

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата
технических наук Шклярука Алексея Дмитриевича
на тему: «Применение нейронных сетей при анализе аномальных
гравитационных и магнитных полей» по специальности 1.6.9. Геофизика

Диссертационная работа Шклярука А.Д. посвящена разработке численных подходов к решению ряда задач гравиразведки и магниторазведки при помощи методов машинного обучения и искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей). Выбор направления исследований обусловлен стремительным развитием компьютерных технологий и методов искусственного интеллекта в последние двадцать лет в мире и их успешным применением в различных областях знания, в которых требуется обработка больших объемов данных. В современной геофизике и, в частности, в гравиразведке и магниторазведке, исследователю также приходится иметь дело с большими объемами данных, при этом их рост и усложнение решаемых задач продолжают непрерывно. В связи с этим представляет большой исследовательский интерес попытка применения современных методов на основе искусственных нейронных сетей для решения классических задач геофизики, связанных с анализом аномальных гравитационных и магнитных полей. Все указанные аспекты обосновывают **актуальность** выбранной темы диссертационного исследования.

В диссертационной работе Шкляруком А.Д. рассмотрены и применены методы на основе нейронных сетей для решения ряда актуальных задач интерпретации аномальных гравитационных и магнитных полей. Полученные новые подходы позволяют автоматизировать процесс составления схем аномалий, повысить точность интерпретации данных, сократить временные затраты. В частности, автором предложены: методика генерации синтетических обучающих выборок для сверточных нейронных сетей; методы выделения линейных и изометричных структур в аномальных полях,

основанные на нейронных сетях; подход к реконструкции структурных поверхностей с использованием априорных геофизических данных. Кроме того, автором внедрены новые подходы машинного обучения в существующие методики интерпретации потенциальных полей, что значительно расширяет их функциональные возможности. Перечисленные результаты составляют **новизну** диссертационной работы.

Опишем вкратце **структуру** диссертации и содержание основных **результатов**. Диссертация изложена на 138 страницах и состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 73 рисунка и 15 таблиц. Список литературы включает 127 источников.

Во **введении** формулируются цели работы, обсуждается ее актуальность и научная новизна, приводятся защищаемые положения.

В **первой главе** кратко изложены теоретические основы нейронных сетей, рассмотрена история их развития, приведена классификация основных типов нейронных сетей (многослойные перцептроны, сети радиально-базисных функций, рекуррентные, сверточные), кратко изложена техника обучения нейронных сетей.

Во **второй главе** дан обзор применения нейронных сетей в геофизике, акцент сделан на примерах по интерпретации гравитационных и магнитных полей. Отмечается общее небольшое число работ по применению нейронных сетей в грави- и магниторазведке, а также высокая перспективность этих методов для решения задач интерпретации. Выделены наиболее проработанные направления, к которым отнесены решение обратных задач, автоматическое выделение морфологических особенностей и границ в потенциальных полях. Обращается внимание на важность этапа подготовки данных для обучения нейронных сетей для последующего их применения в геофизике. Сделан вывод о потенциальной возможности автоматизации интерпретации и решения сложных геофизических задач при помощи нейронных сетей, для чего автором предлагаются новые подходы, изложенные в следующих главах.

Третья глава посвящена разработке и апробации нового метода автоматизированного выделения изометричных аномалий гравитационного и магнитного полей с использованием технологий глубокого обучения. В качестве примера автором рассмотрены аномалии масконов Луны, для чего им была предварительно разработана методика создания синтетической выборки для обучений сверточной нейронной сети. Выбор наилучшей нейронной сети сделан на основе сравнения пяти архитектур, наиболее часто применяемых в задачах семантической сегментации (U-Net, U-Net++, UNet 3+, Attention U-Net, R2U-Net). При сопоставлении применялась метрика Intersection over Union. Автором показано, что базовая U-Net с предобученными весами VGG-16 достигает наивысшей точности по этой метрике и дает наилучшую сходимость с эталонными данными.

Дополнительно автором проведено сравнение с классическими методами компьютерного зрения, подтвердившее значительное преимущество подхода на основе сверточных нейронных сетей, которое оказалось особенно заметно при работе со слабовыраженными аномалиями

В четвертой главе проводится разработка и апробация метода автоматизированного выделения линейных аномалий в гравитационных и магнитных полях на основе сверточных нейронных сетей. Автором создан универсальный подход для картирования линейно-вытянутых структур, выделение которых традиционными методами осложнено влиянием помех и сложным геологическим строением.

В качестве примера для отработки методов на основе полученной нейронной сети рассмотрено аномальное магнитное поле участка Баренцева моря. Для комплексного анализа магнитного поля автором разработана методика выделения как линейных, так и изометричных аномалий, приуроченных к приповерхностным источникам. Сравнение с экспертной интерпретацией показало хорошую визуальную корреляцию, при этом метод обнаружил несколько, ранее не выделенных, объектов. Автором сделан вывод о важном преимуществе метода – высокой скорости обработки обширного

массива данных по сравнению с традиционными методами ручной интерпретации.

Пятая глава посвящена разработке метода на основе нейронных сетей для восстановления морфологии структурных горизонтов по данным потенциальных полей с привлечением априорной информации. Эффективность предложенного метода подтверждена автором на серии модельных и реальных экспериментов. Основным практическим достижением является разработка метода одновременного восстановления не одной, а сразу трех структурных границ. Кроме того, для решения задачи восстановления границ рассмотрены не только сами поля, но их трансформанты (высокочастотные и низкочастотные компоненты, результаты пересчета вверх). Автором численно показано, что нейронные сети, обученные на априорной информации на эталонных участках, решают задачу реконструкции структурных границ разреза более устойчиво по сравнению с другими методами машинного обучения, особенно при необходимости интерполяции и экстраполяции данных.

В заключении автором резюмируются полученные в диссертационном исследовании результаты, выводы и рекомендации.

Автору диссертационного исследования принадлежат все постановки задач, разработка теоретических основ их решения, программная реализация предложенных подходов с проведением вычислительных экспериментов и анализом полученных результатов, формулировка выводов и рекомендаций.

Содержание автореферата полностью **соответствует** содержанию диссертации.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, а также научных выводов и рекомендаций, сделанных в диссертации

На защиту автором выносятся следующие положения:

1. Методика создания репрезентативных синтетических выборок, основанная на расчете эффектов от тел простой геометрической формы с добавлением

искусственной помехи, позволяет эффективно обучать нейронные сети для сегментации аномальных гравитационных и магнитных полей.

2. Применение сверточных нейронных сетей эффективно решает задачу выделения линейных и изометричных аномалий магнитных и гравитационных полей в сложных геолого-геофизических условиях.
3. Разработанный метод на основе нейронных сетей, обученных на эталонных участках, эффективно решает задачу восстановления морфологии границ разреза по комплексу геофизических данных.

Все практические результаты диссертации получены при помощи методов машинного обучения и применения искусственных нейронных сетей различных архитектур. Результаты сопровождаются подробным обсуждением, корректным геолого-геофизическим обоснованием и сравнением с традиционными методами машинного обучения, применяемыми в геофизике. Все научные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, **достоверны**, обладают научной **новизной**, имеют практическое или теоретическое **обоснование**. Все три положения, выносимых на защиту, **обоснованы**.

Полученные в диссертации практические результаты весьма полезны и могут в дальнейшем использоваться при решении научных и прикладных задач, связанных с автоматизацией процессов интерпретации геофизических данных, и могут применяться в различных областях геофизики – от поиска полезных ископаемых до изучения глубинного строения Земли и иных космических тел.

Диссертационная работа носит прикладной характер, а основные результаты **опубликованы** в трех статьях в журналах из списка RSCI Web of Science. Кроме того, по теме диссертационного исследования автором получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация производит хорошее впечатление, однако приведу ряд **замечаний**, которые носят редакционный характер:

- 1) Описание элементов нейронных сетей и различных алгоритмов, данное в главе 1, содержит, в основном, словесные формулировки, иногда с достаточно общими фразами («градиенты используются для корректировки весов и смещений», стр. 23; определение функции активации и пр., стр. 13-14). Формализованное математическое описание встречается лишь в нескольких случаях. Это усложняет восприятие вводимых понятий и делает весь материал не очень четким и строгим.
- 2) В работе без пояснения используются некоторые математические термины, которые являются многозначными в математике и в каждом случае требуют конкретизации. Например, «дискретная свертка», «ядро», «фильтр Баттерворта» и др. Во всех этих случаях следовало, как минимум, указать пространства, в котором определены указанные операции.
- 3) В диссертации насчитывается всего лишь 20 математических формул, что представляется довольно малым для исследования по данной теме. При этом в ряде формул есть неточности (например, ненужный знак минуса в формуле (3) на стр. 13 перед коэффициентом a_k^2 ; другие примеры приведены ниже).
- 4) Проведенный в главе 2 (стр. 26-46) обзор работ по применению нейронных сетей в задачах геофизики носит слишком односторонний характер: в основном автором отмечается успешность их применения и дается мало критических выводов. Справедливо отмечается проблема подготовки обучающих выборок (стр. 45), но можно было выделить и другие проблемы, возникающие при работе с НС.
- 5) Работа содержит избыточный иллюстративный материал в ущерб ясности и строгости изложения. Так, рисунки 6-7 (стр. 19), приведенные для иллюстрации принципа работы сверточной нейронной сети, не имеют смысла без определения операции свертки матриц. Эти рисунки можно было не приводить. Также нет необходимости в ряде рисунков в

обзоре литературы, которые взяты из статей других авторов (рис. 8-9, 20-21). К тому же, подписи на некоторых рисунках неразборчивы (рис. 21).

- 6) Стр. 21: в формуле (9) не ясна область принимаемых значений величины \hat{y}_i (предсказанная вероятность принадлежности классу). Вероятность, вообще говоря, может быть нулевой, но формула (9) в этом случае не определена. То же самое относится к формуле (14) на стр. 22.
- 7) Не определен ряд используемых терминов: «несбалансированная выборка» (стр. 22), «шаг обучения» (стр. 24), «функция активации softmax» (стр. 38), «метод tilt-depth» (стр. 38).
- 8) Стр. 23: определение метода Adam слишком кратко и непонятно. Следовало уделить этому методу больше внимания, учитывая, что далее в работе он применяется неоднократно. А именно, из определения не ясно, что конкретно здесь понимается под адаптивностью, как именно учитываются амплитуды изменения весов (для каждого веса определяется свой шаг или для всех берется одинаковый) и о какой сходимости идет речь (есть два итерационных цикла – в обучении и в оптимизаторе). Кроме того, стоило пояснить, за счет чего достигается ускорение сходимости и как гарантируется сходимость к глобальному минимуму в методе.
- 9) Стр. 23: изложение метода RMSprop, как и метода Adam, очень краткое. Из фразы «что помогает избежать колебаний» невозможно понять, о каких колебаниях идет речь, откуда они возникают и встречается ли эта проблема в том же Adam.
- 10) Обзор работ по применению нейронных сетей (стр. 26-46) следовало дополнить анализом того, в какой степени результаты зависят от исследователя (представляется, что в очень большой). Выше отмечалось (стр. 25), что «критическое значение имеет корректная организация обучения, включая выбор функций потерь, оптимизаторов и метрик качества, а также обязательное применение методов

регуляризации». Это верно, но необходимо пояснить, как будет гарантироваться исследователем «корректность» подбора этих гиперпараметров. Возможно, стоило сформулировать ряд требований к каждому этапу обработки, сделав ее, таким образом, более формализованной.

- 11) В обзоре большинства работ (стр. 26-46) отмечается, что авторами показана эффективность применения нейронной сети. Однако не всегда ясно, что понимается под эффективностью в каждом конкретном случае.
- 12) Стр. 28: «с использованием алгоритмов Монте-Карло». Вероятно, имелся в виду метод Монте-Карло.
- 13) Стр. 29: «приведены оценки влияния случайного шума». Не сказано, на что проверялось его влияние. Кроме того, говоря о случайном шуме (здесь и далее, например, на стр. 30, стр. 101 и т.д.) не поясняется, чем он обусловлен (измерительной аппаратурой? сторонними помехами?). По этой причине не ясно, насколько вводимые модели шума осмыслены и имеют ли какое-либо отношение к реальности.
- 14) Стр. 29: «Авторы высоко оценивают точность результатов». Вероятно, имелось в виду, что показана высокая точность результатов.
- 15) Стр. 30: «Анализируя опубликованные работы». Нет ссылок на работы.
- 16) Стр. 30: «Можно выделить несколько направлений... Обработка аэрогравиметрических данных». Вполне можно было сформулировать более широко – обработка данных инерциальной гравиметрии (или гравиметрии на подвижном основании), поскольку принцип измерений в авиационной, морской и в гравиметрии на автомобиле одинаков.
- 17) Стр. 30: «Рассмотрим его решение на примере работы коллектива авторов из кафедры геофизики инженерингового факультета». Фраза явно требует пересмотра с точки зрения русского языка.

- 18) Стр. 31: «алгоритмы MLPNN и RBFNN применены к реальным данным для проверки их согласованности». Неясно, согласованности чего с чем.
- 19) Стр. 32: «Модель, полученная алгоритмом на основе нейронных сетей, отвечает меньшей невязке, чем метод подбора». Следовало сделать оговорку, что этот результат мог быть достигнут и при переобучении нейросети.
- 20) Стр. 33: «нет необходимости в начальной информации о параметрах погребенной структуры, таких как глубина и ширина». Вряд ли это можно считать преимуществом подхода на основе нейросети в данном конкретном примере, поскольку в традиционных подходах (например, в градиентном спуске) начальная информация нужна лишь для запуска итерационного процесса. Чувствительность подходов к начальной информации во многом зависит уже от сложности решаемой задачи.
- 21) Стр. 33: «предлагают подход, который позволяет снизить зависимость от априорных данных». Требуется пояснение, за счет чего это возможно было бы достичь. Априорные данные все же необходимы и для нейронной сети (на стадии обучения) и при этом в больших объемах в силу сложности задачи (совместная инверсия данных гравитационной и магниторазведки).
- 22) Стр. 33: «последовательные слои». Опечатка.
- 23) Стр. 34: «преимущество над обычными ручными или автоматическими методами, отличающихся неустойчивостью и высокими вычислительными затратами». Вероятно, имеется в виду численная неустойчивость, возникающая из-за некорректности обратной задачи, но в этом случае прибегают к регуляризации. Насчет вычислительных затрат, при использовании нейронных сетей они тоже велики. Поэтому противопоставление не вполне понятно.

- 24) Стр. 40: «учет возмущающих ускорений». В механике нет такого понятия. Какие есть ускорения, такие есть.
- 25) Раздел 2.2.3 (стр. 40) посвящен возможности применения нейронных сетей к обработке данных аэрогравиметра, но фактически сводится к пересказу одной статьи. При этом весь раздел оказывается лишенным смысла, поскольку рассмотренная статья содержит массу методологических ошибок (полностью проигнорированы данные спутниковой навигации и измерения гироскопов платформы, предполагается реальное время вместо постобработки и т.п.). Этот раздел следовало исключить.
- 26) Раздел 2.2.4 (стр. 40) базируется на статье, в которой предпринята попытка построения модели поля для территории размера $12^{\circ} \times 8^{\circ}$ по 32 пунктам стационарных измерений. Такая постановка задачи в принципе лишена смысла, поскольку набор данных слишком разрежен, чтобы выделить достоверно хотя бы несколько первых гармоник. Для этих целей в первую очередь всегда берутся данные спутниковой гравиметрии. Этот раздел следовало исключить.
- 27) В разделе 3.3.1 (стр. 54-56) проводится сравнительный анализ различных архитектур сверточной нейронной сети U-Net. Однако было бы интересно увидеть сопоставление также с результатами применения других сверточных нейронных сетей, подходящих для задач сегментации, например, Mask R-CNN, YOLO-seg (v8-v11). Почему-то эти сверточные сети в работе не упоминаются.
- 28) Стр. 54-56: при сравнении результатов сегментации используется несколько различных метрик, но не указано, какая выбрана функция потерь.
- 29) Стр. 58: неясно, за счет чего результаты применения нейронной сети U-Net с предобученными весами VGG-16 дали лучший результат, чем с ResNet и EfficientNet, которые считаются более точными моделями. Кроме того, сделанный по одному числовому эксперименту

вывод о превосходстве VGG-16 распространен автором на остальную часть диссертационного исследования, исключив из него, таким образом, сопоставление архитектур в других задачах.

- 30) Стр. 65, стр. 78: в числовых экспериментах была выбрана постоянная скорость обучения нейронной сети. Однако стоило пояснить, почему именно постоянная скорость выбрана, а не адаптивная.
- 31) Стр. 92: определение гауссовской регрессии очень приблизительное. Не приводится информации ни о математическом ожидании процесса, ни о его корреляционной функции. Кроме того, дано неверное пояснение одного из параметров в формуле (20): « σ^2 - ковариационный шум гауссовского процесса», должно быть: интенсивность белого шума.
- 32) Стр. 109: не ясно, зачем при сопоставлении методов рассматривался в том числе и довольно старый метод KNN, который является весьма прямолинейным (негибким).
- 33) Стр. 109: «сильноскоррелированных». Такого слова нет, должно быть «сильно коррелированных».

Вместе с тем, 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 (технические науки), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено 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 Шклярук Алексей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9. Геофизика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории управления и навигации кафедры прикладной механики и управления механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

ВЯЗЬМИН Вадим Сергеевич

18.03.2026 г.

Контактные данные:

тел.: + , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.01. Теоретическая механика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
механико-математический факультет

тел.: +7 495 939 1263, e-mail: dean.reception@math.msu.ru

Подпись сотрудника В.С. Вязьмина удостоверяю:

Начальник отдела в

Т.А. Соколова

19.03.2026 г.