

**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 Алексея Дмитриевича посвящена проблеме интерпретации аномальных магнитных и гравитационных полей, а именно, адаптации и развитию методов машинного обучения для распознавания аномалий в потенциальных полях и реконструкции границ горизонтов.

**Актуальность выбранной темы диссертации** обусловлена ее направленностью на внедрение современных методов машинного обучения в практику интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки, что особенно важно в условиях, с одной стороны, увеличения объёмов информации и требований к точности прогнозов при поиске полезных ископаемых, а с другой – зашумленности исходных измерений.

Целью работы является разработка новых методов на основе нейронных сетей для решения ряда задач интерпретации аномальных гравитационных и магнитных полей, а именно: выделение линейных и изометричных структур в аномальных гравитационных и магнитных полях и реконструкция геологических границ по гравитационным и магнитным полям с опорой на априорные геолого-геофизические данные.

Представленные в работе задачи качественной и количественной интерпретации потенциальных полей имеют различные неоднозначные методы решения. Применение предлагаемых в работе подходов расширяет возможности автоматизации интерпретации, позволяя выявлять сложные нелинейные зависимости в данных без явного задания аналитических моделей, что снижает субъективность и ускоряет процесс анализа.

### **Степень обоснованности положений, выносимых на защиту**

На защиту вынесены три защищаемых положения. Первое положение посвящено методике создания репрезентативных синтетических выборок на основе моделей тел простой геометрической формы с добавлением искусственной помехи, что позволяет эффективно обучать нейронные сети для сегментации аномальных гравитационных и магнитных полей. Второе положение утверждает, что применение свёрточных нейронных сетей архитектуры U-Net с предобученными энкодерами позволяет эффективно решать задачу выделения линейных и изометричных аномалий магнитных и гравитационных полей даже в сложных геолого-геофизических условиях. Третье положение говорит в пользу того, что разработанный метод на основе нейронных сетей, обученных на априорных данных с эталонных участков, позволяет эффективно решать задачу восстановления морфологии границ разреза по комплексу геофизических данных.

Все положения, выносимые на защиту, раскрыты в тексте диссертации и подтверждаются теоретическим обоснованием, численным моделированием и экспериментальной апробацией предлагаемых методов. Автор убедительно демонстрирует соответствие полученных результатов заявленным защищаемым положениям, что свидетельствует о научной строгости и методологической состоятельности проведённого исследования.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается применением современных вычислительных инструментов, корректным использованием математического аппарата, а также всесторонней проверкой работоспособности разработанных методов на синтетических и реальных данных. Результаты работы верифицированы путем сравнения с известными методами интерпретации и подтверждены экспертными оценками, что позволяет считать их научно обоснованными и воспроизводимыми.

По результатам исследований, представленных в диссертации, автором опубликованы три статьи, где он является первым автором, в российских журналах из списка Russian Science Citation Index (RSCI) Web of Science. Также Шкляруком А.Д. получены три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все вышеперечисленные работы соответствуют теме диссертации и полностью отражают ее содержание.

**Новизна научных результатов** заключается в разработке оригинальных методов на основе нейросетевых технологий, адаптированных для решения задач интерпретации аномальных гравитационных и магнитных полей. Автором предложены новые подходы к созданию синтетических обучающих выборок, методы автоматического выделения линейных и изометричных аномалий, а также методы восстановления структурных границ, что вносит существенный вклад в развитие методологии интерпретации геофизических данных.

К несомненным достоинствам работы следует отнести то, что эффективность предложенного подхода убедительно продемонстрирована в трех совершенно разных прикладных задачах – задаче классификации, задаче распознавания линейных аномалий и задаче определения структурных границ. При этом, наилучшим образом проработана Глава 5, где рассматривается задача восстановления морфологии структурных горизонтов по магнитному и гравитационному полям.

Текст диссертации характеризуется грамотным изложением, хорошо структурирован и логично упорядочен. Каждая из пяти глав в конце сопровождается соответствующими выводами. Список литературы содержит достаточное количество источников (127).

### **Замечания**

Общие замечания:

1. Защищаемое положение №2 «Применение сверточных нейронных сетей эффективно решает задачу выделения линейных и изометричных аномалий магнитных и гравитационных полей в сложных геолого-геофизических условиях» сформулировано неудачно, т.к. не отражает непосредственного вклада автора в результат, который выносится на защиту. Здесь стоило больший акцент сделать именно на предложенных автором подготовительных мероприятиях, включающих создание специфической обучающей выборки и выбор предобученных энкодеров (т.е. фактически настройку СНС), которые и позволили эффективно решить указанную задачу при помощи СНС.

2. В диссертации отсутствует аргументация в пользу того, чем нейронные сети лучше классических методов распознавания образов в рассматриваемых задачах геофизики. Было бы неплохо привести хотя бы несколько примеров сравнения с классическими методами на одном наборе данных.

3. Автор нацелен на использование разного рода нейронных сетей, однако в работе ни слова не сказано о так называемой «физически информированной нейронной сети» (Physics-informed neural networks, ФИНС). ФИНС в своей архитектуре при обучении учитывает физические законы, отвечающие предметной области. В данном случае, например, могло бы учитываться условие потенциальности магнитного поля, удовлетворяющее уравнению Лапласа. Такой вид нейронных сетей с недавних пор является популярным инструментом в геофизике, и в данном исследовании использование ФИНС представляется вполне уместным.

4. В Главах 3-5 регулярно фигурирует тезис о том, что решается задача «автоматизированного выделения аномалий» (см., напр., с. 47, с. 89 и др.). Однако предлагаемый автором подход включает большой блок подготовительной работы (по ощущениям составляющий бóльшую часть всей работы), выполняемой «вручную» экспертом: подготовку синтетических обучающих выборок и предварительную обработку реальных наблюдений для

анализа, настройку архитектуры нейронной сети под ту или иную задачу и оценку применимости тех или иных моделей в трех классах геофизических задач: распознавании изометричных аномалий, распознавании линейных аномалий и определении структурных границ. Таким образом, более уместным был бы термин «полуавтоматический».

5. В приложениях к реальным данным, описанных в Главах 4 и 5, не хватает физической интерпретации полученных результатов. В частности, никак не интерпретируются распознанные изометричные аномалии магнитного поля в Главе 4. Было бы желательно сопоставить полученные карты с другими картами, которые традиционно привлекаются в подобного рода исследованиях. К ним относятся карты геологического строения региона, тектоники, разломов, геоморфологических структур и проч.

Частные замечания:

1. В левой части формул (9) и (13) следовало бы избегать дефиса, который воспринимается как знак «минус».

2. Не раскрыто понятие “BCE Loss”.

3. На стр. 47 утверждается, что среди прочего осуществлялась оптимизация архитектуры нейронной сети для задач сегментации гравитационного и магнитного полей с целью выделения изометричных аномалий. В действительности, задача оптимизации, которая заключается в нахождении экстремума целевой функции, в главе не решалась. То же касается заголовка раздела 3.3 на стр. 53.

4. При сравнении результатов применения различных моделей (разделы 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.6) в задаче распознавания масконов необходимо оценивать надежность распознавания в классических терминах – вероятностях ошибки первого и второго родов.

5. На стр. 76 в пояснении к формуле (18), по всей видимости, имелась ввиду «вершина призмы», а не «угол призмы».

6. На картах на рис. 44 и 52А отмечены красные точки, обведенные черными окружностями, однако в подписях к рисункам отсутствует описание их значения.

7. В разделе 4.4.1 автор приводит сравнение своих результатов с работой существующего программного обеспечения на примере распознавания линейных структур. Сама идея правильная, однако в качестве такого ПО выбран КОСКАД 3D, нацеленный на решение широкого круга задач при помощи статистического и спектрально-корреляционного анализа данных. Более правильным было бы сравнение предложенного подхода к выделению осей линейных аномалий с результатами применения современного ПО, предназначенного именно для выделения линеаментов. К такому ПО относятся LESSA, LINDA, ADALGEO и др.

8. В разделе 4.5 не хватает информации о геологической природе искомых изометричных аномалий и их связи с линейными аномалиями, хотя в названии раздела заявлен «Комплексный анализ изометричных и линейных аномалий на данных Баренцева моря».

9. При обсуждении результатов восстановления морфологии структурных горизонтов неплохо было бы оценить значения коэффициента детерминации ( $R^2$ ) и привести диаграмму информативности признаков.

10. В выводах по главе 5 утверждается, что была выполнена итеративная оптимизация модели (см. п. 4 на стр. 121). Опять же, задача оптимизации в главе 5 не решалась.

Замечания редакционного характера:

1. Отсутствует по тексту расшифровка некоторых аббревиатур. Например, это касается аббревиатуры ГИС. Существует по меньшей мере два варианта расшифровки, принятых в науках о Земле – «географическая информационная система» и «геофизические исследования скважин». В диссертации, по всей видимости, имеется ввиду второй вариант.

2. Аббревиатура сверточных нейронных сетей (СНС) по тексту вводится неоднократно.

3. Иногда не хватает запятых в предложениях, например, на стр. 34: «Сеть имеет слои, которые составляют «кодировщик», определяющий необходимые признаки в гравитационном поле и «декодер», который переводит признаки в трехмерную плотностную структуру».

4. Иногда встречаются лишние запятые, например, на стр. 75: «Обучающая выборка, может быть, как собрана на основе размеченных реальных примеров данных».

5. Стр. 95, п. 4 «скорость обучения (от 0.00001 до 1)» – не указана единица измерения.

В тексте встречаются опечатки. Вот некоторые примеры:

1. Подпись к рис. 8: «ручное пикирования».
2. Стр. 36: «Каждая ячейка в СНС имеет вход, внутреннее слои и выход».
3. Стр. 86: «... к положительным изометричными магнитным аномалиям».
4. Подпись к Рис. 50: «Изометричные аномалий магнитного поля, приуроченных к...», «... по результатам использованием ...».
5. Подпись к Рис. 51: «... изометричными аномалиями магнитного поля, приуроченных к приповерхностным магнитным источникам, полученные по результатам использованием ...», «фиолетовым цвет».
6. Стр. 91: «Глава 5. Восстановления структурных границ ...».
7. Стр. 97: «...с последовательным увеличение числа нейронов к 5 слою».

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:**

доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геофизического центра Российской академии наук

**СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович**

12.03.2026 г. 

Контактные данные:

тел.: +7 e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:  
25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Адрес места работы: 119296, г. Москва, ул. Молодежная, д.3, ГЦ РАН

тел.: +7 495 930-05-46, e-mail: gcras@gcras.ru

Подпись Анатолия Александровича Соловьева удостоверяю.

Главный специалист по кадрам ] 

В.П. Дасаева

12.03.2026 г.

