

На правах рукописи



ПЕТРОСЯН Рубен Нверович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ И ЛОКАЛЬНЫХ
ГЕОПЛОТНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МЕТОДАМИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2026

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Научный руководитель: Долгаль Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры геофизики Пермского государственного
национального исследовательского университета, г. Пермь

Официальные оппоненты: Шимелевич Михаил Ильич,
доктор физико-математических наук, заместитель
директора по науке Экспериментального творческого фонда
развития науки и культуры (ЭТФ), г. Москва

Муравьев Лев Анатольевич,
кандидат технических наук, заведующий лабораторией
региональной геофизики Института геофизики
им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение науки высшего образования Казанский
(Приволжский) федеральный университет, г. Казань

Защита диссертации состоится 19 марта 2026 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экземплярах направлять по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15, ПГНИУ, ученому секретарю диссертационного совета Огородовой Ирине Владимировне. Тел: +79024738714, e-mail: dissovet.geophys@psu.ru

Автореферат диссертации разослан «__» января 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.358.01,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент



Огородова Ирина Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Современные технологии строительства зданий и сооружений требуют комплексного подхода к проведению инженерных геолого-геофизических изысканий, где вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и гравиразведка являются одними из ключевых методов. Использование данных геофизических методов обусловлено необходимостью получения достоверных сведений о геологическом строении, гидрогеологических условиях и наличии потенциально опасных геодинамических процессов на участке исследований.

Количественная интерпретация материалов полевых геофизических наблюдений всегда связана с решением обратных задач геофизики, в которых по значениям наблюденного поля необходимо восстановить параметры модели изучаемого объема геологической среды или целевого объекта. Обратные задачи являются некорректными – для таких задач множество решений может быть либо пустым, либо бесконечным, а само решение является неустойчивым.

В связи с этим актуальным является совершенствование методов решения обратных задач гравиразведки и электроразведки и разработка новых компьютерных технологий, позволяющих повысить достоверность интерпретационных построений за счет формирования и статистического анализа множества эквивалентных решений. В диссертации представлены алгоритмы, программы и методики устойчивого решения обратных задач ВЭЗ и гравиразведки, базирующиеся на технологиях искусственного интеллекта и науки о данных.

Степень разработанности

Разработке методов решения прямых и обратных задач геофизики уделили внимание следующие ученые: М.А. Алексидзе; Е.Н. Акимова; В.Я. Арсенин; И.Ю. Блох; С.Г. Бычков; В.Н. Глазнев; В.И. Дмитриев; А.С. Долгаль; М.С. Жданов; Г.В. Иголкина; Д.Ф. Калинин; В.В. Кормильцев; В.В. Ломтадзе; П.С. Мартышко; В.О. Михайлов; Д.К. Нургалиев; А.В. Овчаренко; А.Н. Ратушняк; Г.Г. Ремпель; С.А. Серкерев; В.И. Старостенко; В.Н. Страхов; А.Н. Тихонов; В.И. Уткин; Н.В. Федорова; А.В. Цирульский; А.Ф. Шестаков; М.И. Эпов; А.Г. Ягола и др.

Вопрос применения электроразведки методом сопротивлений и электромагнитных зондирований поднимался исследователями: А.А. Бобачев; Д.К. Большаков; В.А. Давыдов; А.Г. Дьяконова; М.С. Жданов; А.И. Заборовский; Г.А. Исаев; А.А. Кауфман; О.Н. Ковин; В.П. Колесников; М.Н. Марченко; Б.К. Матвеев; И.Н. Модин; В.С. Моисеев; А.А. Огильви; М.Г. Персова; В.А. Сидоров; В.В. Спичак; Ю.И. Степанов; Г.М. Тригубович; А.А. Филимончиков; В.К. Хмелевской; В.А. Шевнин; А.Ф. Шестаков; Н.Г. Шкабарня; В.Н. Шуман и др.

Современное состояние технологий геологической интерпретации геопотенциальных полей во многом обуславливается работами Ю.И. Блоха, Е.Г. Булаха, А.А. Булычева, Г.С. Вахромеева, В.А. Гершанюка, В.Н. Глазнева, Г.Я. Голиздры, А.Ю. Давыденко, А.И. Кобрунова, В.И. Костицына, И.В. Ладовского, В.В. Ломтадзе, А.К. Маловичко, П.С. Мартышко, А.А. Никитина, В.М. Новоселицкого, В.И. Старостенко, В.Н. Страхова, А.Н. Тихонова, В.В. Федынского, А.В. Цирульского и др.

Исследования в области применения искусственных нейронных сетей для решения обратной задачи геофизики связаны с именами: И.А. Агбаш; О.М. Балабан; С.А. Имешев; Д.В. Костилов; И.Г. Московский; И.Е. Оборнев; Е.А. Оборнев; И.В. Попова; В. Пузырев; С.Н. Родина; Е.А. Родионов; К.Ю. Силкин; А.Ю. Соболев; В.В. Спичак; О.С. Федорова; С. Д. Шамаев; М.И. Шимелевич; Anran Xu; Bin Liu; O. Elghrabawy; L. Heagy; H. L. Hojjat; A. Maul; A. Muller; P. Parisa; Rui Huang; Rui Qi; M. Saraiva; Senlin Yang; Shuang Liu; Yuxiao Ren и др.

Тема использования стохастических методов оптимизации при инверсии геофизических данных освещена в работах следующих исследователей: Ф.М. Гольцман; А.С. Долгаль; С.И. Кабанихин; Т.Б. Калинина; А.А. Никитин; Т.А. Натальчин; В.В. Пересветов; А.В. Петрова; Н.В. Рыжов; А.А. Тайницкий; С. Д. Шамаев; N. S. Abol; Guillaume Ramillien; Göktürkler G.; M. Hossein; Huang J.; José P.; Jinlian Wang; Li L.; Loni S.; Mallick S.; Mehramuz M.; Sen M.K.; Song X.; Tang L.; Yongji Tan; Sari C; N. Zare-Dehnavi; Zhao S.; Zhang X. и др.

Вопросу анализа бесконечного множества эквивалентных решений при количественной интерпретации геофизических данных посвящены труды ученых: П.И. Балк; В.Б. Гласко; Г.В. Гущин; А.С. Долгаль; Т.Н. Кишман-Лаванова; В.П. Колесников; А.В. Мичурин; И.И. Рокитянский; А. П. Сивенкова; В.И. Старостенко; Р.В. Хачатуров; А.В. Цирульский; D. Blatter; S. Constable; K. Key; M. Morzfeld и др.

В процессе работы над диссертацией были проанализированы и учтены ключевые положения, разработанные упомянутыми исследователями.

Цель диссертационной работы

Создание новых компьютерных технологий для решения обратных задач ВЭЗ и гравиразведки, направленных на повышение устойчивости и снижение неоднозначности результатов количественной интерпретации геофизических данных за счет построения приближенного оператора обратной задачи, формирования и анализа конечного репрезентативного множества допустимых решений.

Основные задачи исследований

1. Разработка и реализация алгоритма устойчивого решения обратной задачи ВЭЗ на основе нейросетевой аппроксимации;
2. Разработка и реализация алгоритма решения обратной задачи ВЭЗ на основе эволюционных методов оптимизации многомерных данных;
3. Разработка и реализация алгоритмов решения нелинейной обратной задачи гравirazведки для одиночного изолированного объекта с известной плотностью, основанного на методах Монте-Карло и роя частиц;
4. Создание методики анализа множества эквивалентных решений обратной задачи ВЭЗ на основе аддитивных технологий, ранее применяющихся только при интерпретации данных гравirazведки и магниторазведки;
5. Программная реализация представленных алгоритмов с использованием современных технологий программирования: библиотеки «Keras», предназначенной для обучения нейронной сети; библиотеки «DEAP», позволяющей использовать методы эволюционной оптимизации;
6. Апробация нового программно-алгоритмического обеспечения на синтетических примерах и практических геолого-геофизических данных.

Научная новизна

1. Разработана методика повышения устойчивости решения 1D обратной задачи ВЭЗ, основанная на использовании регуляризирующего оператора, построенного на основе нейросетевой аппроксимации;
2. Создана методика повышения достоверности количественной интерпретации моногеничных гравитационных аномалий на основе пространственно-статистического анализа результатов многократного решения нелинейной обратной задачи.
3. Впервые использован пространственно-статистический анализ ограниченного множества допустимых решений обратной задачи при построении субгоризонтально-слоистых моделей геоэлектрической среды по данным ВЭЗ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработаны и программно реализованы алгоритмы количественной интерпретации ВЭЗ и гравirazведки на основе нейросетевой аппроксимации, эволюционных методов оптимизации и аддитивных технологий. Проведена теоретическая и экспериментальная оценка возможностей новых методов интерпретации, а также представлены практические рекомендации для их применения.

Созданные алгоритмы позволяют повысить информативность количественной интерпретации геофизических данных за счет повышения устойчивости решения ОЗ, учета априорной информации, подавления шумовой компоненты и обеспечивают оценку разрешающей способности метода в конкретных физико-геологических условиях.

Использование представленных компьютерных технологий позволяет улучшить качество результатов автоматизированной количественной интерпретации данных ВЭЗ и значительно ускорить процесс решения обратной задачи. Созданные технологии могут быть использованы при экспресс-интерпретации геофизических материалов с минимальным привлечением априорной информации.

Разработанные алгоритмы применялись для интерпретации полевых материалов ВЭЗ, полученных ООО «Противокаровая и береговая защита» при инженерно-геологических изысканиях.

Методология и методы исследований

Поставленные задачи решались путем сбора, обработки, анализа и интерпретации полевых материалов «классическими» методами типа неформализованного подбора; реализации алгоритмов автоматизированного решения обратной задачи и аддитивных технологий в виде компьютерных программ, тестировании созданного программно-алгоритмического обеспечения на синтетических примерах и практических данных и анализа результатов вычислительных экспериментов.

В исследованиях использованы основные положения теории решения обратных задач, теории вероятности и математической статистики, науки о данных, интеллектуального анализа данных, информатики и кибернетики, математики, физики, электроразведки, гравиразведки. В качестве конкретных методов использованы нейронные сети, алгоритмы стохастической оптимизации, технологии пространственно-статистического анализа данных.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод устойчивого решения 1D обратной задачи ВЭЗ, базирующийся на применении нейросетевой аппроксимации, является инструментом интеллектуального анализа данных электроразведки.

2. Методы количественной интерпретации данных ВЭЗ и гравиметрической съемки, базирующиеся на стохастической оптимизации, позволяют сформировать репрезентативное множество интерпретационных моделей, характеризующее основные особенности пространственного распределения физических свойств целевого объекта или изучаемого фрагмента геологической среды.

3. Метод пространственно-статистического анализа конечного множества допустимых решений обратной задачи снижает влияние практической эквивалентности и повышает достоверность результатов интерпретации за счет исключения случайных особенностей частных решений.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 19 печатных работах, 6 из которых в рецензируемых журналах: одна в журнале, входящем в перечень SCOPUS, шесть в журналах перечня ВАК. В Роспатент зарегистрированы 5 программ для ЭВМ.

Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались на:

- 1) Международной научно-практической конференции «Геология в развивающемся мире» в 2022, 2023, 2024, 2025;
- 2) Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» в 2022, 2023;
- 3) Уральской молодежной научной школе по геофизике в 2023, 2024;
- 4) Сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» в 2024, 2025;
- 5) Научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика» в 2024;
- 6) Всероссийской молодежной конференции, посвященной памяти член-корреспондента РАН В.Н. Пучкова «Геология, геоэкология и ресурсный потенциал Урала и сопредельных территорий» в 2024.

Личный вклад автора

Автор разработал методы решения обратной задачи ВЭЗ на основе нейросетевой аппроксимации, генетических алгоритмов и пространственно-статистического анализа множества решений, а также концепцию «нейросетевой» регуляризации. Лично реализовал данные методы в программно-алгоритмическом виде на языке программирования Python. Принимал участие в разработке программно-алгоритмического кода для решений обратной задачи гравirazведки стохастическими алгоритмами и методами пространственно-статистического анализа множества решений на языке программирования Delphi. Апробировал созданные методы на синтетических и материалах полевых наблюдений.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения общим объемом 124 страниц, содержит список литературы, включающий 155 наименований, а также 58 иллюстраций и 4 таблицы.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук, профессору Александру Сергеевичу Долгалю за всестороннюю поддержку на протяжении научной деятельности в аспирантуре, консультации по многочисленным вопросам, затрагивающим различные аспекты геофизики, математики и физики.

Глубокую признательность автор выражает коллективу ООО «Противокарстовая и береговая защита» за предоставленные исходные данные, ценные советы при подготовке диссертации.

Отдельно автор благодарит Никиту Валерьевича Рыжова за наставления в вопросах программирования и математики, Евгения Михайловича Бухтеева за предоставленный эффективный алгоритм решения прямой задачи ВЭЗ, Дмитрия Сергеевича Обернебесова, Никиту Алексеевича Зотина и Евгения Александровича Гинзбурга за помощь в проведении полевых и камеральных работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Точность интерпретации геофизических данных зависит от качества полевых измерений, уровня помех, адекватности математической модели физико-геологическим условиям и др. факторов. Однако главная проблема — некорректность обратных задач, которые по своей природе не имеют единственного или устойчивого решения.

Существуют широкий спектр методов решения обратных задач, однако, несмотря на это, остается актуальным разработка новых подходов к количественной интерпретации и оценке достоверности результатов инверсии для используемых исходных материалов.

Традиционный подход, основанный на выборе единственного «оптимального» по заданному критерию решения из множества допустимых, содержит внутреннее противоречие. Избежать данного противоречия можно путем построения и анализа репрезентативного множества решений. Такое множество решений возможно построить, используя алгоритмы стохастической оптимизации.

Также распространение получили нейросетевые технологии, которые способны решать широкий класс задач, в том числе нахождение приближенного непрерывного оператора обратной задачи.

Первое защищаемое положение. *Метод устойчивого решения 1D обратной задачи ВЭЗ, базирующийся на применении нейросетевой аппроксимации, является инструментом интеллектуального анализа данных электроразведки.*

Искусственные нейронные сети – класс математических моделей, архитектура которых воспроизводит принципы организации биологических нейронных систем. Нейронные сети позволяют аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между наборами данных. Данная возможность нейросетей позволяет использовать их для построения приближенного непрерывного оператора обратной задачи, что актуально для геофизических методов, в частности – для ВЭЗ.

Для решения обратной задачи ВЭЗ языке программирования «Python» с использованием библиотеки «Keras» реализован алгоритм, который предоставляет необходимые инструменты для обучения нейронной сети и его дальнейшего использования.

Алгоритм включает следующие этапы:

- формирование обучающей выборки;
- обучение искусственной нейронной сети;
- решение обратной задачи.

Формирование обучающей выборки является наиболее важной задачей, от решения которой зависит достоверность полученных результатов и обобщающая способность алгоритма – способности нейросети делать верные прогнозы не только для примеров, участвовавших в процессе обучения, но и для любых новых данных, которые не участвовали в нем.

Для формирования обучающей выборки синтезировались параметры геоэлектрического разреза (выходное множество), для которых вычислялись кажущиеся сопротивления (входное множество). К факторам, которые обуславливают процесс формирования обучающей выборки, относятся размер выборки k , величина отклонения α , начальное приближение h_1 и ρ_1 . При определении данных характеристик нужно учитывать сложность геологического разреза на исследуемой территории, так как неверно подобранные гиперпараметры могут привести к значительному понижению качества результатов решения обратной задачи.

Для оценки сложности разреза введено понятие «степени изменчивости разреза» \bar{C}_p , показывающее насколько сильно изменяются параметры геоэлектрического разреза по латерали. Степень изменчивости разреза можно выразить следующим образом:

$$\bar{C}_p = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n},$$

где C_i – коэффициент вариации i -ого параметра геоэлектрического разреза, представляющий собой отношение стандартного отклонения i -ого параметра к среднему значению i -ого параметра, n – количество параметров геоэлектрического разреза. Таким образом величина \bar{C} имеет смысл среднего значения коэффициентов вариации всех параметров разреза.

При увеличении степени изменчивости разреза в обучающую выборку нужно включать все более разнообразные модели с широкими диапазонами параметров. Отсюда можно вывести *правило зависимости выбора гиперпараметров обучающей выборки от сложности разреза*.

Оценка разнообразия обучающей выборки проводится на основе «степени изменчивости разреза» $\bar{C}_{ОВ}$, характеристики аналогичной параметра $\bar{C}_р$. Экспериментально установлено, что $\bar{C}_{ОВ}$ может варьироваться от 0,5 до $2,5\bar{C}_р$, однако лучший результат достигается когда $\bar{C}_{ОВ} \approx \bar{C}_р$.

Следующим этапом является непосредственно обучение нейронной сети. На данном этапе задается количество эпох (итераций), определяются архитектура сети, функции активации, оптимизатор и функция потерь. Число эпох обуславливается сложностью разреза и может варьироваться от 10 до первых тысяч. Количество слоев определяется размерностью входных и выходных параметров и сложностью геоэлектрического разреза.

После того как все параметры будут заданы, начнется непосредственно процесс обучения. Длительность обучения зависит от размера обучающей выборки k , числа нейронов и количества эпох и может варьироваться от 10 секунд до нескольких десятков минут. Результатом обучения нейронной сети является математическая модель, представляющая собой совокупность весов и смещений – предиктор, который может затем использоваться при количественной интерпретации данных ВЭЗ.

Алгоритм апробирован на материалах полевых электроразведочных наблюдений, проведенных вблизи пос. Октябрьский. Результаты количественной интерпретации, полученные неформализованным способом подбора и на основе нейросетевой аппроксимации представлены на рисунке 1.

Полученный в результате нейросетевой аппроксимации предиктор представляет собой универсальный инструмент решения обратной задачи электроразведки, который может быть применен на различных этапах количественной интерпретации данных ВЭЗ. С его помощью возможно получить восстановленную модель геоэлектрического разреза, достаточно хорошо описывающую реальную геологическую среду в общих чертах, также предиктор может быть использован в процессе решения обратной задачи методами оптимизации нулевого порядка и применяться для генерации множества эквивалентных решений.

Достоверность результата нейросети во многом обуславливается размером и содержанием обучающей выборки. В свою очередь, выбор гиперпараметров, отвечающих за формирование обучающей выборки, зависит от сложности геологического разреза. Ввиду вышесказанного, самой важной задачей количественной интерпретации, основанной на нейросетевой аппроксимации, является оценка сложности геоэлектрического разреза, выбор гиперпараметров обучающей выборки, а также оценка достоверности результатов выполненных интерпретационных построений.

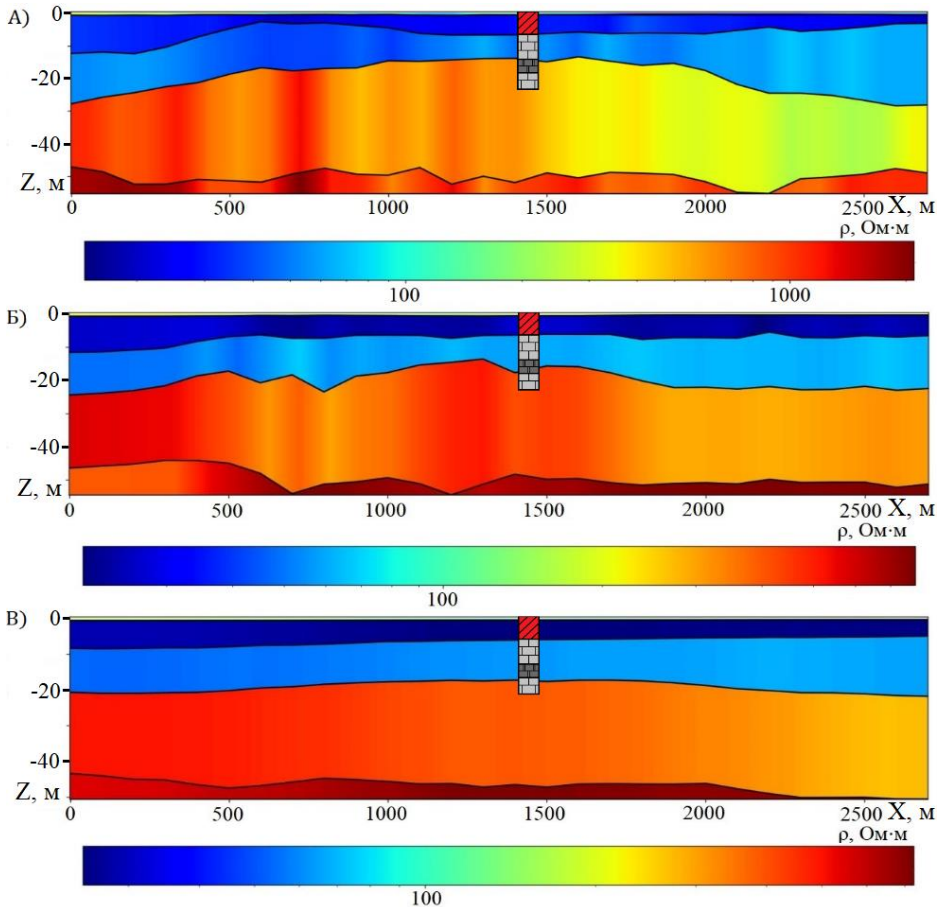


Рисунок 1 – Решение обратной задачи ВЭЗ А) методом неформализованного подбора ($\sigma < 5$), Б) нейросетевым алгоритмом ($\sigma = 17,4$), В) путем комплексирования нейросетевого и генетического алгоритмов ($\sigma = 10,4$).
Геологические описание: 1 слой – суглинки; 2 слой – известняки и доломиты сильновыветрелые; 3 слой – известняки плотные

Применение обучающей выборки конечного размера позволяет построить непрерывный оператор обратной задачи ВЭЗ. Используемая при обучении ограниченная, но репрезентативная выборка определяет всё пространство возможных решений нейронной сети, исключая из него геологически бессмысленные модели. Данный механизм обеспечивает устойчивость решения:

оператор, построенный на синтетических данных, не способен выдать решение, кардинально выходящее за рамки изученных закономерностей. Таким образом, оператор находит решение обратной задачи ВЭЗ в пределах пространства моделей, заданных в обучающей выборке (компактного множества).

Нейросетевые технологии решения обратной задачи ВЭЗ позволяют получить решения, адекватно отражающие реальную физико-геологическую ситуацию, что говорит о широких возможностях их практического применения. Нейросетевая аппроксимация повышает помехоустойчивость решений и эффективно работает даже при относительно малом объеме априорной информации. Также алгоритм позволяет минимизировать степень участия человека в процессе количественной интерпретации и отличается высокой производительностью – время решения обратной задачи 100 точек ВЭЗ для 5-слойной модели разреза не превышает 1 минуты, независимо от числа разностей линии АВ.

Таким образом, первое защищаемое положение по устойчивому решению 1D обратной задачи ВЭЗ, базирующееся на применении нейросетевой аппроксимации, обосновано и доказано. Полученный метод является инструментом построения непрерывного аппроксимационного оператора нелинейной обратной задачи ВЭЗ.

Второе защищаемое положение. *Методы количественной интерпретации данных ВЭЗ и гравиметрической съемки, базирующиеся на стохастической оптимизации, позволяют сформировать репрезентативное множество интерпретационных моделей, характеризующее основные особенности пространственного распределения физических свойств целевого объекта или изучаемого фрагмента геологической среды.*

Оптимизация представляет собой класс вычислительных задач, направленных на нахождение минимума целевой функции на некотором множестве параметров, которое, как правило, является многомерным, замкнутым и ограниченным. В качестве алгоритмов оптимизации будут рассмотрены методы Монте-Карло и роя частиц для решения обратной задачи гравиразведки, а также генетический алгоритм для решения обратной задачи ВЭЗ.

Суть метода Монте-Карло заключается в описании случайного процесса математической моделью, допускающей выполнение большого объема вычислений с различными входными данными, полученными путем генерации случайных чисел, с целью определения статистических характеристик рассматриваемого процесса. Алгоритм реализован в виде программы `PODBOR_ST`, написанной с использованием объектно-ориентированного языка программирования Delphi.

Решение обратной задачи проведено с использованием заведомо неточного начального приближения в классе четырехугольных призм произвольного сечения. После выполнения 25 итераций при числе случайных векторов $M = 25000$ построена достаточно точная модель источника поля (рис. 2).

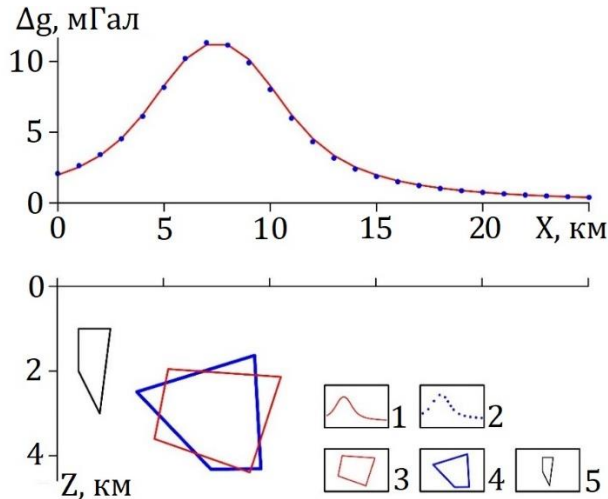


Рисунок 2 – Решение обратной задачи в классе четырехугольных призм произвольного сечения методом Монте-Карло: 1 – наблюдаемое поле; 2 – модельное поле; 3 – возмущающий объект; 4 – подобранная модель источника; 5 – начальное приближение

Метод роя частиц позволяет моделировать поведение децентрализованной самоорганизующейся системы (в частности – стаи птиц). Текущее состояние частицы характеризуется координатами в пространстве решений, а также вектором скорости перемещения. Оба этих параметра выбираются случайным образом на этапе инициализации. Кроме того, каждая частица хранит координаты лучшего из найденных ей решений, а также лучшее из пройденных всеми частицами решений – этим имитируется мгновенный обмен информацией между птицами. В итоге локальные и, в некоторой степени, случайные взаимодействия приводят к возникновению интеллектуального группового поведения, неконтролируемого отдельными особями.

Метод роя частиц применен на синтетической модели. Динамику поиска наилучшего положения частицами роя при числе итераций $M = 40$ отражает рисунок 3. После выполнения $M = 40$ итераций была достигнута средняя величина невязки наблюдаемого и модельного полей $F2 = 0,79$ мГал для всего роя частиц. Для наилучшего решения $G(40)$ величина невязки составила 0,34 мГал, т.е. около 1,5% от максимальной амплитуды аномалии.

Устойчивость процесса оптимизации в методе роя частиц обеспечивает ввод ограничений на максимальные значения скорости частиц $\mathbf{v}_i < \mathbf{v}_{max}$. Выбор величины \mathbf{v}_{max} столь же важен, как выбор параметра регуляризации в классических методах решения обратной задачи гравиразведки, где решаются плохо обусловленные системы алгебраических уравнений.

Оба метода восстановления конфигурации аномалиеобразующего объекта позволяют сгенерировать достаточно большое множество модельных тел за относительно короткий временной промежуток. Однако важно отметить, что для получения близких результатов с помощью метода Монте-Карло требуется примерно в 100 раз больше пробных решений прямой задачи гравиметрии, чем для метода роя частиц.

Генетический алгоритм является одним из методов поиска решений многокритериальных задач оптимизации. Алгоритм находит лучшие решения из всего массива решений и незначительно изменяет их. Среди полученных новых решений отбираются лучшие, а худшие отбрасываются, затем процесс повторяется.

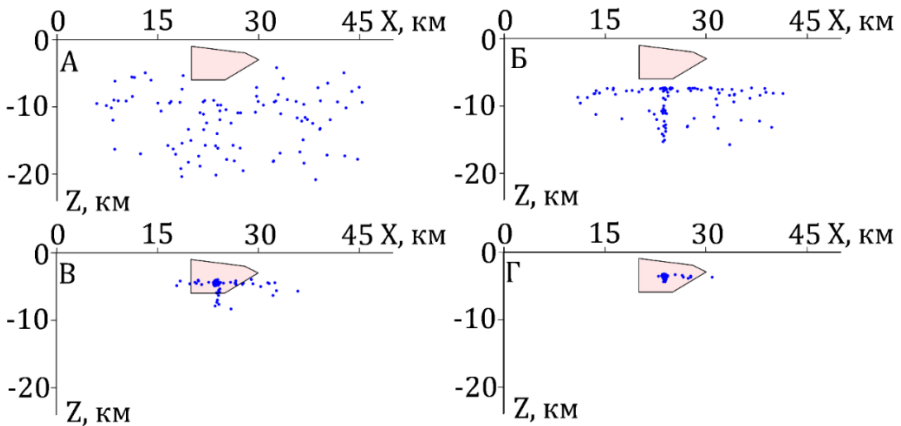


Рисунок 3 – Пространственное расположение центров призм С после выполнения 5 (А), 15 (Б), 30 (В) и 40 (Г) итераций метода роя частиц

Комплексирование нейронных сетей и генетического алгоритма позволило восстановить геоэлектрический разрез (рис. 1). Применение нейросетевого этапа повышает помехоустойчивость решений, а дальнейшее уточнение полученной модели генетическим алгоритмом позволяет скорректировать параметры геоэлектрического разреза в соответствии со значениями кажущегося сопротивления. Данный алгоритм применим даже при относительно малом объеме априорной информации, однако в таком случае необходимо акцентировать внимание на выборе гиперпараметров.

Другой способ комплексирования нейронных сетей и генетического алгоритма заключается в использовании нейросетевого предиктора при количественной интерпретации с использованием регуляризирующего функционала. При этом регуляризирующий функционал основывается на

нейросетевом решении, а оптимизация осуществляется генетическим алгоритмом.

Для апробации метода «нейросетевой» регуляризации сгенерирован синтетический геоэлектрический разрез (рис. 4). Для модели с помощью нейросети решена обратная задача – невязка составила 14,9 %. Затем генетическим алгоритмом повторно решается обратная задача с использованием «нейросетевой» регуляризации (рис. 5).

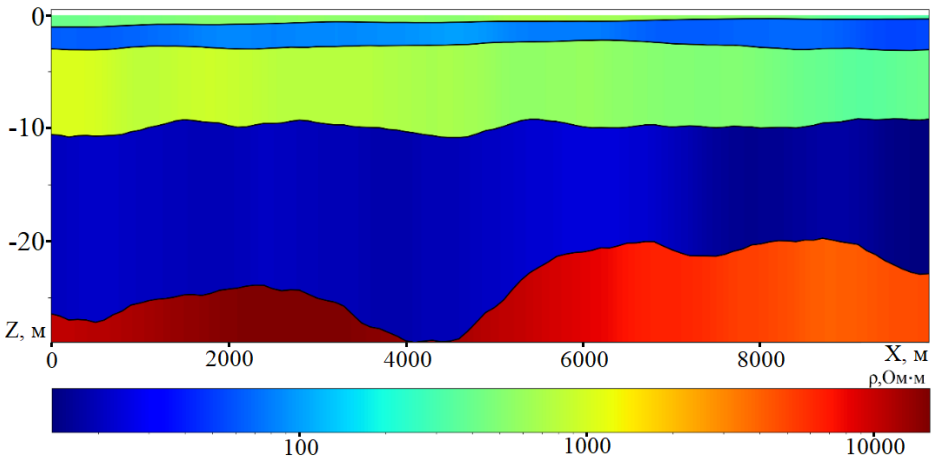


Рисунок 4 – Синтетическая модель геоэлектрического разреза

Сравнивая результирующие разрезы с исходной синтетической моделью, можно обнаружить сходство, особенно в геометрии границ слоев. В данном случае наблюдается существенное различие в удельных электрических сопротивлениях: максимальное значение сопротивления на модели более чем на порядок превышает аналогичное значение на итоговых геоэлектрических разрезах. Однако при этом сохраняется закономерность изменения сопротивлений как по глубине, так и вдоль профиля.

Генетический алгоритм успешно применяется при интерпретации кривых ВЭЗ, но полученный разрез может характеризоваться высоким перепадом мощностей и сопротивлений слоев. Алгоритм может выступить в роли вспомогательного метода в дополнение к основному способу инверсии, в частности, он эффективно функционирует при автоматической корректировке результатов, полученных с помощью других методов решения обратной задачи ВЭЗ. Комплексное применение генетического алгоритма и нейросетевой

аппроксимации позволяет проводить совместную контролируемую инверсию данных ВЭЗ с использованием «нейросетевой» регуляризации.

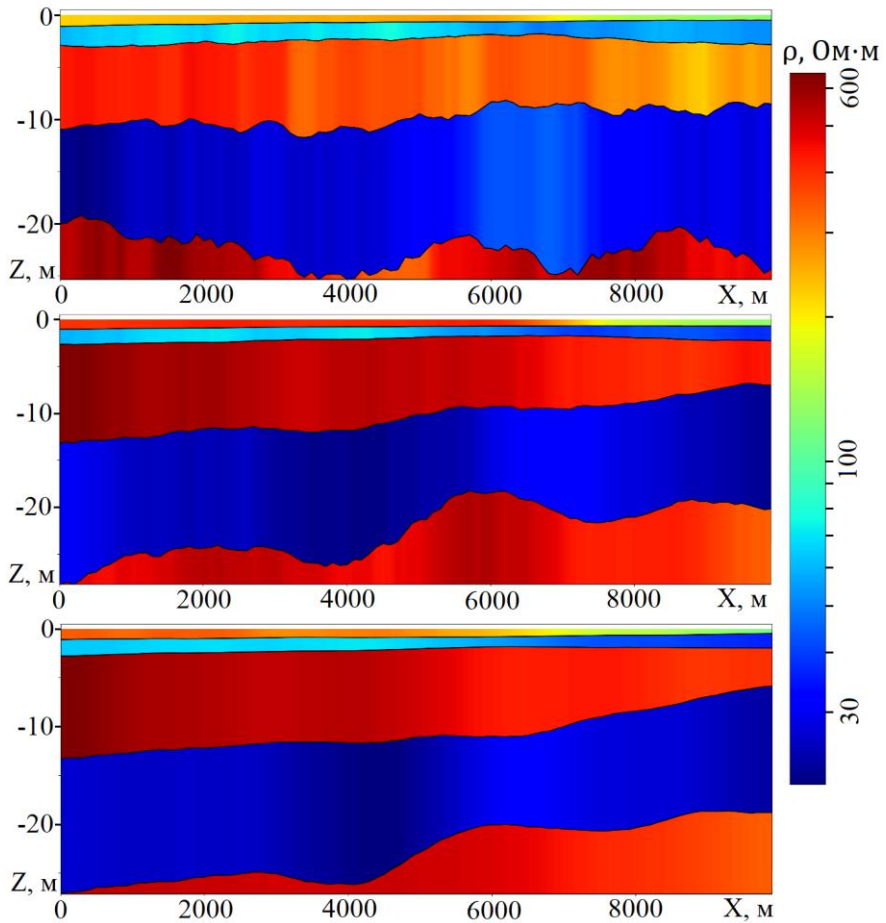


Рисунок 5 – Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам применения генетического алгоритма с заданными параметрами регуляризации λ : 0,01; 0,1; 1 (сверху вниз)

Как и методы роя частиц и Монте-Карло, генетический алгоритм является действенным инструментом для генерации репрезентативного множества Q эквивалентных решений. Репрезентативным множеством можно считать такое множество, для которого, во-первых, рост числа элементов множества слабо изменяет параметры данного множества, в рамках решения обратной задачи данное число близко к 30-50, во-вторых, для каждого элемента множества соблюдается условия невязки, в-третьих, данное множество можно использовать при пространственно-статистическом анализе.

Таким образом, второе защищаемое положение по интерпретации данных ВЭЗ и гравиметрической съемки, базирующиеся на стохастической оптимизации, обосновано и доказано. Представленные методы позволяют сформировать репрезентативное множество Q интерпретационных моделей.

Третье защищаемое положение. *Метод пространственно-статистического анализа конечного множества допустимых решений обратной задачи снижает влияние практической эквивалентности и повышает достоверность результатов интерпретации за счет исключения случайных особенностей частных решений.*

Традиционный подход к решению обратной задачи сопряжен с противоречием, возникающим при попытке представить множество ее допустимых решений Q одним из его элементов, отвечающим выбранному критерию оптимальности. Избежать этого противоречия позволяет построение конечного репрезентативного множества решений обратной задачи $Q_0 \subset Q$ и его интерпретация с помощью пространственно-статистического анализа.

Пространственно-статистический анализ конечного множества решений для субгоризонтально-слоистой модели включает несколько этапов. Первоначально многократно решается обратная задача ВЭЗ с помощью генетического алгоритма, затем каждому слою геоэлектрического разреза определяется область D , верхние и нижние границы которой соответствуют минимальной и максимальной глубине залегания кровли слоя. Таким образом, для каждой точки ВЭЗ определяется диапазон глубин, в пределах которого могут варьировать значения глубин для конкретного слоя.

Далее пространство D разбивается на m подобластей одинакового размера, для каждой подобласти d_i вычисляется параметр p_i путем MinMax нормализации:

$$p_i = \frac{n_i - n_{\min}}{n_{\max} - n_{\min}},$$

где n_i – количество решений, входящих в текущую подобласть d_i , n_{\min} и n_{\max} – минимальное и максимальное количество решений среди всех подобластей d . MinMax нормализацию также можно провести с учетом значений всех пикетов, в таком случае n_{\min} и n_{\max} – минимальное и максимальное значение m среди всех пикетов.

Представление результатов в виде конечных подобластей d , ранжированных в зависимости от числа решений n обратной задачи, входящих в данную подобласть d , позволяет провести анализ результатов количественной интерпретации ВЭЗ по двум критериям: по невязке кривых σ и параметру p . Также существенным преимуществом такой визуализации является возможность количественно оценить разрешающую способность метода в конкретных физико-геологических условиях.

Пространственно-статистический анализ множества решений обратной задачи ВЭЗ апробировался на практических материалах, полученных вблизи пос. Октябрьский (рисунок 6). Наблюдается высокая степень совпадения границ, построенных с помощью неформализованного подбора и с помощью функции $z = \varphi(p, x)$. Наибольшее расхождение по глубинам имеет нижний геоэлектрический горизонт, что связано с понижением разрешающей способности метода с глубиной. Отметим, что чем больше мощность пространства D , тем меньше разрешающая способность метода в конкретных физико-геологических условиях. Стоит добавить, что изменение разрешающей способности ВЭЗ происходит не только по глубине, но и по латерали (вдоль оси абсцисс).

Результаты решения обратной задачи ВЭЗ генетическим алгоритмом, представленные в виде множества допустимых решений обратной задачи Q_0 с дальнейшим его анализом статистическими методами и визуализацией результатов повышают достоверность интерпретации данных электроразведки. Предлагаемый подход обеспечивает возможность количественной оценки разрешающей способности метода и позволяет отказаться от величины невязки как единственного критерия качества решения обратной задачи. Однако данный подход требует сравнительно больших временных затрат на формирование множества Q_0 . Возникают некоторые сложности выполнения интерпретационных построений при совместном учете изменений удельных электрических сопротивлений и мощностей слоев, а также при визуализации областей D в случае их частичного пересечения.

Таким образом, третье защищаемое положение по пространственно-статистическому анализу конечного множества допустимых решений, обосновано и доказано. Рассмотренный метод снижает влияние практической эквивалентности и повышает достоверность результатов интерпретации ВЭЗ и др. методов.

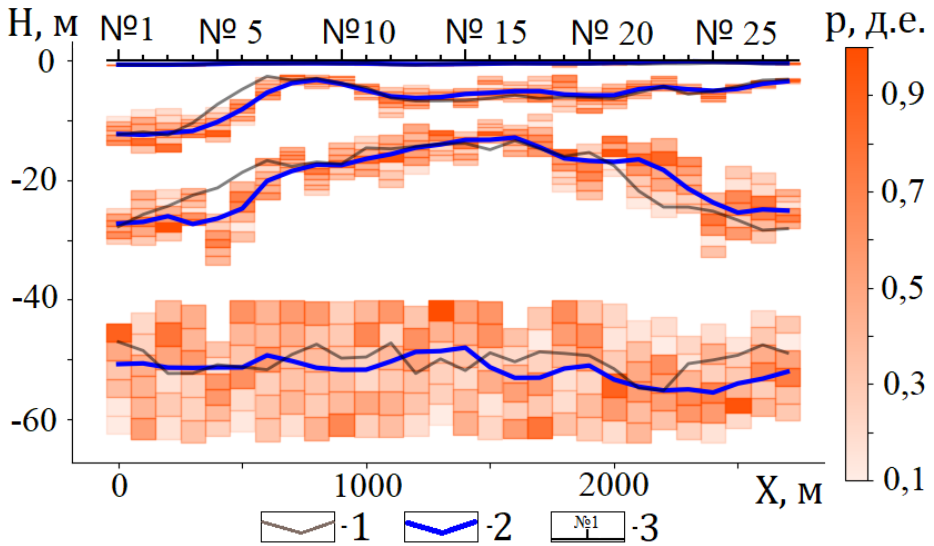


Рисунок 6 – Результат интерпретации данных ВЭЗ по профилю у пос. Октябрьский: 1 – геоэлектрические границы, полученные с помощью решения обратной задачи ВЭЗ в программном комплексе «ЗОНД»; 2 – геоэлектрические границы, полученные с помощью функции z ; 3 – местоположение точки ВЭЗ, его номер

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Предложенный метод устойчивого решения 1D обратной задачи ВЭЗ, основанный на нейросетевой аппроксимации непрерывного оператора нелинейной обратной задачи, является инструментом интеллектуального анализа данных электроразведки и позволяет найти решение обратной задачи в пределах пространства моделей, заданных при обучении нейронной сети.

2. Разработанные методы количественной интерпретации данных ВЭЗ и гравиметрической съемки, базирующиеся на стохастической оптимизации, позволяют сформировать репрезентативное множество интерпретационных моделей, характеризующее основные особенности пространственного распределения физических свойств целевого объекта или изучаемого фрагмента геологической среды, и успешно применяются в комплексе с другими методами решения обратных задач.

3. Реализованный метод пространственно-статистического анализа множества допустимых решений обратной задачи снижает влияние практической эквивалентности, повышает достоверность результатов интерпретации за счет исключения случайных особенностей частных решений, обеспечивает возможность количественной оценки разрешающей способности метода и позволяет отказаться от величины невязки как единственного критерия качества решения обратной задачи.

Таким образом, созданные новые технологии решения обратных задач ВЭЗ и гравиразведки повышают устойчивость и снижают неоднозначность результатов количественной интерпретации геофизических данных за счет построения приближенного оператора нелинейной обратной задачи, формирования и анализа конечного репрезентативного множества допустимых решений.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах ВАК и Scopus

1. Долгаль А.С. Моделирование геоэлектрического разреза на основе множества допустимых решений обратной задачи вертикального электрического зондирования / Долгаль А.С., **Петросян Р.Н.** // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2025. – № 3. – С. 31–40 (вклад автора 50 %).

2. Долгаль А.С. Решение обратной задачи гравиразведки для 2D призматических тел методом статистических испытаний / Долгаль А.С., **Петросян Р.Н.** // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021, – Т. 20, – № 4. – С. 334–343 (вклад автора 40 %).

3. Долгаль А.С. Оценка параметров источника гравитационной аномалии методом роя частиц / Долгаль А.С., **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23. – № 1. С. 85–92 (вклад автора 30 %).

4. **Петросян Р.Н.** Возможности искусственных нейронных сетей при решении обратных задач электроразведки методом вертикального электрического зондирования / **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2024. – Т. 62. – № 2. – С. 109–119 (вклад автора 80 %).

5. **Петросян Р.Н.** Генетический алгоритм решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования / **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // Геофизика. – 2024. – № 5. – С. 48–54 (вклад автора 80 %).

6. Рыжов Н.В. Гибридный подход к решению обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования / Рыжов Н.В., **Петросян Р.Н.** // Геофизика. – 2025. – № 5. – С. 21–27 (вклад автора 20 %).

Публикации в научных изданиях перечня РИНЦ

7. Долгаль А.С. Интерпретация моногеничных гравитационных аномалий методами Монте-Карло и роя частиц / Долгаль А.С., **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // Инженерная и рудная геофизика. Материалы 20-й научно-практической конференции и выставки. – М., 2024. – С. 363–367 (вклад автора 30 %).

8. Долгаль А.С. Решение 2D обратной задачи гравиразведки методом роя частиц / Долгаль А.С., **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей». – М., – 2024. – С. 149–152 (вклад автора 30 %).

9. **Петросян Р.Н.** Гарантированный подход к решению обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования / **Петросян Р.Н.** // Вопросы теории и практики геологической интерпретации

гравитационных, магнитных и электрических полей. Сборник научных трудов. – Пермь, – 2025. – С. 241–244.

10. **Петросян Р.Н.** Применение метода ВЭЗ при исследовании карстовых зон / **Петросян Р.Н.** // Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, – 2022. – С. 146–149.

11. **Петросян Р.Н.** Комплексный подход к решению обратной задачи вертикального электрического зондирования на основе нейросетевой аппроксимации и эволюционных алгоритмов оптимизации / **Петросян Р.Н.**, Бухтеев Е.М. // Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, – 2025. – С. 150–154 (вклад автора 50 %).

12. **Петросян Р.Н.** Применение метода ВЭЗ при решении карстологических задач (на примере поселка Вышков) / **Петросян Р.Н.**, Гильманов М.И. // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Сборник научных трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, – 2022. – С. 150–154 (вклад автора 50 %).

13. **Петросян Р.Н.** Оценка разрешающей способности метода ВЭЗ при картировании кровли коренных пород с использованием имитационного моделирования / **Петросян Р.Н.**, Гинзбург Е.А. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – Пермь, – 2023. – С. 155–160 (вклад автора 50 %).

14. **Петросян Р.Н.** Определение удельного электрического сопротивления при решении карстологических задач в условиях урбанизированных территорий пермского края / **Петросян Р.Н.**, Гинзбург Е.А., Зотин Н.А. // Двадцать четвертая уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов научной школы. – Пермь, – 2023. – С. 181–185 (вклад автора 30 %).

15. **Петросян Р.Н.** Влияние кривизны питающей линии установки Шлюмберже на результаты электроразведочных исследований / **Петросян Р.Н.**, Зотин Н.А., Гинзбург Е.А. // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Сборник научных трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, – 2022. – С. 145–149 (вклад автора 30 %).

16. **Петросян Р.Н.** Качественная интерпретация ВЭЗ с целью обнаружения карстовых полостей и зон дробления (на примере деревни Балаши) / **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, – 2023. – С. 293–297 (вклад автора 50 %).

17. **Петросян Р.Н.** Решение обратной задачи вертикального электрического зондирования с применением полносвязных нейронных сетей в

условиях горизонтально-слоистой среды / **Петросян Р.Н.**, Рыжов Н.В. // XXV Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. – Екатеринбург, – 2024. – С. 111–115 (вклад автора 50 %).

18. Рыжов Н.В. Возможности 2D интерпретации данных, полученных методом вертикального электрического зондирования / Рыжов Н.В., **Петросян Р.Н.** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Сборник научных трудов. – Пермь, – 2023. – С. 183–188 (вклад автора 50 %).

19. Рыжов Н.В. Применение различных показателей качества при решении обратной задачи гравиразведки методом роя частиц / Рыжов Н.В., **Петросян Р.Н.** // Геология в развивающемся мире. Сборник научных трудов по материалам XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, – 2024. – С. 217–222 (вклад автора 50 %).

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024664945. GA VES. Программа для решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования с использованием генетических алгоритмов / **Петросян Р.Н.** Дата регистрации – 13.06.2024.

2. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024611388. ANN VES. Программа для решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования с использованием нейронных сетей / **Петросян Р.Н.** Дата регистрации – 15.01.2024.

3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025691780. PDBR ROI. Программа предназначена для решения нелинейной обратной задачи гравиразведки методом роя частиц для двухмерной горизонтальной призмы / **Петросян Р.Н.**, Долгаль А.С. Дата регистрации – 18.11.2025 (вклад автора 50 %).

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025692062. PODBOR ST. Программа предназначена для решения нелинейной обратной задачи гравиразведки для моногеничной аномалии, обусловленной 2D призмой, основанный на методе статистических испытаний (Монте-Карло) / **Петросян Р.Н.**, Долгаль А.С. Дата регистрации – 19.11.2025 (вклад автора 50 %).

5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025692497. SSA VES. Программа предназначена для решения обратной задачи электроразведки методом вертикального электрического зондирования с использованием пространственно-статистического анализа конечного множества моделей / **Петросян Р.Н.** Дата регистрации – 21.11.2025.