электромагнитного поля, что обеспечивает их эффективность. При этом важно отметить практическую ориентацию диссертационной работы. Ценность результатов работы состоит в создании простого в использовании инструментария, пополняющего арсенал средств математической интерпретации данных геоэлектрики.

Представленные защищаемые положения являются обоснованными и объективно отражают содержание диссертационной работы. Список литературы включает классические и современные источники, необходимые для раскрытия темы. Текст диссертации корректен, все ссылки и цитаты соответствуют содержанию и основным выводам работы.

### **Замечания по работе**

1. Использование математических методов и операций ограничено физическими размерностями используемых величин как измеренных, так и вычисленных. Примером тому является использование логарифма электрического сопротивления. Такие функции как логарифм, синус, экспоненты и т.п. функции действуют на безразмерную величину, в то время как электрическое сопротивление является размерной величиной (омы, либо

омметры). В этом отношении в диссертации отсутствует физическая обоснованность подходов к решению поставленных задач, что не снижает ее значимость для теории и практики геоэлектрики.

2. В диссертации используются некоторые термины, не адаптированные к геофизике. В частности, термин «технология» и связанные с ним термины необходимо доопределить в геофизическом смысле. Имеются также некоторые сложности с терминологией в отношении предлагаемой классификации нейросетевых аппроксиматоров. Для удобства восприятия следовало бы добавить более подробные объяснения и отличия их от общепринятой терминологии.

3. В 3-м защищаемом положении утверждается: «при любой правой части». Однако есть ситуации, когда при некоторых типах источников электромагнитного поля, не создается внешнее электромагнитное поле. Например, когда сторонний электрический ток представлен градиентом некоторой скалярной функции, что имеет место в сейсмoeлектрическом эффекте. В этом случае имеет место электромагнитное поле, которое «вморожено» в область источников.

4. В 5-м защищаемом положении рассматриваются вопросы мониторинга современных геодинамических процессов. Идеология этой проблематики была сформулирована в конце 80-х, начале 90-х годов профессором Борисом Сергеевичем Световым. Развитие теории и практики этого подхода приводит к необходимости изучения анизотропных (точнее, макроанизотропных) электрических параметров горной породы. В этом случае макроанизотропные электрические параметры на макроуровне отражают микроскопические изменения строения горной породы под воздействием внешних факторов.

5. В диссертации представлено широкое теоретическое обоснование предлагаемых автором методов, применимых не только для задач геоэлектрики. В связи с этим, было бы полезно дополнить ее примерами работы предлагаемых алгоритмов, например, для нелинейных задач

потенциальных полей, что более явно отразило бы универсальность развиваемого подхода.

Представленные замечания не снижают значимости данного диссертационного исследования. Диссертация соответствует установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова требованиям к исследованиям 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. Диссертация 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.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Центра геоэлектромагнитных исследований  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт  
физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, г. Москва  
Александров Павел Николаевич

*подпись*

*дата*

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 840-7062, факс: +7 (495) 851-0917, e-mail: gemri@igemi.troitsk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация:

04.00.12 – Геофизические методы поисков и разведки месторождений  
полезных ископаемых

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, а/я 30, ЦГЭМИ ИФЗ РАН, РФ

Подпись сотрудника Института физики Земли

им. О.Ю. Шмидта РАН П.Н. Александрова удостоверяю:

*дата*

