

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Шагарова Наталья Максимовна

**Трехмерная геоэлектрическая модель Ильменской аномалии коровой
электропроводности по результатам магнитотеллурических зондирований**

Специальность 1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Научный
руководитель** – *Куликов Виктор Александрович, доктор геолого-минералогических наук, доцент*

**Официальные
оппоненты** – *Лубнина Наталия Валерьевна, доктор геолого-минералогических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор*
Поспеев Александр Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, молодёжная лаборатория геологии Арктики, ведущий научный сотрудник
Алексеев Дмитрий Александрович, кандидат физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, II Отделение: Разведочной геофизики и прикладной геодинамики, лаборатория фундаментальных проблем нефтегазовой геофизики и геофизического мониторинга №202, старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «28» октября 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

Е-mail: kuznetsovkm@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/4051>

Автореферат разослан «___» сентября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МГУ 016.6,
кандидат технических наук

К. М. Кузнецов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Коровые аномалии электропроводности представляют значительный научный и практический интерес: мировой опыт показывает устойчивую пространственную связь крупнейших месторождений полезных ископаемых с зонами повышенной электропроводности в земной коре (Поспеева, 2021). Такая связь установлена для золоторудных месторождений орогенных поясов и порфировых медных месторождений (Kirkby et al., 2022), австралийских IOCG-месторождений, включая Olympic Dam (Murphy et al., 2022; Thiel et al., 2026), а на Восточно-Европейской платформе (ВЕП) – для железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (Куликов и др., 2018), рудных провинций Криворожско-Кременчугской зоны (Жамалетдинов, Кулик, 2012) и Ладожско-Ботнической зоны (Соколова и др., 2016). В контексте Стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 года (Стратегия..., 2024) изучение коровых аномалий электропроводности приобретает особую актуальность как элемент регионального прогнозирования месторождений.

На ВЕП коровые аномалии детально изучены преимущественно в пределах положительных форм рельефа фундамента — Балтийского щита (Ковтун, 1989; Жамалетдинов, 2006), Воронежской антеклизы (Куликов, 2018), Украинского щита (Рокитянский, 1975), Ладожской моноклинали (Ионичева, 2022), — где осадочный чехол маломощен или отсутствует. В центральной части платформы мощный осадочный чехол экранирует электромагнитные поля и существенно затрудняет выделение глубинных коровых структур.

Ильменская аномалия, расположенная в центральной части ВЕП, оставалась слабоизученной и вопросы о ее пространственной структуре, латеральной протяженности, глубинном строении, геологической природе аномалии и её связи с Ладожской аномалией оставались открытыми. Серьезным препятствием для её изучения служило экранирующее влияние мощного проводящего осадочного чехла Валдайского авлакогена и Главного девонского поля. Это и определило необходимость проведения настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования

Изучение коровых аномалий электропроводности на ВЕП имеет многолетнюю историю и связано прежде всего с работами И.И. Рокитянского и его коллег, которые в 1970-х – начале 1980-х годов методом магнитовариационного профилирования выявили на территории платформы ряд крупных коровых проводников, включая Кировоградскую, Ладожскую и Ильменскую аномалии (Рокитянский и др., 1981; Рокитянский и др., 1982). В последующие десятилетия эти аномалии стали ключевыми объектами

магнитотеллурических исследований, направленных на изучение глубинного строения и тектонической эволюции платформы.

Существенный вклад в изучение коровой электропроводности ВЕП внесли работы по программе «Московская синеклиза», а также опорный геофизический профиль 1-ЕВ. По результатам этих работ совместно с обобщением многолетних данных была уточнена карта проводимости коры ВЕП (Фельдман, Эринчек, 2009).

С 2007 года систематические исследования коровых аномалий электропроводности на ВЕП ведется многими организациями, в том числе геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова, ЦГЭМИ ИФЗ РАН, ООО «Северо-Запад», ГИН РАН. В рамках проекта KIROVOGRAD (2007-2015 гг.) на западном склоне Воронежской антеклизы были детально изучены Кировоградская, Бяратинская и Курская аномалии (Варенцов и др., 2012; Куликов и др., 2018). Эксперимент SMOLENSK (2018–2020 гг.) охватил область Слободского тектоно-геодинамического узла на сочленении Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии (Иванов и др., 2019; Варенцов и др., 2021).

Особое место занимает Ладожская аномалия электропроводности, расположенная в юго-восточной части Балтийского щита на границе архейского Карельского и палеопротерозойского Свекофеннского геоблоков. Ее изучение, насчитывающее более 50 лет, связано с работами СПбГУ, ВСЕГЕИ имени А.П. Карпинского, Института геологии КарНЦ РАН и других организаций (Васин, 1988; Ковтун, 1989; Ковтун и др., 1998; Жамалетдинов, 2006). Изучение глубинного строения литосферы Фенноскандинавского щита, включая Ладожскую зону, было продолжено в рамках международного эксперимента BEAR (Ковтун, Варданянц, 2005; Ковтун, Варданянц, 2012).

С 2013 года к исследованиям Ладожской аномалии подключились сотрудники МГУ имени М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН и ГИН РАН, в основном исследования были направлены на изучение южной ветви аномалии (Голубцова и др., 2015; Соколова и др., 2016; Stepanov et al., 2016; Таран и др., 2017). Юго-восточная часть Ладожской аномалии, скрытая под платформенным чехлом, также исследовалась с привлечением аудиомангнитотеллурических зондирований и гравиметрических данных (Stepanov et al., 2016). Обобщение результатов многолетних магнитотеллурических и магнитовариационных исследований в Южном Приладожье выполнено в диссертации А.П. Ионичевой (Ионичева, 2022).

На фоне этой длительной истории исследований Ильменская аномалия коровой электропроводности оставалась наименее изученной. Сведения о ней до

недавнего времени ограничивались первичной локализацией по магнитовариационным данным (Рокитянский и др., 1982).

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются коровые проводящие зоны северо-западной и центральной частей Восточно-Европейской платформы.

Предметом исследования является Ильменская аномалия коровой электропроводности, сопутствующие ей проводящие зоны в земной коре и её возможная связь с Ладожской аномалией электропроводности.

Цель и задачи исследования

Цель работы – построение трехмерной геоэлектрической модели Ильменской коровой аномалии, определение количественных параметров аномалии электропроводности в пределах области между 56-59° северной широты и 28-34° восточной долготы. Для достижения этого были поставлены следующие задачи:

1. Сбор и анализ результатов предыдущих магнитотеллурических исследований, сопутствующей геофизической информации и априорной геологической информации по осадочному чехлу и кристаллическому фундаменту центральной и северо-западной частей Восточно-Европейской платформы;
2. Проведение полевых работ методом магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований для уточнения строения Ильменской аномалии на территории Ленинградской, Новгородской, Псковской и Тверской областей;
3. Освоение, тестирование и внедрение в практику полевых работ нового аппаратного комплекса NORD для магнитотеллурических исследований, разработанного в компании «Северо-Запад», г. Москва;
4. Разработка оптимальной методики полевых наблюдений АМТЗ/МТЗ/ГМТЗ на основе изучения временных характеристик спектральной активности естественного электромагнитного поля Земли;
5. Проведение электроразведочных работ в Северном Приладожье с целью уточнения геоэлектрических свойств раннепротерозойских метаморфических комплексов;
6. Построение карты горизонтального магнитного тензора с привлечением данных базовой станции на геофизическом полигоне МГУ в д. Александровка (Юхновский район, Калужская область);
7. Построение трехмерной геоэлектрической модели осадочного чехла в пределах площади исследований с количественным определением

- удельных электрических сопротивлений (УЭС) крупных водоносных горизонтов;
8. Проведение двумерной инверсии полученных автором МТ-данных по отдельным профилям и трехмерной инверсии по всему массиву данных;
 9. Визуальная оценка приуроченности аномалий гравитационного и магнитного полей к положению коровых проводников;
 10. Корректировка известных структурных и геологических границ с привлечением новой трехмерной геоэлектрической модели.

Научная новизна

Впервые построена трёхмерная геоэлектрическая модель Ильменской аномалии коровой электропроводности в условиях мощного проводящего осадочного чехла, суммарная продольная проводимость которого на территории исследований изменяется от 100 до 3000 См при мощности осадков до 4 км в осевой части Валдайского авлакогена.

На территории Главного девонского поля Восточно-Европейской платформы построена детальная геоэлектрическая модель осадочного чехла с определением УЭС четырёх региональных водоносных горизонтов.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость заключается в установлении пространственной связи Ильменской и Ладожской аномалий электропроводности, что вносит вклад в понимание глубинного строения и тектонической эволюции северо-запада Восточно-Европейской платформы.

В качестве практической значимости работы можно отметить, что картирование зон повышенной электропроводности и их выходов к поверхности относится к региональному этапу прогнозирования полезных ископаемых, поскольку такие зоны контролируют размещение крупных металлогенических поясов.

Построенная геоэлектрическая модель осадочного чехла Главного девонского поля с определением УЭС четырёх региональных водоносных горизонтов представляет самостоятельную практическую ценность для гидрогеологических исследований региона. Также полученные результаты вносят вклад в развитие методики интерпретации данных МТЗ в условиях мощного проводящего осадочного чехла.

Методология и методы исследования

При проведении полевых измерений методом МТЗ и АМТЗ использовались магнитотеллурические станции «МЭРИ-Про» и новые магнитотеллурические станции NORD производства компании ООО «Северо-Запад» с датчиками IMS-010 и IMS-015 фирмы ООО «БЕГА».

Обработка записей электромагнитных полей осуществлялась с помощью сертифицированной программы оценивания МТ/МВ передаточных функций ЕРІ-КІТ, разработанной в ООО «Северо-Запад» (автор – Епишкин Д.В.). Углубленная обработка полученных данных проводилась в программной системе МТ-Corrector (ООО «Северо-Запад»).

Для качественного анализа данных применялся программный комплекс Inversio, разработанный в ООО «НТЦ Северо-Запад».

При написании диссертационной работы для проведения двумерных и трехмерных инверсий полевых МТ-данных использовались современные сертифицированные программы «ІРІ МТ» (Бобачев А.А.), «ZondMT2D» (Каминский А.Е.) и ModEM (G. Egbert, A. Kelbert). Ручной подбор моделей по потенциальным полям производился в программе «GravMagInv2D» (Чепиго Л.С.).

Защищаемые положения

1. Ось Ильменской коровой аномалии электропроводности в южной части простирается субмеридионально и проходит вдоль 31° в.д., а севернее 58° с.ш. ось аномалии поворачивает по азимуту 25° на северо-восток.

2. Влияние сутурной зоны, с которой отождествляется Ильменская аномалия, прослеживается вплоть до осадочного чехла, проявляясь в виде пониженных значений УЭС позднепротерозойских и палеозойских водоносных горизонтов.

3. Осевая часть Ильменской аномалии верхнекоровой электропроводности маркирует шовную зону, в бортах которой развиты надвиги встречной (западной и восточной) вергентности. Низкие удельные сопротивления шовной зоны обусловлены присутствием графитсодержащих метаморфических пород.

Степень достоверности и достаточность апробации

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного высокоточного геофизического оборудования при проведении полевых магнитотеллурических зондирований, применением апробированных методик обработки и интерпретации данных МТЗ, а также согласованностью полученных результатов с независимыми геолого-геофизическими данными по региону исследований.

Основные положения диссертационной работы докладывались на российских и международных научных конференциях и семинарах: The 26th Electromagnetic Induction Workshop (EMIW2024, Верру, Japan), IX Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна ЭМЗ-2025 (Иркутск), Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2024» (Москва),

Всероссийская конференция «Электроразведка» (2022, 2024, Москва), Международная научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика» (2025, Екатеринбург), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (2022, 2023, 2025, Москва), Ломоносовские чтения — 2025, 50-я сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского — В.Н. Страхова (2024).

Публикации

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 7 научных трудах, 6 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

Фактический материал и личный вклад

В основу диссертации положены данные магнитотеллурических зондирований, полученные в ходе учебно-научных и факультативных практик, а также при проведении научно-исследовательских работ на территории Новгородской, Псковской, Тверской, Ленинградской, Калужской областей и Республики Карелия. Полевые работы проводились с 2020 по 2025 гг., автор принимала непосредственное участие в полевых магнитотеллурических зондированиях, обработке и интерпретации полученных данных с 2022 г.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад соискателя в проведении полевых работ, обработке, анализе и интерпретации данных был определяющим. Соискателем также была проведена значительная работа по подготовке иллюстративного материала и текста статей, их представлению в редакции журналов и переписке с редакторами и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертация содержит список сокращений, введение, семь глав, заключение, список литературы из 79 наименований. Она состоит из 182 страниц текста, 90 иллюстраций и 6 таблиц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, указаны объект и предмет исследования, практическая значимость и научная новизна работы, методология и методы исследования, степень достоверности, личный вклад, информация о публикациях, а также сформулированы 3 защищаемых положения.

Глава 1. Современные представления о строении докембрийского фундамента и геофизической изученности центральной части Восточно-Европейской платформы

В первой главе рассмотрены тектонические модели строения докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и результаты геофизического изучения коровых аномалий электропроводности в центральной части платформы.

Согласно схеме трёхчленного деления Восточно-Европейского кратона (Bogdanova et al., 2016), в его строении выделяются Фенноскандинавский, Сарматский и Волго-Уральский сегменты, разделённые палеопротерозойскими сутурными зонами. Главные тектонические нарушения ориентированы радиально и сходятся в зоне Слободского тектоно-геодинамического узла (Гарецкий, Каратаев, 2009). М.В. Минцем обосновано выделение Лапландско-Среднерусско-Южно-Прибалтийского коллизионно-орогенного пояса, сформированного при коллизии одноимённых микроконтинентов в конце палеопротерозоя (Минц и др., 2010). Колодяжным С.Ю. выделена Верхневолжская провинция как зона схождения протерозойских поясов и вершин клиновидных архейских кратонов (Колодяжный, 2018). Район исследований расположен в зоне сочленения Карельского кратона, Южно-Прибалтийского гранулитогнейсового пояса (ЮПР) и Среднерусского орогена (СР), что определяет его значение для понимания палеопротерозойской эволюции платформы.

Ильменская аномалия была обнаружена по магнитовариационным данным, глубина верхней кромки аномального тела оценена в ~8–10 км (Рокитянский и др., 1981), и зафиксирована на карте проводимости коры ВЕП (Фельдман, Эринчек, 2009). Опыт проектов KIROVOGRAD и SMOLENSK показал, что количественная интерпретация коровых проводников центральной части платформы требует трёхмерной инверсии МТ-данных (Варенцов и др., 2012; Куликов и др., 2018). В трёхмерной модели Южного Приладожья (Ионичева, 2022) Ильменская аномалия выделена как самостоятельная структура северо-восточного простирания, предположительно маркирующая границу между ЮПР и СР.

Глава 2. Возможная природа коровых проводников

Вторая глава посвящена анализу существующих концепций, объясняющих природу коровых аномалий электропроводности, и обоснованию наиболее вероятной природы Ильменской аномалии.

В геофизической литературе выделяются две основные концепции происхождения коровых проводников. Согласно электропроводящей

концепции (Семёнов, 1970; Жамалетдинов, 1996), повышенная электропроводность обусловлена углеродсодержащими и сульфидоносными породами. Согласно флюидной концепции (Поспеев, 1966), аномалии связаны с высокоминерализованными флюидами, сохраняющимися в замкнутых полостях кристаллической коры. Обе концепции не являются взаимоисключающими.

Результаты АМТЗ в Мейерской зоне надвигов Северного Приладожья (Куликов и др., 2023) позволили конкретизировать породы-носители проводимости: углеродсодержащие метаалевролиты верхней подсвиты кирьяволахтинской свиты сортавальской серии, сочетающие высокую магнитную восприимчивость до $1200 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ с низкими значениями УЭС (единицы–первые десятки Ом·м).

Анализ условий, необходимых для обоснования флюидной природы Ильменской аномалии, показал, что наблюдаемый локальный максимум теплового потока в районе оз. Ильмень не позволяет однозначно разграничить вклад флюидного и минерального механизмов. Вместе с тем совокупность данных (линейная форма аномалии, её приуроченность к шовной зоне, значения УЭС вплоть до 0.01 Ом·м и пространственная корреляция с зонами развития метаморфических комплексов) свидетельствует в пользу преимущественно электропроводящей природы Ильменской аномалии, обусловленной тектонизированными углеродсодержащими породами палеопротерозойского возраста, аналогичными породам сортавальской серии.

Глава 3. Методика магнитотеллурических наблюдений

В третьей главе описаны объём и методика полевых магнитотеллурических наблюдений, выполненных в рамках проекта «Ильмень» в 2020–2025 гг. при сотрудничестве кафедры геофизических методов исследования земной коры МГУ и ЦГЭМИ ИФЗ РАН.

Полевые работы проводились на территории Псковской, Новгородской, Тверской и Ленинградской областей на площади 400×320 км. Магнитотеллурическое зондирование выполнено в 302 пунктах наблюдения, расположенных вдоль 7 субширотных профилей: SVR, PA, OO, PV, GT, YT и SN (Рисунок 1). Длины профилей составляют 333–400 км, шаг между пунктами 5–15 км. Границы области исследований определялись зонами влияния электрифицированных железных дорог Октябрьская, Минская, Санкт-Петербург–Новгород, являющихся мощными источниками электромагнитных помех. Дополнительно привлечены данные группы ЛАДОГА по Южному Приладожью (2018–2021).

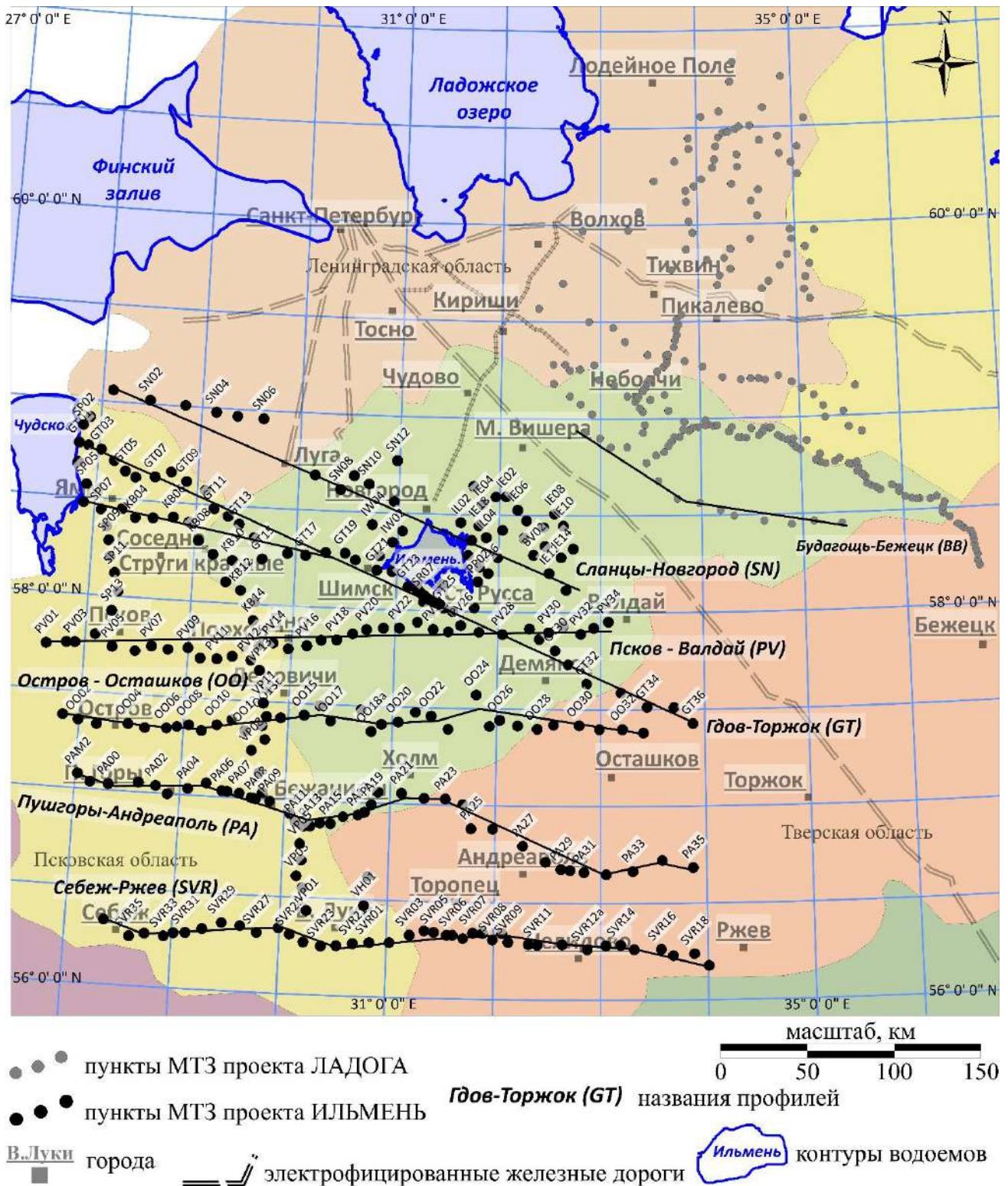


Рисунок 1 – Расположение точек и профилей магнитотеллурических зондирований

Измерения выполнялись станциями МЭРИ-Про и NORD ООО «Северо-Запад» с индукционными датчиками IMS-010 и IMS-015 (ООО «ВЕГА») по стандартной пятикомпонентной методике. Продолжительность записи на точке составляла 12–72 часов. Одновременная работа нескольких станций обеспечивала применение обработки Remote Reference (Gamble et al., 1979).

Обработка данных выполнялась в программном комплексе EPI-KIT (Епишкин, 2018) с оперативным контролем качества по 5-балльной шкале.

Работы проводились в ходе 8 экспедиций на фоне роста солнечной активности в первой фазе 25-го цикла. Параллельно с измерениями выполнен анализ влияния солнечной активности на качество МТ-данных (Куликов и др., 2025). Показано, что с ростом солнечной активности увеличивается амплитуда естественного электромагнитного поля, что напрямую улучшает соотношение сигнал/шум и качество получаемых данных. Для низкочастотной части спектра (периоды более 100 с) определяющим фактором является геомагнитная активность (индекс A_p), для среднечастотного диапазона 0.1–100 Гц — интенсивность рентгеновского излучения Солнца и солнечных вспышек. Благодаря росту солнечной активности за период работ средняя оценка качества данных по 5-балльной шкале выросла с 3.5 в 2020 г. до 4.0–4.4 в 2024–2025 гг. На основании анализа выработаны рекомендации по планированию полевых работ с учётом прогнозов солнечной активности.

Глава 4. Качественный анализ МТ-данных

В четвёртой главе представлены результаты качественного анализа магнитотеллурических данных, включающего построение карт кажущихся сопротивлений на различных периодах, анализ параметров фазового тензора и магнитовариационных характеристик.

По картам кажущихся сопротивлений на площади исследований выделены четыре геоэлектрически обособленных участка (Рисунок 2, Рисунок 3). На периодах 2–100 с пространственная структура поля контролируется геометрией мощного осадочного чехла Валдайского авлакогена: ось аномально низких значений ρ_k ориентирована в северо-восточном направлении и согласуется с картой суммарной продольной проводимости осадков. Начиная с периодов 100–200 с в поле кажущихся сопротивлений появляются аномалии, не связанные с осадочным чехлом. Наиболее яркая субмеридиональная отрицательная аномалия, прослеживаемая между 31° и 32° в.д. от профиля SVR на юге до профиля GT на севере, отвечает Ильменскому глубинному проводнику. Вторая аномалия намечается вдоль 30° в.д. На северо-западном фланге площади фиксируется проводящая зона, предположительно связанная с Чудской аномалией электропроводности.

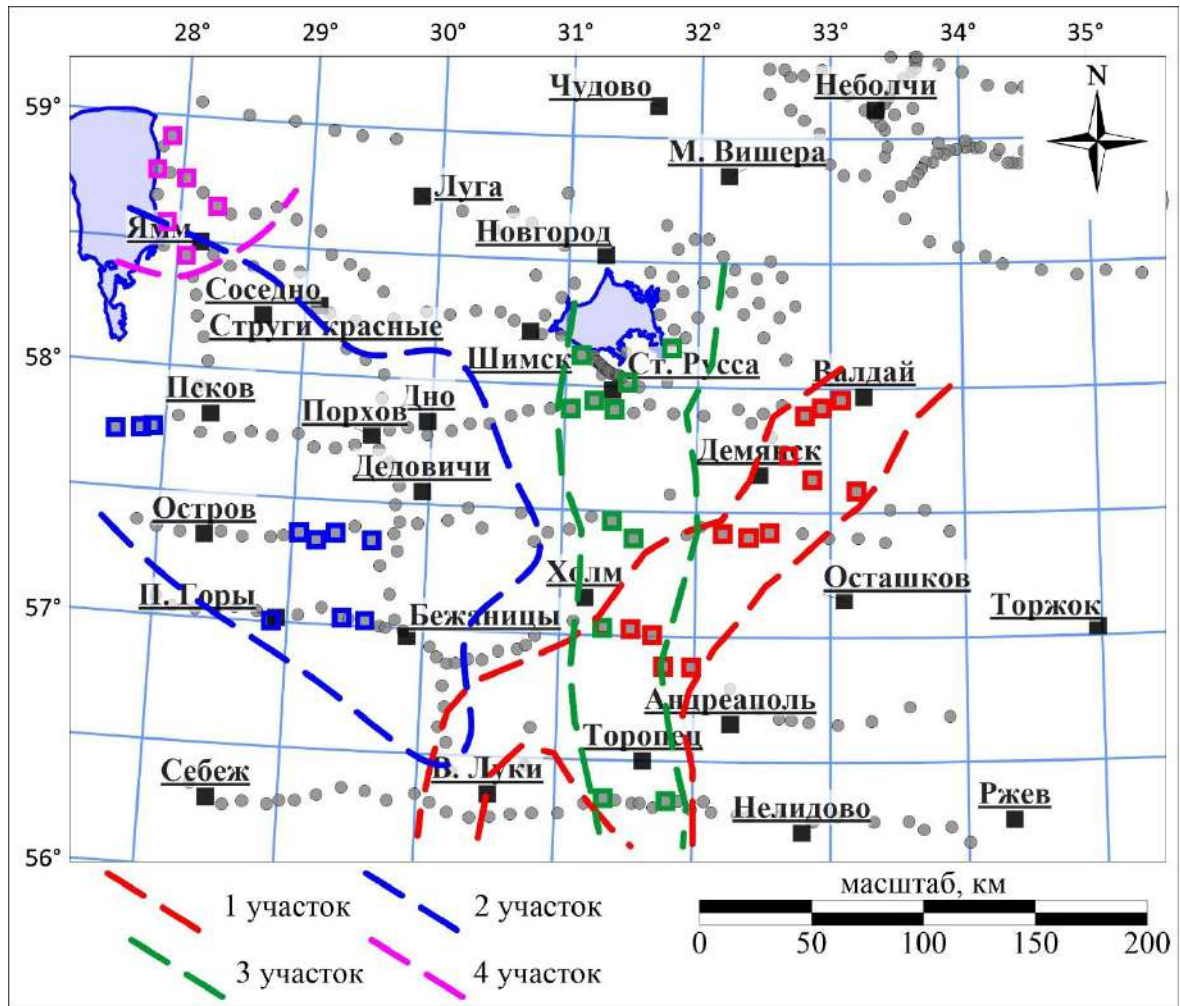


Рисунок 2 – Схема разделения области исследований на участки с выделенными пикетами, для которых построены кривые (Рисунок 3)

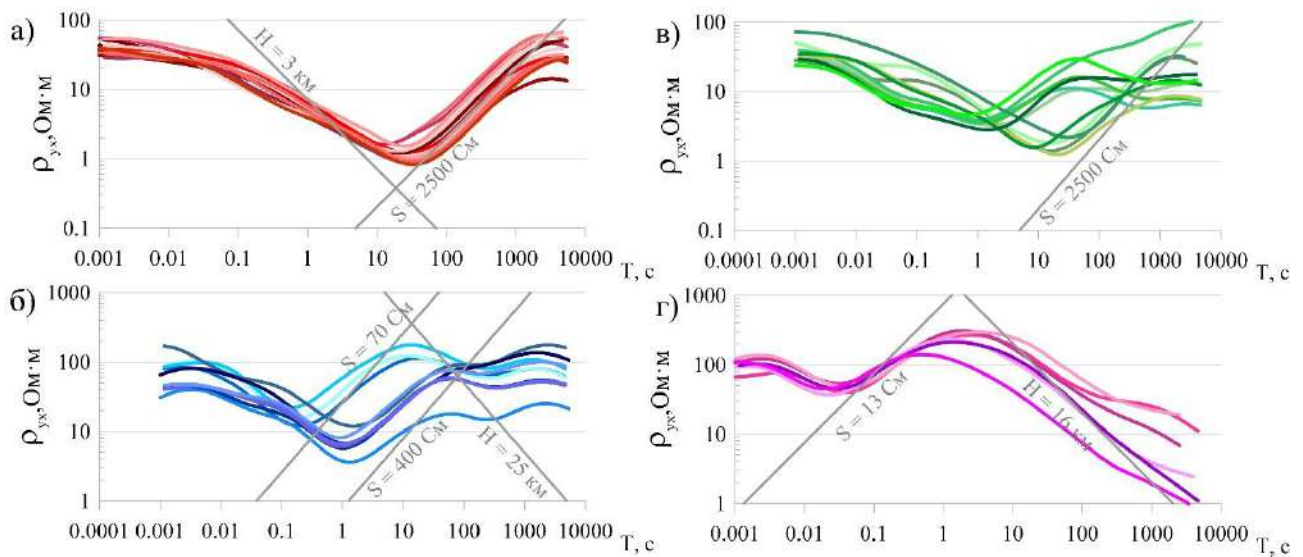


Рисунок 3 – Типичные кривые кажущегося сопротивления: а – в центре Валдайского авлакогена; б – на западном участке площади; в – над меридиональной проводящей зоной в центральной части площади работ; г – в зоне влияния Чудской аномалии

Анализ параметров фазового тензора показал, что на периодах менее 5–10 с разрез повсеместно одномерен ($\Delta\phi < 10^\circ$). С увеличением периода формируются зоны повышенной неоднородности $\Delta\phi > 15^\circ$: на северо-западе площади с преобладающими азимутами $270\text{--}330^\circ$ и в районе Старой Руссы с азимутами $10\text{--}15^\circ$ СВ (Рисунок 4). На периоде 1000 с к ним добавляется субмеридиональная зона от г. Западная Двина до г. Старая Русса. Параметр асимметрии β в пределах выделенных зон не превышает 10° , что свидетельствует о квазидвумерном характере структур.

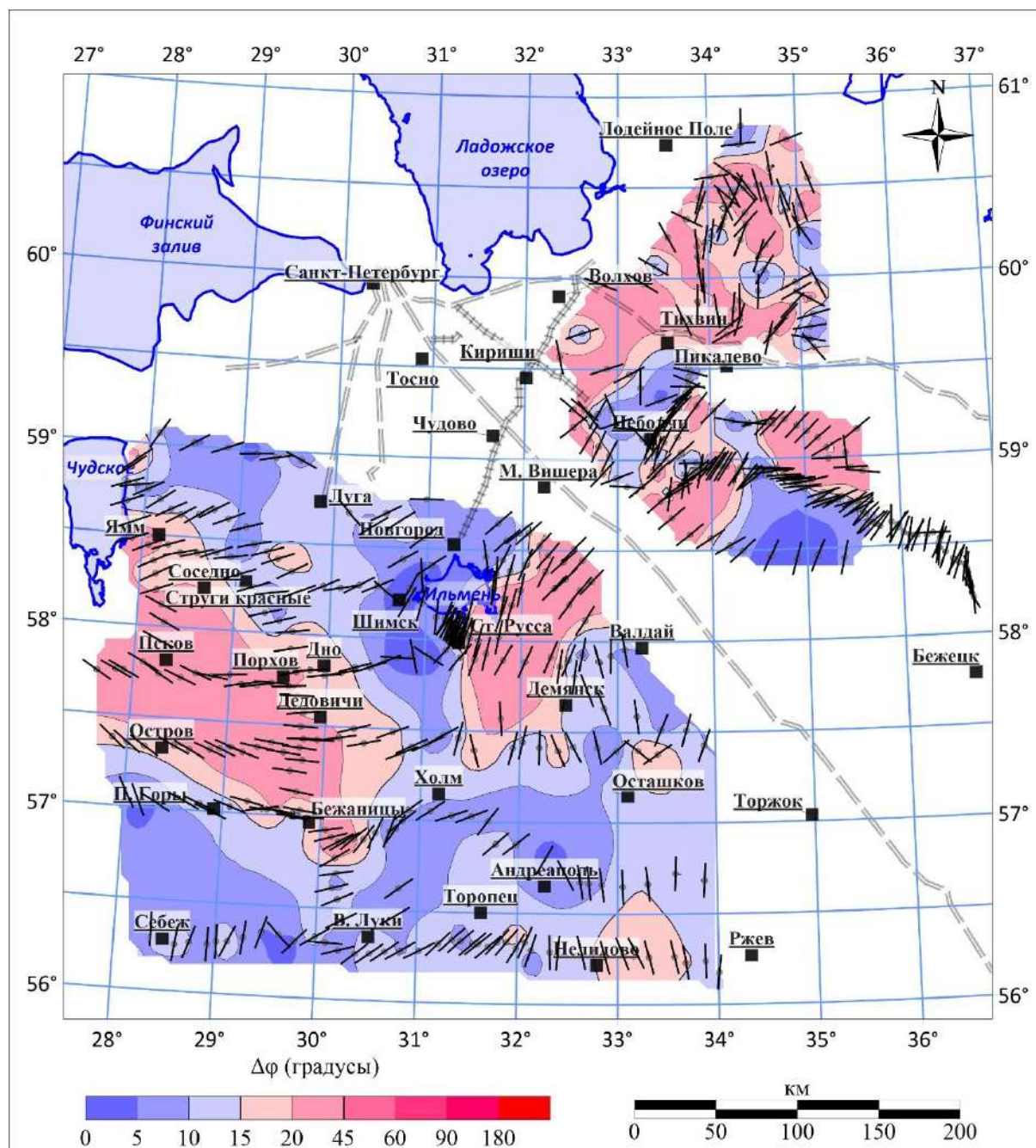


Рисунок 4 – Карта фазового параметра неоднородности $\Delta\phi$ с нанесенными направлениями главной оси ФТ на периоде 100 секунд

Магнитовариационные данные независимо подтвердили положение выявленных проводников. Смена знака компоненты W_{zy} между 31° и 32° в.д. однозначно фиксирует ось Ильменского проводника (Рисунок 5). К северу от оз. Ильмень ось поворачивает на северо-восток в сторону городов Малая Вишера и Тихвин, что согласуется с результатами по Южному Приладожью (Ионичева, 2022). Линейная положительная аномалия широтной компоненты горизонтального магнитного тензора M_{yy} на периодах более 500 с совпадает с зоной разворота индукционных векторов, подтверждая субмеридиональное простираание глубинного проводника.

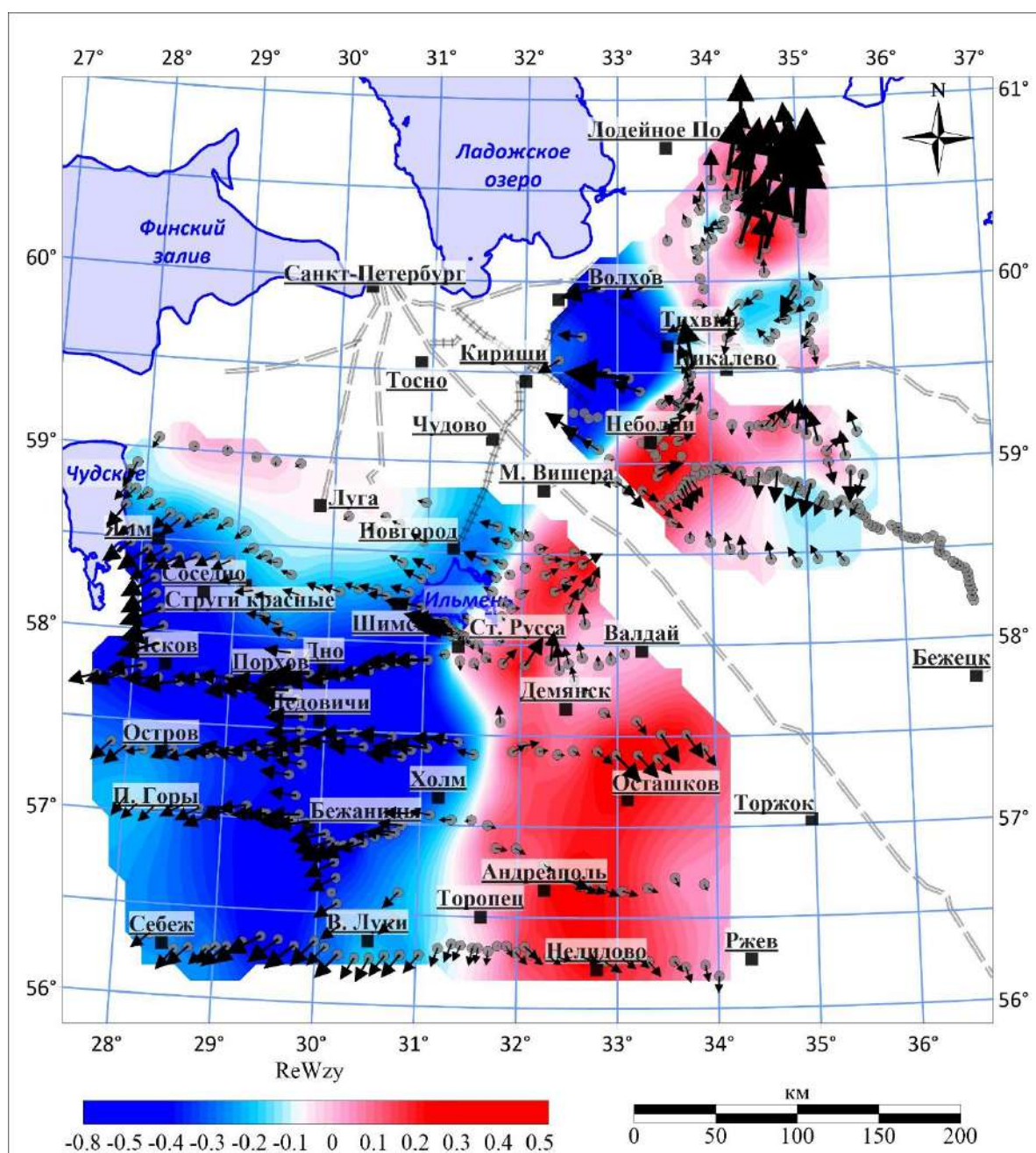


Рисунок 5 – Карта реальной части компоненты W_{zy} с нанесенными индукционными векторами на периоде 500 с

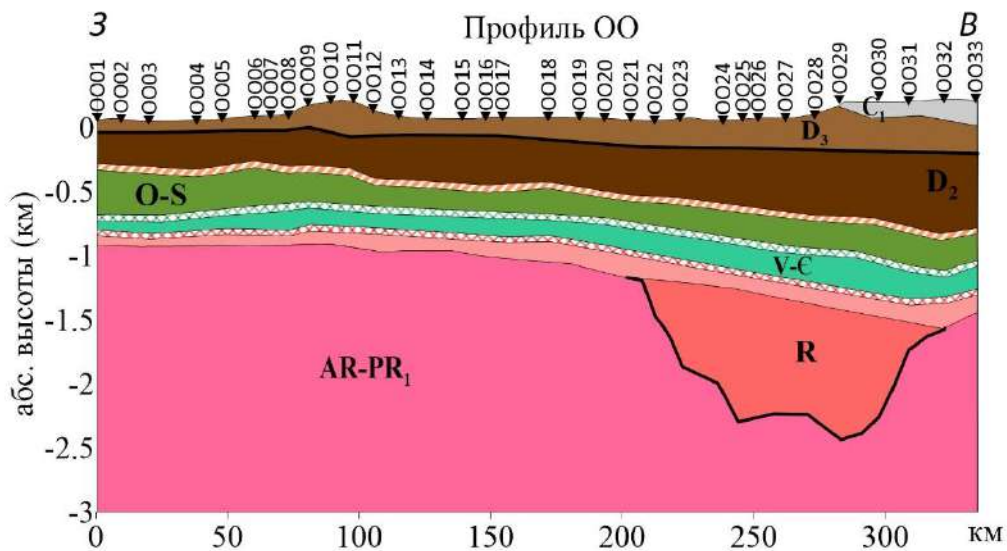
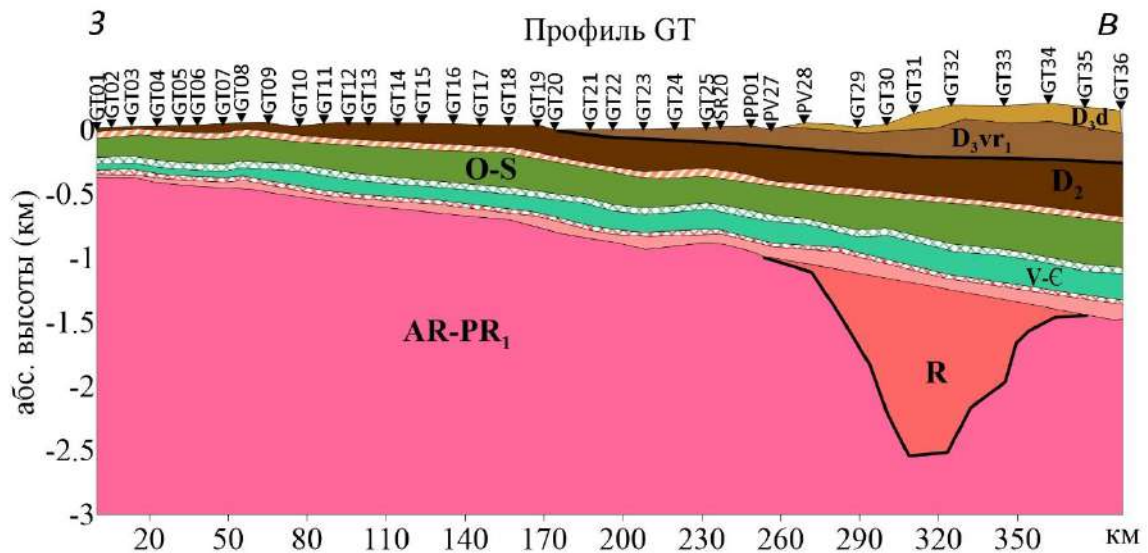
Совокупность результатов качественного анализа указывает на сложную структуру геоэлектрического разреза на коровых глубинах с наличием разнонаправленных проводящих зон, что обосновывает необходимость применения трёхмерной инверсии для количественной интерпретации данных.

Глава 5. Построение геоэлектрической модели осадочного чехла

Пятая глава посвящена построению детальной геоэлектрической модели осадочного чехла Главного девонского поля, являющейся необходимым этапом, предшествующим трёхмерной инверсии коровой части разреза.

По результатам анализа параметра неоднородности фазового тензора $\Delta\phi$ установлено, что в диапазоне периодов, отвечающих осадочному чехлу (до 100 с), значения $\Delta\phi$ практически повсеместно не превышают 15° . Это позволяет использовать одномерный подход к интерпретации и построить модель осадочного чехла на основе послойного 1D-подбора по каждой точке наблюдения. Подбор выполнялся в программе IPI MT (А.А. Бобачев) с привлечением данных по скважинам и карты мощности осадочного чехла, построенной С.Ю. Колодяжным.

Принципиальный результат интерпретации состоит в том, что геоэлектрические границы в нижней части осадочного разреза (ниже абсолютной отметки -300 м) в большей степени приурочены к смене водоносных горизонтов, различающихся по минерализации пластовых вод, нежели к стратиграфическим или литологическим рубежам. На этих глубинах УЭС опускается до первых Ом·м, и определяющим фактором становится минерализация флюида, а не литология породы. Это наблюдение послужило основой для построения гидрогеолого-геофизических разрезов (Рисунок 6).



- | | | | |
|--|--|--|-------------------------|
| | - нижнекаменноугольные отложения | | - положение пунктов МТЗ |
| | - верхнедевонские отложения | | |
| | - среднедевонский водоносный горизонт | | |
| | - эйфельский водоупорный горизонт | | |
| | - ордовикско-силурийский водоносный горизонт | | |
| | - нижнекембрийский водоупорный горизонт | | |
| | - венд-кембрийский водоносный горизонт | | |
| | - верхневендский водоупорный горизонт | | |
| | - вендский водоносный комплекс | | |
| | - рифейский водоносный комплекс | | |
| | - архей-протерозойский водоносный комплекс | | |

Рисунок 6 – Гидрогеолого-геофизические разрезы по профилям «ОО», «РА» и «GT»

Построенные карты УЭС водоносных горизонтов (Рисунок 7) выявили закономерное снижение сопротивлений с северо-запада на юго-восток, согласующееся с региональной гидрохимической зональностью. Однако в районе оз. Ильмень и г. Старая Русса обнаружены аномалии, нарушающие эту закономерность. В раннепалеозойском и среднедевонском горизонтах прослеживаются зоны аномально пониженных УЭС, не объяснимые ни региональными структурными закономерностями, ни изменением литологии.

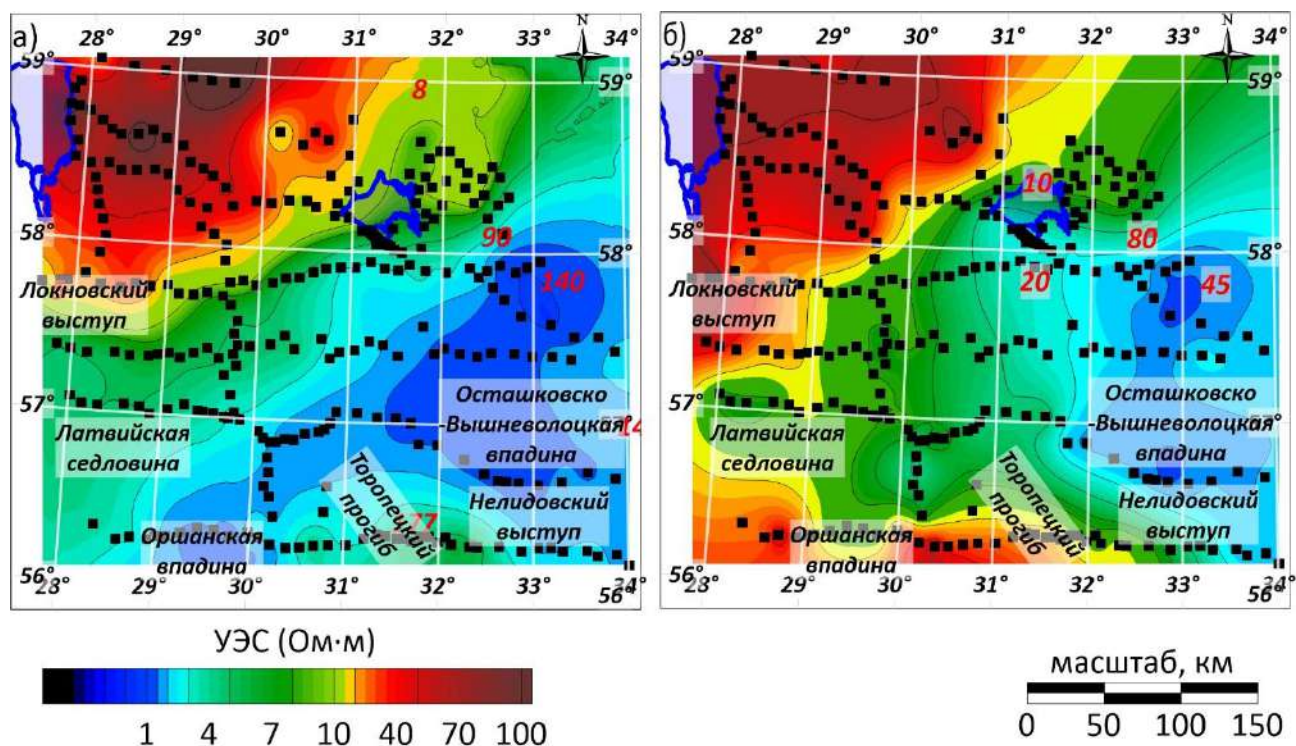


Рисунок 7 – Карты УЭС двух региональных водоносных горизонтов: а – раннепалеозойского, б – среднедевонского. Красным отмечена минерализация по данным скважин

Пространственное положение выявленных зон пониженного УЭС совпадает с осью Ильменской шовной зоны. Длительная тектоническая активность этой глубинной структуры обусловила развитие зон повышенной трещиноватости в породах-водоупорах, по которым высокоминерализованные воды нижних горизонтов мигрируют в вышележащие. Таким образом, влияние Ильменской шовной зоны прослеживается не только на коровых глубинах, но и в осадочном чехле, проявляясь в аномальных значениях УЭС водоносных горизонтов и в существовании термальных минерализованных источников.

Глава 6. Создание опорной 2D-модели по профилю Ямм–Торжок

В шестой главе описано построение опорной двумерной геоэлектрической модели по региональному профилю Ямм–Торжок (УТ), пересекающему ось Ильменской аномалии вкrest простираения на протяжении 380 км. Профиль проходит через основные тектонические структуры района: восточную часть

Южно-Прибалтийского коллизионно-орогенного пояса с Новгородским гранитоидным массивом, Ильменскую шовную зону и периклинальное замыкание Среднерусского сегмента Лапландско-Беломорско-Среднерусского пояса.

Инверсия выполнялась в программе ZondMT2D (А.Е. Каминский) с детально заданным осадочным чехлом по результатам 1D-подбора. Для оценки устойчивости решения реализовано несколько вариантов инверсии: по эффективным кривым импеданса, совместно с типперами, бимодальная инверсия и двухэтапная схема. Стартовое приближение глубинной части разреза формировалось на основе тектонической концепции, учитывающей коллизионную природу региона и чешуйчато-надвиговое строение верхней коры (Гарецкий, Каратаев, 2011; Минц и др., 2010).

На итоговой модели (Рисунок 8) установлены следующие основные черты глубинного строения. Средняя и нижняя кора Среднерусского блока (СР) характеризуется более высокими УЭС по сравнению с корой Южно-Прибалтийского террейна. Для последнего установлена также меньшая мощность литосферы: понижение УЭС до десятков Ом·м фиксируется с глубин 80–90 км. В верхней коре выделяются проводящие зоны листрической морфологии, наклонённые под углами 20–30° и выполаживающиеся на глубинах 40–50 км. В западной части профиля проводники падают на запад, в восточной — на восток. В районе г. Старая Русса наблюдается их встречное совмещение с формированием крупной области аномально низких УЭС. Дивергентная геометрия свидетельствует о системе встречных коллизионных надвигов.

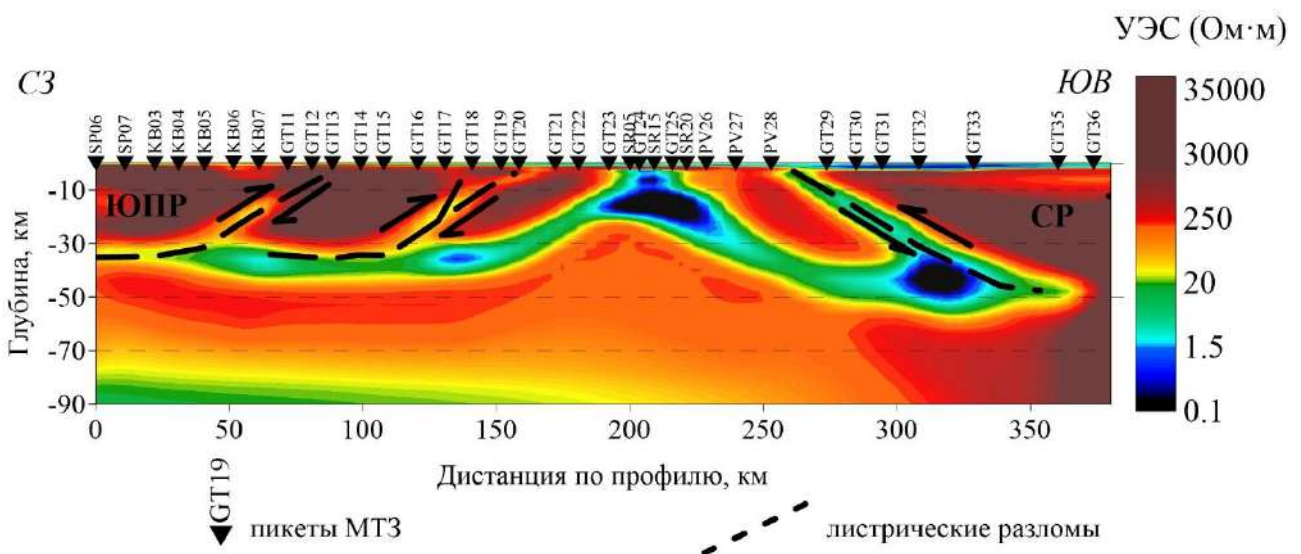


Рисунок 8 – Модель УЭС по линии профиля Ямм–Торжок (YT). ЮПР – Южно-Прибалтийский ороген, СР – Среднерусский ороген

Глава 7. Трёхмерная инверсия и построение 3D-модели УЭС Ильменской аномалии

Седьмая глава содержит основные результаты диссертации: описание процедуры трёхмерной инверсии МТ-данных, полученную трёхмерную геоэлектрическую модель Ильменской аномалии, её верификацию по данным потенциальных полей и палеотектоническую реконструкцию.

Построение стартовой модели выполнялось поэтапно: результаты 1D-подбора осадочного чехла были перенесены в верхнюю часть 3D-модели, а опорная 2D модель по профилю УТ последовательно распространена на 9 профилей. Полученные 2D-разрезы совмещены на единой координатной сетке с латеральной интерполяцией.

Трёхмерная инверсия выполнена в программе ModEM (G. Egbert, A. Kelbert) по полному тензору импеданса и векторам Визе для 265 точек наблюдения на 34 периодах от 10^{-3} до 4000 с. Размеры расчётной сетки $50 \times 59 \times 74$ ячеек с горизонтальным шагом 10×10 км. Принципиальной особенностью методики стало сочетание автоматической минимизации функционала невязки с экспертной геологической корректировкой модели на промежуточных итерациях в программе Inversio (ООО «НТЦ Северо-Запад»). Средние невязки по компонентам импеданса составили $\sim 10\%$ по кажущемуся сопротивлению и $\sim 5^\circ$ по фазе.

На картах-срезах УЭС (Рисунок 9Рисунок) прослеживается эволюция Ильменской аномалии с глубиной.

Уже с глубины 10 км отчётливо проявляется ось Ильменской аномалии. На глубине 20 км центральная аномалия достигает максимальной интенсивности: значения УЭС в ядре падают до десятых долей Ом·м и ниже. На глубинах ниже 25 км уровень сопротивлений составляет 1000 Ом·м и больше, что соответствует породам нижней коры.

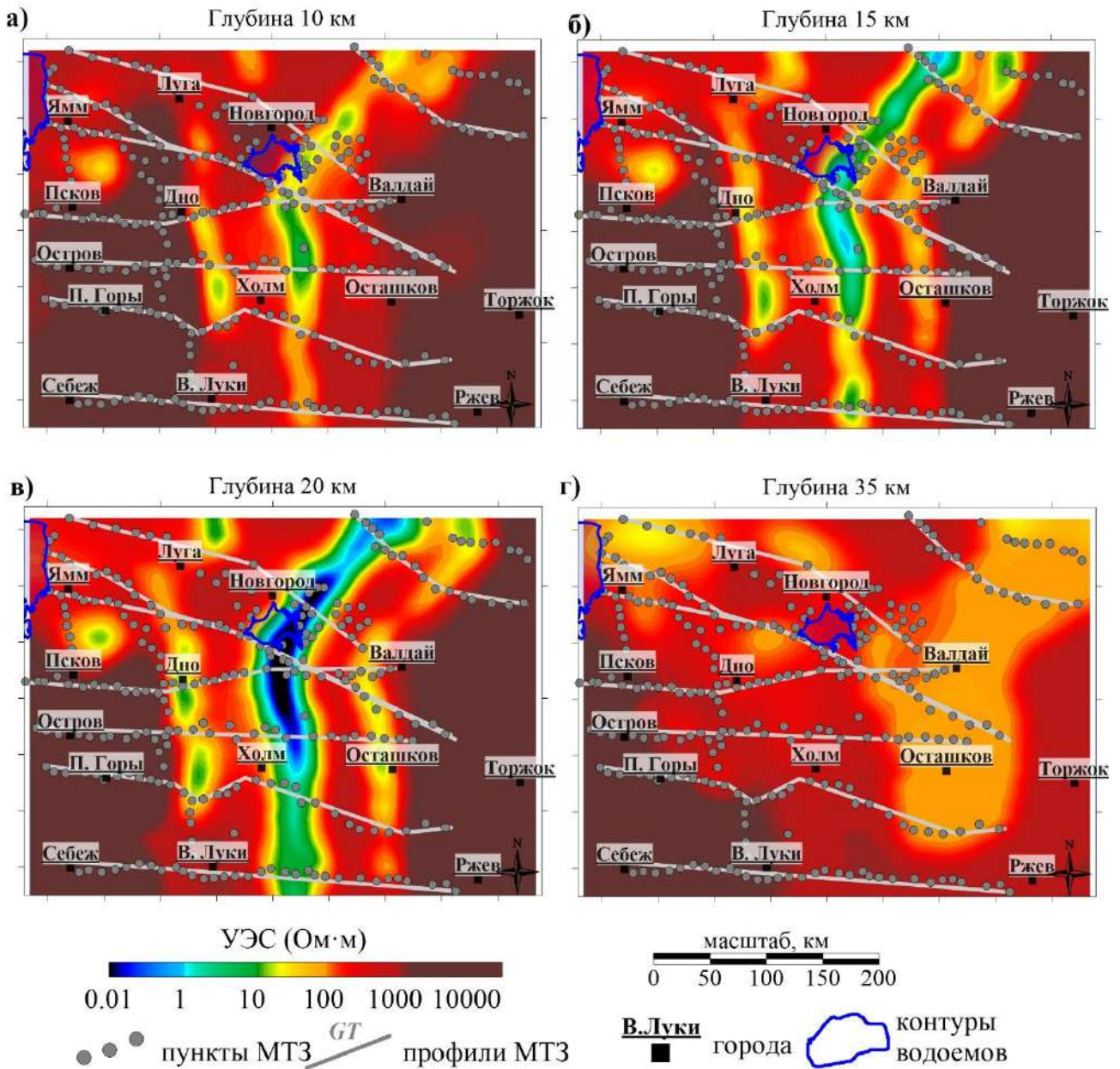


Рисунок 9 – Карты-срезы трехмерной модели УЭС для глубины: а – 10 км, б – 15 км, в – 20 км, г – 35 км

Анализ геоэлектрических разрезов вдоль профилей (Рисунок 10) выявил следующие устойчивые закономерности. Основной коровый проводник представляет собой пластообразное тело субмеридионального простирания в интервале глубин 10–30 км. Интенсивность аномалии нарастает от южных профилей (РА, SVR – единицы Ом·м, маломощные прослои на 25–35 км) к северным (УТ, GT – сотые доли Ом·м, мощное тело на 8–30 км). На центральных и северных профилях проводящая зона связана с поверхностью через узкий канал пониженных УЭС в верхней коре. Западная и восточная вергентности проводящей структуры устойчиво фиксируются, указывая на надвиговый характер.

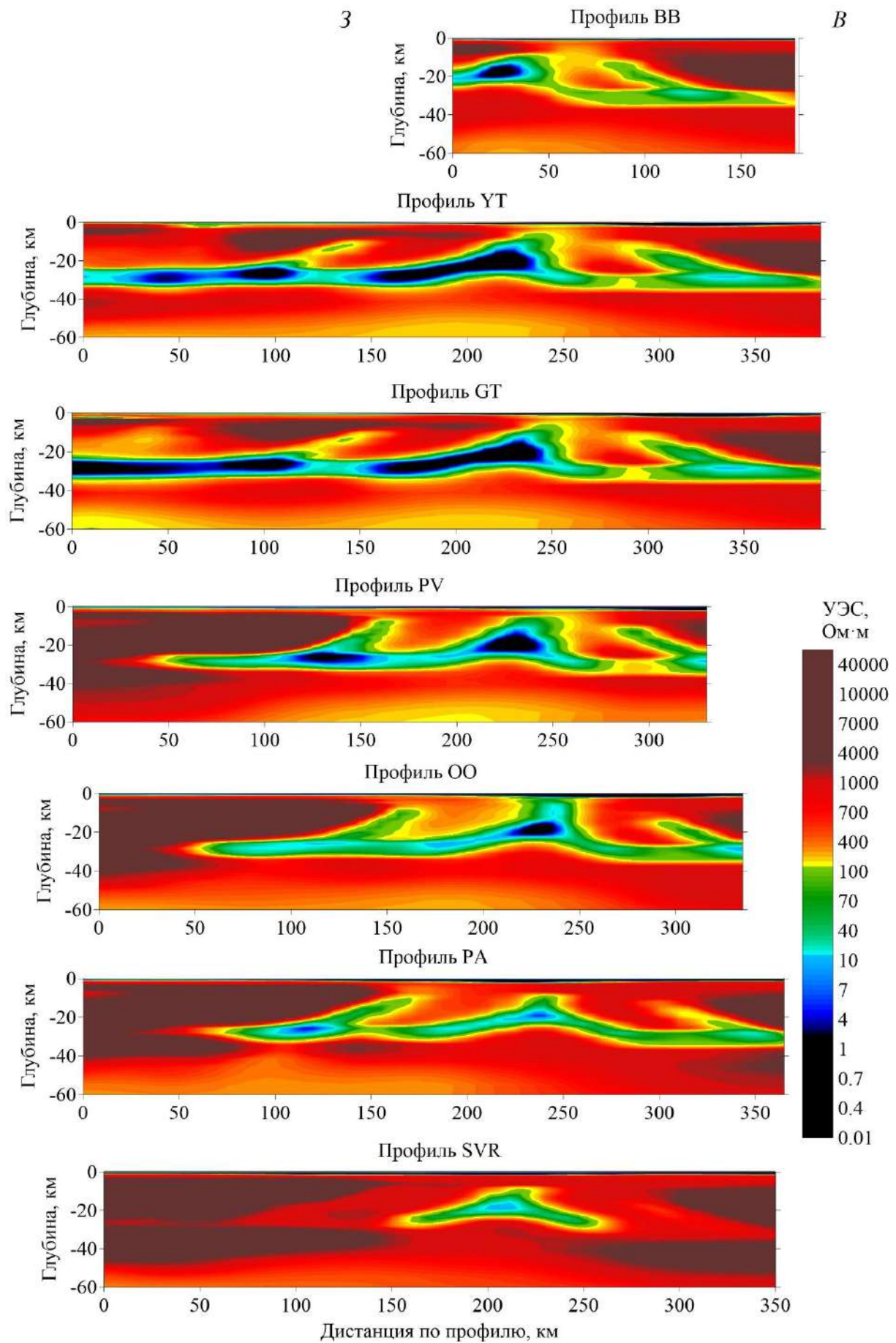


Рисунок 10 – Результаты трехмерной инверсии по профилям

Совмещение с тектонической схемой фундамента (Колодяжный, 2018а) показало, что осевая часть аномалии пространственно совпадает с Ильменской шовной зоной, разделяющей Южно-Прибалтийский пояс и Среднерусский пояс. Ильменская зона заключена между системами встречных разноразвергентных надвигов – именно такая картина фиксируется на геоэлектрических разрезах.

Двумерное плотностное моделирование вдоль пяти профилей МТЗ (GT, RV, OO, PA, SVR) подтвердило основные черты геоэлектрической модели.

На основе совместной интерпретации результатов 3D-инверсии данных магнитотеллурических зондирований и плотностного моделирования была построена комплексная геолого-геофизическая модель по профилю GT (Рисунок 11). Тектоническая основа модели принята по (Колодяжный, 2018а, 2018б).

Общий фон УЭС верхней и средней коры вне локальных аномалий составляет 1000–5000 Ом·м, что типично для консолидированной докембрийской коры ВЕП. Приуроченные к основанию коры субгоризонтальные проводники с УЭС в первые Ом·м отвечают углеродсодержащим комплексам, структурно «размазанным» вдоль сместителей сутурных зон в условиях тангенциального сжатия коллизионного этапа.

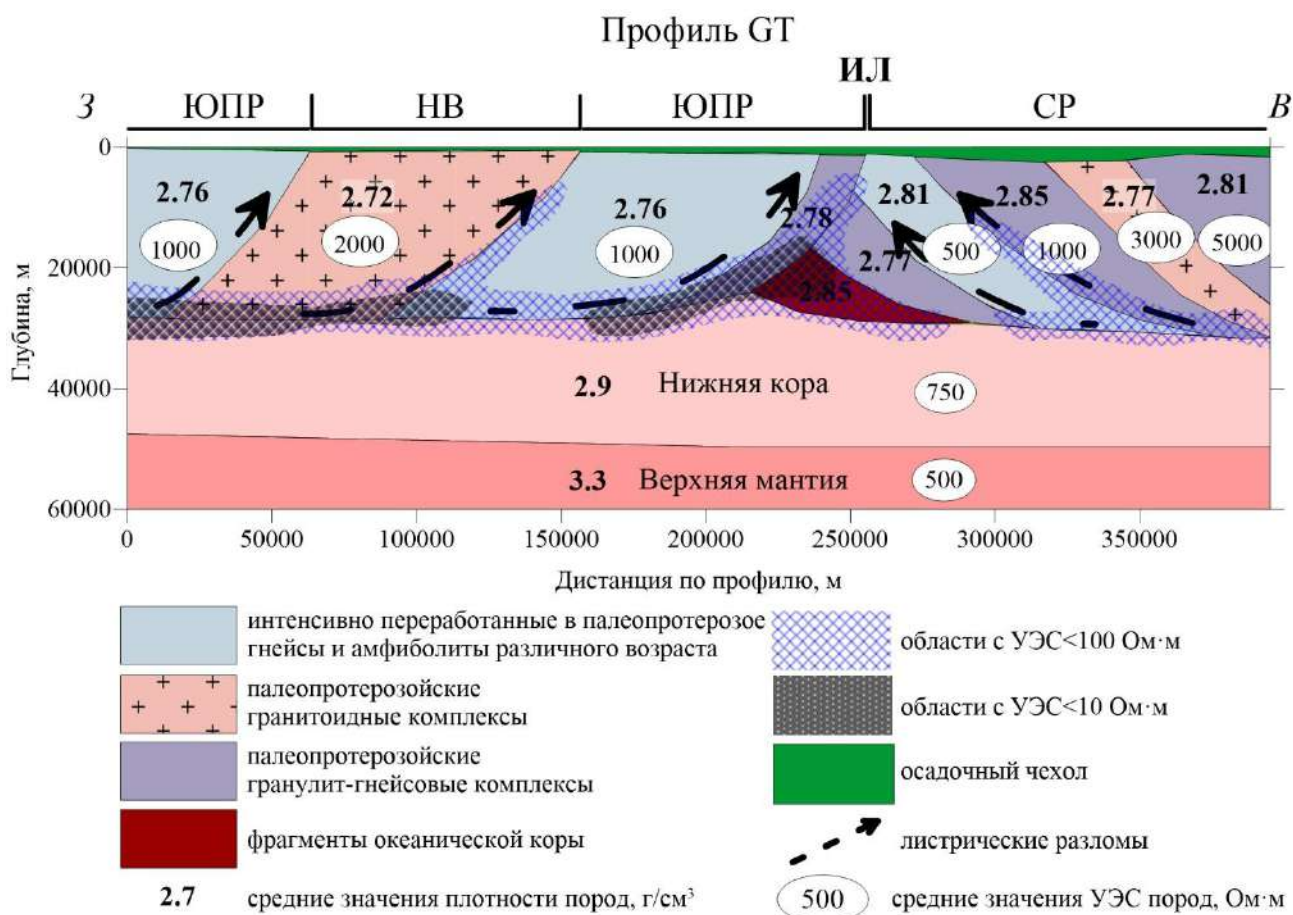


Рисунок 11 – Геолого-геофизическая модель по профилю GT. ЮПР – Южно-Прибалтийский пояс, НВ – Новгородский массив, СР – Среднерусский пояс, ИЛ – Ильменская шовная зона

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена трёхмерная геоэлектрическая модель Ильменской аномалии коровой электропроводности. Основные результаты состоят в следующем.

Установлено плановое положение аномалии: в южной части её ось простирается субмеридионально вдоль 31° в.д., севернее 58° с.ш. поворачивает по азимуту 25° на северо-восток и прослеживается в сторону Малой Вишеры и Тихвина, смыкаясь с зоной повышенной проводимости Южного Приладожья. Это позволяет рассматривать Ильменскую и Ладожскую аномалии как элементы единой системы коровых проводников, маркирующей границу первого порядка между Южно-Прибалтийским и Среднерусским орогенными поясами.

Построена геоэлектрическая модель осадочного чехла: определены УЭС четырёх региональных водоносных горизонтов, скорректирована карта мощности чехла, построены карты изогипс кровли водоупоров. Аномально низкие УЭС позднепротерозойских и палеозойских горизонтов в районе оз. Ильмень не объясняются ни структурной зональностью, ни литологией и связываются с вертикальной миграцией высокоминерализованных вод по зонам повышенной проницаемости водоупоров над тектонически ослабленной зоной.

Трёхмерная модель выявила систему коровых проводящих зон листрической конфигурации с УЭС до десятых долей Ом·м в интервале глубин 10–30 км, выполаживающихся в основании коры. Осевая часть аномалии совпадает с Ильменской шовной зоной, в бортах которой развиты надвиги встречной вергентности; низкие сопротивления обусловлены графитсодержащими метаморфическими породами при дополнительном вкладе флюидонасыщенности верхнекоровых сегментов надвиговых зон. Двумерное плотностное моделирование не потребовало пересмотра принятых структурных границ.

Рекомендации и дальнейшие перспективы

В условиях мощного проводящего чехла рекомендуется поэтапная интерпретация: одномерный подбор чехла с максимальным использованием априорной геологической и гидрогеологической информации, затем последовательная 2D- и 3D-инверсия со стартовой моделью по опорным профилям. При планировании полевых работ на платформенных территориях целесообразен адаптивный выбор режима наблюдений по прогнозу солнечной и геомагнитной активности. При поисках полезных ископаемых следует учитывать связь Ильменской шовной зоны с проницаемостью водоупоров и распределением флюидов, а также перспективы объектов, генетически связанных с палеопротерозойскими графитсодержащими комплексами.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с уточнением глубинной геометрии надвигов по данным совместной инверсии сейсмических и электромагнитных данных, петрофизическим обоснованием проводящих зон с оценкой вкладов графитизации и флюидного насыщения, а также прослеживанием аномалии в западном и южном направлениях, где связь с другими коровыми аномалиями платформы остаётся дискуссионной.

Благодарности

Автор искренне благодарит научного руководителя, д.г.-м.н. В. А. Куликова, за научное руководство и поддержку. Особая признательность д.г.-м.н. С. Ю. Колодяжному (ГИН РАН) за геологические консультации и помощь в интерпретации данных.

Благодарность к.ф.-м.н. А. Г. Яковлеву и ООО «Северо-Запад» за предоставление геофизической аппаратуры и программного обеспечения. Также автор выражает благодарность студентам и сотрудникам кафедры геофизических методов исследования земной коры и ЦГЭМИ ИФЗ РАН за участие в полевых работах, на которых базируется данное исследование.

IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. Куликов В.А., Епишкин Д.В., Ионичева А.П., **Шагарова Н.М.**, Ширяев М.И. Корреляция между спектральной плотностью компонент магнитотеллурического поля и солнечной активностью на примере работ в районе Ильменской коровой аномалии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2025. – Т. 64, № 4. – С. 124–132. EDN: WKXLKR. Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ). 0,56 п.л., вклад автора – 10%
*Kulikov V.A., Epishkin D.V., Ionicheva A.P., **Shagárova N.M.**, Shiryayev M.I. Correlation between the spectral density of the MT field components and solar activity based on the example of studies near the Ilmen crustal anomaly // Moscow University Geology Bulletin. – 2025. – vol. 80, № 5. – pp. 698–706. EDN: JSXJSU. Импакт-фактор 0,236 (SJR). 0,56 п.л., вклад автора – 10%*
2. Куликов В.А., Епишкин Д.В., Ионичева А.П., **Шагарова Н.М.** Вариации суточной спектральной плотности компонент МТ поля // Гелиогеофизические исследования. – 2025. – № 47. – С. 52–63. EDN: CVBUJO. Импакт-фактор 0,296 (РИНЦ). 0,75 п.л., вклад автора – 10%
3. Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Лозовский И.Н., Родина Т.А., **Шагарова Н.М.**, Яковлев А.Г. Трёхмерная модель Ильменской коровой аномалии электропроводности по результатам магнитотеллурических зондирований // Физика Земли. – 2025. – № 1. – С. 103–118. EDN: ACLVRZ. Импакт-фактор 0,804 (РИНЦ). 1,16 п.л., вклад автора – 50%

*Kulikov V.A., Varentsov I.V., Ivanov P.V., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu., Lozovsky I.N., Rodina T.A., **Shagarova N.M.**, Yakovlev A.G. Three-dimensional model of the Ilmen crustal conductive anomaly based on magnetotelluric soundings // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2024. – vol. 60, № 6. – pp. 1171–1184. EDN: KRCWJA. Импакт-фактор 0,397 (SJР). 0,87 п.л., вклад автора – 50%*

4. Куликов В.А., Варенцов И.М., Барышников С.П., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Мокров Е.А., **Шагарова Н.М.**, Ширяев М.И., Яковлев А.Г. Результаты магнитотеллурических работ по региональному профилю Ямм–Торжок // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 12. – С. 1638–1651. EDN: GADMVT. Импакт-фактор 0,910 (РИНЦ). 1,16 п.л., вклад автора – 50%

*Kulikov V.A., Varentsov I.M., Baryshnikov S.P., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu., Mokrov E.A., **Shagarova N.M.**, Shiryayev M.I., Yakovlev A.G. Magnetotelluric results from the Yamm–Torzhok regional profile // Russian Geology and Geophysics. – 2025. – vol. 66, № 12. – pp. 1602–1615. EDN: VQFGQX. Импакт-фактор 0,463 (SJР). 0,87 п.л., вклад автора – 50%*

5. Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Аристова А.А., Ионичева А.П., **Шагарова Н.М.** Построение геоэлектрической модели осадочного чехла центральной части главного девонского поля Восточно-Европейской платформы на основе данных МТЗ // Гелиогеофизические исследования. – 2025. – № 50. – С. 56–71. EDN: HUVIQA. Импакт-фактор 0,296 (РИНЦ). 1,0 п.л., вклад автора – 30%

6. Куликов В.А., Морозов Ю.А., Ионичева А.П., **Шагарова Н.М.**, Яковлев А.Г., Соколова Е.Ю., Матвеев М.А., Терехов Е.Н. Визуализация покровно-складчатой структуры метаморфических толщ в системе «чехол–фундамент» методом АМТЗ (на примере Мейерской зоны Приладожья) // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24, № 4. – С. 58–80. EDN: DFSURY. Импакт-фактор 0,795 (РИНЦ). 1,44 п.л., вклад автора – 50%

Прочие публикации

Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ:

7. **Шагарова Н.М.**, Куликов В.А., Алексанова Е.Д. Значение поворота и нормализации магнитотеллурических данных перед количественной интерпретацией // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2025. – Т. 67, № 4. – С. 74–86. EDN: QXRZLJ. Импакт-фактор 0,557 (РИНЦ). 0,81 п.л., вклад автора – 80%