

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

Актуальность темы диссертации

На этапе общегеологических и минерагенических исследований при изучении глубинного строения больших территорий и прогнозировании полезных ископаемых широко используются гравиметрические и магнитные съемки, выполняющиеся преимущественно в аэроварианте. Исследования диссертанта включают в себя разработку новых подходов к качественной и количественной интерпретации результатов гравиразведки и магниторазведки, базирующихся на применении искусственных нейронных сетей. Это бурно развивающееся направление математического моделирования, реализующееся в виде программного обеспечения, построенного по принципу организации сетей нервных клеток живого организма.

Важным преимуществом нейронных сетей в прикладной геофизике является возможность обучения на синтетических моделях, отвечающих разнообразным физико-геологическим ситуациям с последующей апробацией на материалах полевых наблюдений. Адекватно обученная нейронная сеть обеспечивает более высокую скорость анализа разнородных геолого-геофизических данных по сравнению с традиционными методами интерпретации. Это играет особую роль при выполнении мониторинговых наблюдений и на этапе разведки и освоения недр. Таким образом, тема диссертационной работы Шклярука А.Д. является весьма актуальной, т.к. предусматривает решение важных научных и прикладных задач, связанных с сокращением сроков и затрат на геологоразведочные работы за счет повышения достоверности результатов геофизических исследований.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертационной работе Шклярука А.Д. представлено к защите три положения. Первое из них содержит методику создания репрезентативных синтетических выборок, которая позволяет эффективно обучать нейронные сети для анализа морфологии аномальных гравитационных и магнитных полей; второе – решение задачи выделения линейных и изометричных аномалий геопотенциальных полей в сложных геолого-геофизических условиях; третье посвящено восстановлению субгоризонтальных границ геологического разреза по комплексу геофизических данных. Анализ содержания опубликованных работ, текста диссертации и автореферата свидетельствует, что все защищаемые положения взаимосвязаны, раскрывают основные направления темы исследований. Каждое из них является научно обоснованным и аргументированным с теоретических и практических позиций. Все доказательства представленных положений подробно рассмотрены в тексте диссертации и иллюстрируются картами, рисунками, таблицами, а также формулами.

Первое защищаемое положение представляет собой методику формирования синтетических обучающих выборок для сверточных нейронных сетей с целью выделения изометричных и линейных аномалий геопотенциальных полей. Эта методика позволяет, с одной стороны – генерировать большие по объему обучающие выборки, с другой – обеспечивает достаточную степень их близости к исходным данным. Задаются случайные параметры источников поля (с ограничением по амплитуде выделяемого сигнала), также с использованием рандомизированных значений поля и сглаживания в скользящих окнах вычисляются низкочастотная (региональная) и высокочастотная (локальная) составляющие гравитационного поля. Модель поля для обучения нейронной сети создается путем суммирования этих 3-х синтезированных компонент поля. Положение источников фиксируется на бинарной маске – выходной карте, содержащей эффекты от 1-го до 10-ти аномалиеобразующих объектов. Для магнитного поля используется суммирование эффектов различных случайно расположенных призм и сглаженной в скользящем окне помехи (шума) с амплитудой, достигающей ~10–50% полезного сигнала.

Применение представленных способов при обучении нейронных сетей архитектуры U-Net с предобученными весами VGG-16 позволяет компенсировать отсутствие реальных размеченных данных. Они демонстрируют весьма высокую точность на синтетических данных, достигающую 0.96 по метрике IoU (мере пересечения между предсказанной и истинной моделями источников поля).

Второе защищаемое положение утверждает об эффективности применения сверточных нейронных сетей с целью выделения линейных и изометричных магнитных и гравитационных аномалий в сложных физико-геологических условиях. Диссертант приводит убедительные результаты по выделению и оконтуриванию масконов на Луне по аномалиям силы тяжести, а также по трассированию линеаментов в акватории Баренцева моря по аномальному магнитному полю. В первом случае удалось локализовать 100% высококонтрастных масконов, проявленных в гравитационном поле, 80% слабо проявленных, а также выявить в гравитационном поле Луны более 20 новых аномальных зон, предположительно связанных с масконами. Во втором случае нашли свое подтверждение подавляющее большинство линеаментов, известных по результатам визуальной интерпретации, выполненной предшественниками, а также были выявлены новые перспективные объекты, требующие дальнейшего изучения. Все это убедительно свидетельствует о широких возможностях применения сверточных нейронных сетей в процессе углубленного анализа морфологии геофизических полей и может быть использовано в дальнейшем для автоматизации качественной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки.

Третьим защищаемым положением является нейросетевой метод восстановления субгоризонтальных границ раздела физических свойств по комплексу геофизических данных. Последовательно выполняются: формирование обучающей выборки, выбор архитектуры нейронной сети, оптимизация параметров обучения нейронной сети, итеративная оптимизация и валидация модели. Предложено последовательное усложнение архитектуры нейронных се-

тей от одно- или двухслойных конфигураций до многослойных сетей (например, пятислойная архитектура 64-128-256-128-64). Также допускается возможность возврата к начальному этапу выбора архитектуры с последующей модификацией структуры нейронной сети и повторной настройкой гиперпараметров.

Серия выполненных Шкляруком А.Д. вычислительных экспериментов подтверждает высокую разрешающую способность многослойной нейронной сети при приближенном решении нелинейных обратных задач структурного типа. По сути, именно о такой задаче идет речь в главе 5 диссертационной работы, когда анализируются результаты определения глубин изучаемой границы (поверхности) в точках регулярной сети по дискретным значениям гравитационного и магнитного полей. С целью подавления влияния помех, неизбежно присутствующих в исходном поле, использовались сглаживание отметок глубин фильтром Баттерворта и расширение состава входных параметров, т.е. включение в состав исходных данных дополнительно 12-ти трансформант. Последний прием позволил повысить точность результатов примерно в 2.4 раза.

Оценивались также возможности нейронных сетей при интерполяции и экстраполяции отметок глубин контактной поверхности, т.е. анализировалось качество интерпретационных построений в пределах областей отсутствия точек измерений поля. Предложенный метод сохраняет устойчивость при резком сокращении объема исходных данных: удовлетворительное качество восстановления структуры обеспечивает использование ~5% информации о гравитационном поле. Нейронные сети также обладают высокой предсказательной способностью за границами области обучения, что является следствием их многослойной структуры и распределенного представления признаков.

***Оценка научной новизны, практической ценности
и достоверности полученных результатов***

Научная новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений и заключается в разработке и апробировании новых методов

интерпретации, использующих нейронные сети, применительно к данным гравиметрических и магнитных съемок для решения актуальных прикладных задач. Следует отметить весьма небольшое число работ в данной области исследований, как в России, так и во всем мире, что свидетельствует о высокой инновационной составляющей в диссертации Шклярука А.Д. Предлагаемые подходы направлены, преимущественно, на автоматизацию процесса качественной интерпретации цифровых моделей геопотенциальных полей, заданных в точках регулярной сети (гридированных данных). В большинстве случаев именно этот тип данных является конечным результатом обработки результатов площадных геофизических съемок и используется при построении типовых картографических материалов (карт изолиний и растров).

Обычно процесс качественной интерпретации выполняется визуально и его результаты во многом зависят от квалификации специалиста-интерпретатора. Как правило, при этом так или иначе используются 6-ть простых принципов сопоставления аномалий и их источников, сформулированных В.Н. Страховым, а также методика анализа морфологических особенностей карт изолиний гравитационного и магнитного полей, подробно описанная Ю.И. Блохом. В итоге определяется предполагаемая взаимосвязь аномалий разного ранга с изучаемыми геологическими объектами и/или геологическими процессами. Близкие по смыслу задачи эффективно решает диссертант с помощью настроенных и предварительно обученных нейронных сетей. Приведенные синтетические и практические примеры иллюстрируют широкие возможности выделения линейных и изометричных объектов в осложненных интенсивными помехами аномальных физических полях. Также с достаточно высокой точностью удастся осуществлять реконструкции структурных поверхностей по геофизическим данным.

В процессе исследований выполнены сравнения разработанных нейросетевых методов с существующими компьютерными технологиями, направленными на выделение объектов заданного типа (методы компьютерного зрения и трассирование осей аномалий в системе КОСКАД-3Д) и восстановление структурных поверхностей (машинное обучение: метод случайного

леса, градиентный бустинг, экстремальный градиентный бустинг, регрессия с регуляризацией по Тихонову, метод опорных векторов и метод ближайших соседей). Также получены интересные материалы при интерпретации аномального гравитационного поля Луны в редукции Буге и геофизических полей акватории Баренцева моря. Выполненные диссертантом разработки позволяют автоматизировать процесс выделения аномалий заданного типа при наличии низко- и высокочастотных помех различной природы, повысить точность интерпретационных построений и сократить временные затраты на анализ геофизических материалов.

Практическая ценность результатов Шклярука А.Д. определяется тем, что созданные в процессе исследований методы интеллектуального анализа данных реализованы в виде программ на языке Python с использованием современных библиотек для научных вычислений (NumPy/SciPy) и глубокого обучения (TensorFlow/Keras и Keras-unet-collection). Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ с номерами RU 2024685140, RU 2025615202, RU 2025616463. Эти программы могут использоваться в процессе геофизических исследований на всех этапах и стадиях геологоразведочных работ, т.к. реализованные в них алгоритмы инвариантны относительно масштаба исследований. Также они пригодны для решения других важных задач, выходящих за рамки прикладной геофизики.

Достоверность результатов исследований определяется применением апробированного комплекса анализа данных, включая машинное обучение и нейронные сети, тестированием созданного программно-алгоритмического обеспечения на модельных и практических примерах, а также согласованием построенных моделей с априорной физико-геологической информацией и ранее полученными другими исследователями результатами. Значительный объем выполненных вычислительных экспериментов подтверждает преимущества новых алгоритмов по сравнению с традиционными методами.

Основные замечания по диссертационной работе

1. В разделе 2.2.5 диссертации рассматривается «восстановление морфологии структурных границ по данным потенциальных полей и сейсморазведки с обучением на эталонном участке» (стр. 42). Отмечены в качестве «наиболее заметных работ в этом направлении в российской практике» результаты АО «ГНПП Аэрогеофизика», полученные под руководством А.В. Колмакова в 2020–2023 гг. Однако имеется более раннее решение подобной задачи, изложенное в статье «Никитин А.А., Черемисина Е.Н., Малинина С.С. Нейросетевое моделирование глубины залегания контактной поверхности по комплексу геофизических полей // Геоинформатика. 2018. № 1. С. 41–42».
2. При моделировании масконов при создании синтетической выборки случайным образом генерируются параметры точечного источника (положение в пространстве и масса), а затем поле, полученное путем решения прямой задачи гравиразведки, усекается по некоторому уровню. Полученные аномалии (рис. 25) не вполне согласуются с законами физики, но сопоставляются с реальными гравитационными эффектами масконов. Почему нельзя было предварительно оценить требуемый диапазон изменения параметров источников по предельно допустимым амплитудам гравитационных аномалий и использовать полную информацию о модельном поле? Возможно, что использование более адекватных моделей целевых объектов способно повысить качество обучения нейронной сети.
3. Отмечено, «что результат линейного метода регрессии с регуляризацией по Тихонову имеет наихудшую точность восстановления для всех горизонтов, что свидетельствует о его непригодности для решения подобных нелинейных задач» (стр. 111). Однако ничего не говорится о методе выбора параметра регуляризации, величина которого существенно влияет на решение задачи. Неправильно сформированный стабилизирующий функционал может резко снизить качество результативной модели изучаемого объема геологической среды.

4. На многих рисунках в тексте диссертации используются слишком мелкий шрифт, особенно это касается цветowych шкал и масштабных линеек.

Заключение

Перечисленные выше замечания не умаляют достоинств диссертации Шклярука А.Д. Она является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, научной новизной и практической значимостью. В диссертации представлено самостоятельное решение актуальной научной задачи разработки новых методов интеллектуального анализа данных гравиметрической и магнитной съемок.

Результаты исследований можно классифицировать как *научное достижение* в области разработки математических методов и программно-алгоритмического обеспечения, предназначенных для интерпретации геофизических данных. Все три защищаемых положения полностью раскрыты в тексте диссертации. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание работы. Автореферат и 6 публикаций (в т.ч. 3 – в журналах, входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ) отражают основное содержание диссертационной работы. Также имеются 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные научные положения докладывались на международных, российских и региональных научных конференциях и семинарах.

Текст диссертации написан грамотным профессиональным языком, содержит все необходимые формулы и цветные рисунки. Иллюстративный материал, таблицы и приведенный в конце работы список терминов хорошо дополняют содержание разделов.

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, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных и геопотенциальных полей Горного института Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

ДОЛГАЛЬ Александр Сергеевич

«13» марта 2026 г

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: _____

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

25.00.10. Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Адрес места работы: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,

лаборатория электромагнитных и геопотенциальных полей

тел.: _____, e-mail: _____

Подлинность подписи Долгалея А.С. заверяю:

Главный специалист

отдела кадров «ГИ УрО РАН»

С.Г. Дерюженко

«13» марта 2026 г