

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Петросяна Рубена Нверовича
на тему: «Моделирование геоэлектрических разрезов и локальных геоплотностных
неоднородностей методами интеллектуального анализа данных»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 1.6.9 – Геофизика**

Представленная на рассмотрение работа посвящена абсолютно новой и максимально востребованной в настоящее время теме – применению интенсивно развивающихся сейчас методов искусственного интеллекта для решения традиционных, но также чрезвычайно актуальных задач прикладной геофизики. В целом она направлена на повышение достоверности результатов геофизических исследований, снижение неоднозначности моделей, получаемых в результате применения различных методов интерпретации. Конкретно автором рассмотрены модели, получаемые методами вертикального электрического зондирования и гравиразведки.

Актуальность выбранной темы является следствием ряда процессов, в которые вовлекается современная геофизика. Классические методы решения обратных задач геофизики, основанные на линейной алгебре и поиске единственного, регуляризованного решения, имеют ограниченные возможности на фоне доказанного на теоремном уровне бесконечного множества решений для многих обратных задач. Они дают результат в виде одного из вариантов разреза, который «хорошо» аппроксимирует данные, но не дает понимания всей области возможных решений. Сейчас от геофизических прогнозов требуются количественные оценки риска (например, при работах на площадках под ответственное строительство), и такой подход становится недостаточным. Рассматриваемая работа актуальна, потому что предлагает некую смену парадигмы: от поиска единственной «истинной модели» к статистическому анализу ансамбля допустимых моделей. Это соответствует современному тренду - переходу от детерминированных к вероятностным и стохастическим моделям, где ответом является не одно число, а распределение вероятностей. Еще один тренд – это возрастание объема и детальности данных практически для всех геофизических методов. Традиционные алгоритмы не справляются с этим объемом, сложностью и многомерностью. Методы машинного обучения – актуальное пополнение арсенала геофизика-интерпретатора. Также, безусловно, следует упомянуть известный, но все равно актуальный факт, что применение методов геофизики (и их достоверная интерпретация) напрямую связано с экономической эффективностью изысканий, в том числе под строительство, которые в основном рассматриваются в работе.

Исследование имеет, несомненную **практическую значимость**. Ее можно сформулировать как создание нового технологического инструментария, который переводит процесс принятия инженерных и геологоразведочных решений на более высокий, количественно обоснованный уровень. Рассмотренные вероятностные методы оценки положения объектов в разрезе позволяют

обоснованно планировать проектные решения, выбирать места проверочного бурения и просчитывать финансовые риски. Подтверждение практической значимости в том, что разработанные технологии уже применяются для анализа результатов геофизики в производственных инженерно-геологических работах.

Значимость результатов, полученных автором для науки и практики и конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации можно сформулировать следующим образом. Переход от поиска единственного решения к ансамблю моделей и возможность оценки неоднозначности это новый и мощный способ интерпретации геофизических данных. В данном случае нейронная сеть применена не как «черный ящик», а как регуляризирующий оператор, что формализует и автоматизирует учет априорной информации, заложенной в обучающей выборке. Разработанные автором программы, реализующие вычислительные алгоритмы решения обратных задач (с помощью нейронных сетей, методы роя частиц, Монте-Карло) обеспечивают автоматизацию и ускорение обработки данных, возможность проведения экспресс-интерпретации в полевых условиях. Программная реализация на базе библиотек Keras, DEAP позволяет внедрить разработки в существующие технологические цепочки геофизических и изыскательских компаний без необходимости полной замены ПО. Алгоритм нейросетевой инверсии ВЭЗ может быть применен как готовое решение для первичной обработки данных в полевых условиях. Это позволит оперативно корректировать программу исследований на месте. Предложенные автором алгоритмы (роя частиц, генетический алгоритм) можно адаптировать для решения обратных задач других геофизических методов (сейсморазведка, магниторазведка) в рамках комплексирования методов и анализа множества решений. Разделы диссертации, посвященные вероятностным методам и интеллектуальному анализу данных могут быть внедрены в учебные курсы по интерпретации геофизических данных, использованы в качестве лабораторного практикума для студентов-геофизиков.

Структура и содержание диссертации. Представленная работа содержит 124 страницы с текстом, четырьмя таблицами, и 58 рисунков. Список литературы содержит 155 источников, среди которых имеются российские, советские и иностранные публикации. Используемые автором научные работы отражают современное состояние и накопленный опыт исследований по проблеме. Во введении изложены актуальность исследования, цель и конкретные задачи работы. В разделе «степень разработанности» перечислены исследователи, внесшие вклад в выбранную тему. Раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Кратко описана методология и методы исследования и сформулированы три положения, выносимые на защиту. Указана также степень достоверности и апробация результатов с указанием списка конференций, где работа была доложена. Описан личный вклад автора и приведены сведения об источниках исходного практического материала для работы.

Первая глава содержит детальный обзор современных способов решения обратной задачи геофизики. Акцентируется проблема, что для многих задач, возникающих при интерпретации

разных геофизических методов, множество решений обратной задачи не просто бесконечно, а имеет мощность континуум, и кроме того, быть радикально неустойчивым к малым погрешностям в исходных данных. Эта проблема принципиально не разрешима даже в случае полного отсутствия помех, избежать которые в реальных условиях невозможно, и при самых высоких детальностях и точностях выполнения геофизических измерений. Дается краткое описание искусственных нейронных сетей, в целом, и применения их для задач геофизики. Описаны стохастические методы оптимизации, результатом которых является некая область решений, распределение вероятности.

Обоснованию первого защищаемого положения – разработке устойчивого метода решения одномерной задачи ВЭЗ – посвящена *вторая глава*. Автор доказал, что предложенный им конвейерный метод – это не просто применение нейросети, а создание оригинального инструмента интеллектуального анализа данных. Этот инструмент устойчив, т.к. работает как регуляризатор, ограничивая решения рамками обучающей выборки, обладает быстротой и помехоустойчивостью, кроме того, гибко встраивается в процесс интерпретации, задавая начальное приближение для последующего статистического анализа.

Третья глава доказывает второе защищаемое положение, детально описывая разработанные автором программы и алгоритмы на основе методов стохастической оптимизации (Монте-Карло, роля частиц, генетический алгоритм), которые могут генерировать "репрезентативное множество интерпретационных моделей" для задач гравirazведки и ВЭЗ. Для каждого метода разработаны программы (PODBOR_ST, PDBR_ROI), на языках Delphi и Python с применением специальных библиотек, например DEAP. Приведены таблицы с количественными результатами по помехоустойчивости (табл. 3.1.1), зависимости точности от числа испытаний (табл. 3.1.2), анализу генетического алгоритма (табл. 3.3.1). Радует честность автора открыто указывающего на проблемы: например низкую помехоустойчивость генетического алгоритма, "зазубренность" разрезов, линейная зависимость времени от числа точек.

Ключевая цитата, раскрывающая суть *четвертой главы*: «Противоречие, обусловленное попыткой представить множество допустимых решений ... одним из его элементов, снимается применением пространственно-статистического анализа...». Глава структурирована в виде описания двух дополняющих друг друга способов работы с множеством решений: детерминированном (гарантированном) и статистическом (аддитивные технологии).

Обобщения автора, структурированные по защищаемым положениям, сведены в заключение. В целом автор, несомненно, демонстрирует глубокое понимание не только того, как работают методы стохастической оптимизации, но и как реализовать их в рабочем программном коде.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. На защиту автором вынесено 3 положения, образующих единую методологическую базу нового подхода к анализу геофизических данных. В первом заявлен мощный современный инструмент интеллектуального анализа результатов метода

вертикального электрического зондирования, основанный на нейросетевой аппроксимации. Это означает, что сеть выявляет глубинные, неочевидные связи между кривой ВЭЗ и параметрами разреза, действуя как «умный» регуляризатор. Во втором положении заявляется об использовании стохастической оптимизации для формирования множества вариантов модели, т.е. сформировать «облако решений». В качестве отправной точки может служить результат, полученный на первом этапе с помощью нейросети. Финальным этапом, как указывается в третьем защищаемом положении, облако решений подвергается анализу с целью снижения неопределенности, за счет удаления практически нереализуемых решений.

Еще, считаю важным отметить, что все практические примеры, которые использует автор для демонстрации возможностей алгоритмов – это результаты реальных полевых работ, проведенных на различных объектах в разных частях страны.

Сформулированные положения и выводы исчерпывающим образом обоснованы в тексте диссертации, структура которой описана выше в настоящем отзыве, опубликованы в 19 печатных работах и прошли апробацию на 6 профильных конференциях и семинарах. Автором написано и зарегистрировано 5 программ для ЭВМ.

Замечания и вопросы, ответы на которые хотелось бы получить во время защиты

Раздел 2.2 содержит изложение базовых принципов (функции активации, обратное распространение, оптимизатор Adam), которые являются стандартным знанием в области машинного обучения. Этот раздел можно было бы *несколько сократить*, оставив только обоснование выбора конкретных архитектур и функций для задачи ВЭЗ (например, почему выбран полносвязный перцептрон, а не рекуррентная сеть, несмотря на теоретические преимущества последней). Он создает впечатление «учебного» отступления и смещает фокус с авторского вклада.

Двойственность в интерпретации невязки (σ). Возникает противоречивое отношение к невязке как к метрике качества. С одной стороны, решения с низкой невязкой (например, генетический алгоритм на рис. 2.3.5) критикуются как «переобученные». С другой стороны: Высокая невязка решений ИНС (рис. 2.4.2, 2.4.3 – 48,1% и 51,3%) представляется как допустимая, так как «решения в целом достаточно точно повторяют исходный ... разрез». Можно было бы порекомендовать ввести альтернативный, содержательный критерий оценки качества помимо невязки, например количественную метрику структурного сходства.

Что такое «репрезентативное множество»? Количественный критерий дан лишь для генетического алгоритма («близко к 30-50» элементов). Для Монте-Карло и роя частиц критерий репрезентативности сформулирован слабее.

Масштабируемость на 3D. Все примеры для гравirazведки — 2D. Как методы поведут себя в 3D задаче, где пространство параметров существенно больше?

Сравнительная эффективность методов. Почему для гравirazведки выбраны два разных метода (Монте-Карло и роя частиц)? В каких случаях один предпочтительнее другого?

Язык программирования и библиотеки. Упомянув Python и Keras, стоит в скобках указать версии или хотя бы год, так как эти инструменты быстро развиваются.

В целом основная критика направлена не на суть метода, которая сильна, а на стиль изложения и строгость аргументации. Сделанные замечания не влияют на безусловно положительную оценку выполненного исследования.

Проанализировав текст диссертации и опубликованные работы, можно дать следующую оценку **достоверности и новизны полученных результатов**. На синтетических данных проведена проверка корректности работы алгоритмов и их принципиальная возможность решать поставленные задачи. Далее, все методы применены к реальным материалам ВЭЗ (пос. Октябрьский) и гравirazведки (Норильский район). Контроль осуществлялся путём сравнения с результатами классической интерпретации («подбором» в программе «ЗОНД»). Доказана практическая работоспособность алгоритмов в реальных, зашумленных условиях. Автор не просто применяет методы по отдельности, а строит из них взаимодополняющую систему, где результаты одного проверяются и уточняются другим. Например: нейросеть даёт устойчивое, но «размытое» решение а генетический алгоритм его уточняет, значительно снижая невязку и сохраняя геологическую картину. Это доказывает, что оба метода «видят» один и тот же геологический объект, но с разной детальностью. Кроме того, множество моделей, созданное генетическим алгоритмом или нейросетью, подвергается независимому статистическому анализу. Функция локализации объективно, без участия «подбора», выявляет границы, близкие к эталонным. Таким образом, системная согласованность независимых методов является мощнейшим аргументом в пользу достоверности методологии.

Новизна работы не в создании отдельных алгоритмов (нейросети, генетический алгоритм, метод Монте-Карло - известны), а в их синтезе и концептуальном переосмыслении их роли интерпретации. Автор реализует принцип, согласно которому продуктом интерпретации является не одна «лучшая» модель, а статистически обработанное множество (ансамбль) допустимых моделей. Это прямое развитие «гарантированного подхода» Канторовича-Балка, но с применением современных стохастических алгоритмов. Разработана и реализована сквозная технологическая цепочка: генерация множества решений - статистический анализ ансамбля - визуализация в виде карт вероятности/устойчивости. Это, безусловно, новая методология интерпретации. Приведенные в диссертации описания и иллюстративные материалы достаточны для того, чтобы не сомневаться в достоверности каждого этапа работы и полученных результатов.

Общая оценка работы. Представленная диссертационная работа предоставляет значимый вклад в развитие теории интерпретации геофизических данных, предлагает готовую технологию, обеспечивающую переход к более доказательной и ориентированной на оценку рисков геофизике. Ее внедрение может обеспечить повышение экономической эффективности и снижение рисков в строительстве и геологоразведке.

С учетом вышеизложенного, считаю, что диссертация «Моделирование геоэлектрических разрезов и локальных геоплотностных неоднородностей методами интеллектуального анализа данных» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной проблемы, имеющей значение для развития, как прикладной геофизики, так и вычислительной математики, в ней изложены новые научно обоснованные разработки, имеющие значительное значение для данных отраслей знаний. Убежден, что указанная работа полностью соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденных Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (с изменениями и дополнениями), а ее автор Петросян Рубен Нверович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика

Официальный оппонент – кандидат технических наук по специальности
25.00.10- геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых,

Заведующий лабораторией региональной геофизики,
ФГБУН Институт геофизики им.Ю.П.Булашевича УрО РАН
Муравьев Лев Анатольевич

Почтовый адрес: 620016 г.Екатеринбург, ул.Амундсена 100.

Тел: +79049851375. e-mail: mlev@mail.ru

Я, Муравьев Лев Анатольевич даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета 24.2.358.01, и их дальнейшую обработку.

04.02.2026 г

