На правах рукописи

Таран Яна Валентиновна



ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ РААХЕ-ЛАДОЖСКОЙ ШОВНОЙ ЗОНЫ (ВОСТОЧНАЯ ФЕННОСКАНДИЯ, СЕВЕРНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

Специальность 1.6.9

«Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель: **Алёшин Игорь Михайлович** кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий Лабораторией геоинформатики (№ 501) Федерального Государственного Бюджетного Учреждения Науки Института Физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Официальные оппоненты: **Муравина Ольга Михайловна,** доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет»

Коробейников Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова.

Защита диссертации состоится 21 января 2027 года в 11.00 на заседании диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещён на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.gisnauka.ru и на сайте ИФЗ РАН www.ifz.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в одном экземпляре, с согласиями об использовании персональных данных, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10., стр. 1., ИФЗ РАН, учёному секретарю диссертационного совета

Автореферат разослан «___» декабря 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета:

кандидат физико-математических наук  Жостков Р.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изучение структурно-вещественного состава и эволюции докембрийских комплексов земной коры является одной из ключевых задач современной геологии. Юго-Восточная Фенноскандия – крупнейшая область выхода фундамента Восточно-Европейской платформы на территории России представляет особый интерес для геофизических исследований уже более 50 лет. В частности, в Северном Приладожье расположена Ладожская аномалия электропроводности, относящаяся к коровым проводникам. Подобные структуры маркируют шовные зоны между архейскими и протерозойскими блоками фундамента земной коры, и их изучение несет в себе важную информацию о процессах заключительной стадии консолидации кратонов [Рокитянский и др., 2018].

Северо-Ладожская зона Карело-Кольской минерагенической провинции является одной из старейших российских рудных областей. Благодаря своему местоположению и сохраняющемуся большому разведывательному потенциалу в отношении стратегически важных, дефицитных видов минерального сырья включая редкие и редкоземельные элементы (Li, Sc, In, Y, Ti и др.), она может служить идеальным полигоном для развития методики прогнозно-поисковых и разведочных работ с учетом повышенных современных требований к их глубинности и достоверности. Одним из основных геофизических методов, используемых при изучении подобных областей, являются магнитотеллурические магнитовариационные зондирования (МТ-МВ), позволяющие на современном этапе развития магнитотеллурики добиться максимальной глубинности исследования. Для изучения верхней части разреза эффективным методом является технология проведения аэромагнитной маловысотной съёмки с Беспилотными Воздушными Средствами (БВС). Благодаря развитию приборной базы в последние десятилетия появилась возможность производить съёмку в труднопроходимых районах, таких как Северное Приладожье, с минимальными затратами.

Степень разработанности темы исследования. Многочисленные геофизические исследования российских и европейских учёных в Фенноскандии и примыкающих областях, позволили построить множество 1D и 2D моделей проводимостей верхней мантии изучаемого региона. Их результаты были систематизированы и интерпретированы группой ученых под руководством T. Korja, получившими послойную модель суммарной интегральной проводимости коры Фенноскандии SMAP. Согласно полученным картам, Раахе-Ладожская шовная зона между архейской и протерозойской корой маркируется коровыми проводниками [Korja et al.,2002].

В пределах Северного Приладожья данная зона повышенной проводимости известна как Ладожская аномалия электропроводности (ЛАЭ). Первоначально ЛАЭ была обнаружена методом МВЗ в конце семидесятых годов и описана А.А. Ковтун и И.И. Рокитянским [Рокитянский и др., 1981]. Для более

детального исследования данной аномалии позднее были выполнены АМТ зондирования вдоль профиля Выборг-Суоярви [Ковтун и др., 1998]

Целью диссертационного исследования является изучение разноуровневого строения Раахе-Ладожской зоны с помощью современных магнитотеллурических методов в комплексе с аэромагнитной съёмкой. Выполняется моделирование различных структурных этажей Раахе-Ладожской зоны: от глубинных разрезов к среднемасштабной модели зоны сочленения кратонов и модели приповерхностных интрузивных структур на примере массива Валимяки. Уточняется проводящая структура ЛАЭ, представленной метаморфизованными вулканогенно-осадочными комплексами, сформированными на шельфе и континентальном склоне окраины, в пределах которых сосредоточены месторождения медных, никелевых, полиметаллических и других руд. Для достижения поставленных целей решаются следующие задачи:

1. Создание геолого-геофизических моделей структур Северного Приладожья на основании данных МТ-МВ зондирований и аэромагнитной съёмки с привлечением опубликованных материалов предыдущих результатов исследований.

2. Сбор, обобщение и анализ базы данных результатов, предшествующих геофизических и петрофизических исследований Северного Приладожья (приведено в Главе 1)

3. Построение двумерной и трехмерной геоэлектрических моделей на основании новейших данных, полученных методом МТ-МВ синхронных зондирований в 2013-2015 гг. вдоль профиля Выборг-Суоярви с использованием данных предыдущих отечественных и зарубежных исследователей Раахе-Ладожской зоны (Глава 2)

4. Построение магнитных моделей локальных структур (Янисъярвинского разлома и массива Валимяки) по данным аэромагнитной съёмки с БВС 2023-2025 гг. с привлечением технологии повысотной съёмки (Глава 3)

5. Комплексный геофизический анализ и построение геолого-геофизической модели Раахе-Ладожской зоны в Северном Приладожье (Глава 4)

Научная новизна. Современная стадия исследований Раахе-Ладожской зоны в Северном Приладожье была инициирована с целью получения достоверных представлений о строении и эволюции геолого-тектонических структур восточной части Фенноскандинавского щита, значительно хуже изученной, чем его западная часть. Новые технологии полевых геофизических исследований, такие как магнитотеллурические измерения с долгопериодными синхронными записями и аэромагнитная съёмка с БВС, позволяют существенно расширить предыдущие представления о комплексном геофизическом, в особенности геоэлектрическом, строении области, полученные первыми исследователями данного региона в 1980-90х годах.

Комплексная интерпретация, выполненная автором, с привлечением базы ретроспективных и новейших данных о геологическом и тектоническом строении региона, петрофизических свойствах горных пород и региональных гравитационном и магнитном аномальных полях, позволила построить трехмерную модель строения Ладожско-Ботнической (Раахе-Ладожской) тектонической зоны и её локальных объектов, уточнить природу Ладожской аномалии и спрогнозировать потенциальные зоны месторождений полезных ископаемых.

Теоретическая и практическая значимость работы Основная теоретическая значимость работы относится к решению фундаментальных задач эволюции Фенноскандинавского щита – изучению шовных зон между архейскими и протерозойскими блоками, отличающихся уникальной сохранностью структур докембрийской тектоники, раскрытию потенциала ассоциированных с ними рудных зон. Новые подходы к металлогеническим исследованиям, основанные на комплексном изучении минеральных систем, представляют весомую практическую значимость для развития современных методов разведочной геофизики. Исследование включает в себя опыт применения геофизического комплекса, способного обеспечить освещение разреза от глубинных корней рудоносных систем до их приповерхностных проявлений. В рамках работы сопоставляются различные алгоритмы обработки и интерпретации данных современных методов геофизики, а также геоинформационных систем при решении задачи комплексного геофизического анализа.

Методология и методы исследования. Методические основы работы базируются на традиционных методах глубинных геоэлектрических исследований – магнитотеллурическом и магнитовариационном зондировании (МТЗ и МВ), а для среднекоровых и приповерхностных – профильных и площадных аэромагнитных исследованиях. Традиционные методы обработки геофизических данных сочетаются с современными подходами к инверсии. Инверсия данных МТЗ осуществляется с применением робастной статистики и совместной оценки импеданса и горизонтального магнитного тензора [Varentsov, 2007], трехмерная – с применением алгоритма ModEM [Kelbert, 2014] на суперкомпьютере «Ломоносов». Для проведения полевых аэромагнитных работ используется активно развивающаяся технология повысотной съёмки с Беспилотными Воздушными Судами (БВС). Двумерная инверсия и трансформации осуществляются в ПО GravMagInv[Чепиго, 2022], трехмерная спектральная и монтажным методом – в ГИС Integro [Мицын, 2018].

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Геоэлектрический разрез профиля Выборг–Суоярви выявляет систему проводящих структур различной морфологии. На среднекоровых глубинах их пологое юго-западное падение согласуется с надвиганием

Свекофеннских комплексов на Карельский кратон; в верхней коре крутопадающие проводящие зоны связаны с разломными и контактовыми зонами Раахе–Ладожской шовной зоны.

2. В области сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена на основании анализа ансамбля геофизических данных выделяется субвертикальная тектонически ослабленная зона, приуроченная к Янисъярвинской разломной зоне, а также структуры юго-западного падения, согласующиеся с надвиговой моделью контакта.

3. Массив Валимяки по данным трехмерного моделирования аэромагнитных данных включает в себя пластообразное тело северо-восточного простирания с центром масс на глубине около 1,5 км, превышающее известные границы массива, и имеющее апофизы, выходящие на поверхность в области известных месторождений титаномагнетитовых руд. Массив предположительно имеет общие корни или представляет единую структуру с выходами пород комплекса на острове Мякисало.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах создания диссертационной работы. Автором лично выполнены полевые измерения со станцией LEMI на профиле Выборг-Суоярви, планирование методики профильной аэромагнитной съёмки над Янисъярвинской зоной. Выполнены лабораторные измерения петрофизических свойств горных пород. Осуществлена обработка данных МТЗ в программе Corrector и аэромагнитных измерений при помощи авторских разработок на языке программирования Python. Проведён литературный анализ и сбор данных по ретроспективным геофизическим и петрофизическим измерениям. Совместно с коллегами выполнена одномерная и двумерная инверсия данных МТЗ в ПО Occam 1D, Rebocc, ГИС Integro. Сформулированы выводы и проведён анализ геофизических моделей, кластерного распределения, сопоставление с геологической интерпретацией.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным количеством наблюдений на высокоточном геофизическом оборудовании, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в тексте диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведённых таблицах и рисунках. Полученные результаты не противоречат данным, представленным в независимых источниках по данной тематике.

Апробация работы. Результаты работы представлены на: 10 международной конференции “Problems of Geocosmos”, Санкт-Петербург, 2014; XII Международной конференции "Новые идеи в науках о Земле", Москва, РГГУ, 8-10 апреля 2015; Ломоносовские чтения - 2016, МГУ им. М.В.

Ломоносова, Россия, 18-27 апреля 2016; Всероссийской конференции с международным участием «Глубинное строение и геодинамика Приладожья», Петрозаводск, Россия, 22-24 мая 2017; IAPSO—IAMAS—IAGA Joint Assembly, Кейптаун, ЮАР, 28 августа - 1 сентября 2017; II Всероссийской научной конференции «Геотектоника и геодинамика сейсмоактивных районов», ИФЗ РАН 22-24 октября 2024; XVII Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле", г. Москва, Россия, 3-4 апреля 2025; Девятой Всероссийской молодежной тектонофизической школе-семинаре «Современная тектонофизика. Методы и результаты», ИФЗ РАН, Россия, 21-24 октября 2025; V Школе-конференции "Гординские чтения", ИФЗ РАН, Россия, 20-21 ноября 2025; IX Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2026. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес», г. Москва, Россия, 31 марта - 4 апреля 2026

Публикации: по теме диссертации опубликовано 17 работ, 7 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация включает 130 страниц текста, 53 рисунка, 3 таблицы. Список литературы насчитывает 76 наименований.

Благодарности. Автор выражает огромнейшую благодарность своему научному руководителю – заведующему лабораторией № 501 ИФЗ РАН Алёшину Игорю Михайловичу за всестороннюю помощь и поддержку. Автор выражает искреннюю признательность и огромную благодарность ведущему научному сотруднику лаборатории 501 ИФЗ РАН Соколовой Елене Юрьевне за многолетнее наставничество и и поддержку на всех этапах диссертационного исследования. Автор также благодарит своих руководителей и преподавателей на геологическом факультете МГУ – Пушкарева Павла Юрьевича, Золотую Людмилу Алексеевну, Куликова Виктора Александровича за помощь в заложении фундамента в будущей диссертационной работе. Отдельная благодарность коллегам геофизикам из МГУ, ИФЗ РАН и ГЦ РАН, участвовавшим совместно с автором в полевых исследованиях.

Также автор выражает самую искреннюю любовь и благодарность своей семье – маме Светлане Львовне, супругу Юрию и сыновьям Алексею и Льву.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, а также отражена практическая значимость работы.

Глава 1. Обзор геолого-геофизической изученности

В главе приведён анализ современного состояния геологической и геофизической изученности зоны сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена в пределах Северного Приладожья (рис.1). Обобщены сведения о геологическом строении региона, его тектоническом положении и рудоносности, а также проанализированы результаты ранее выполненных геофизических исследований. Рассматриваемая территория характеризуется сложной историей эволюции, включающей этапы метаморфизма, магматизма и интенсивной тектонической переработки, что обусловило формирование неоднородной структуры земной коры и существенную изменчивость физических свойств пород.

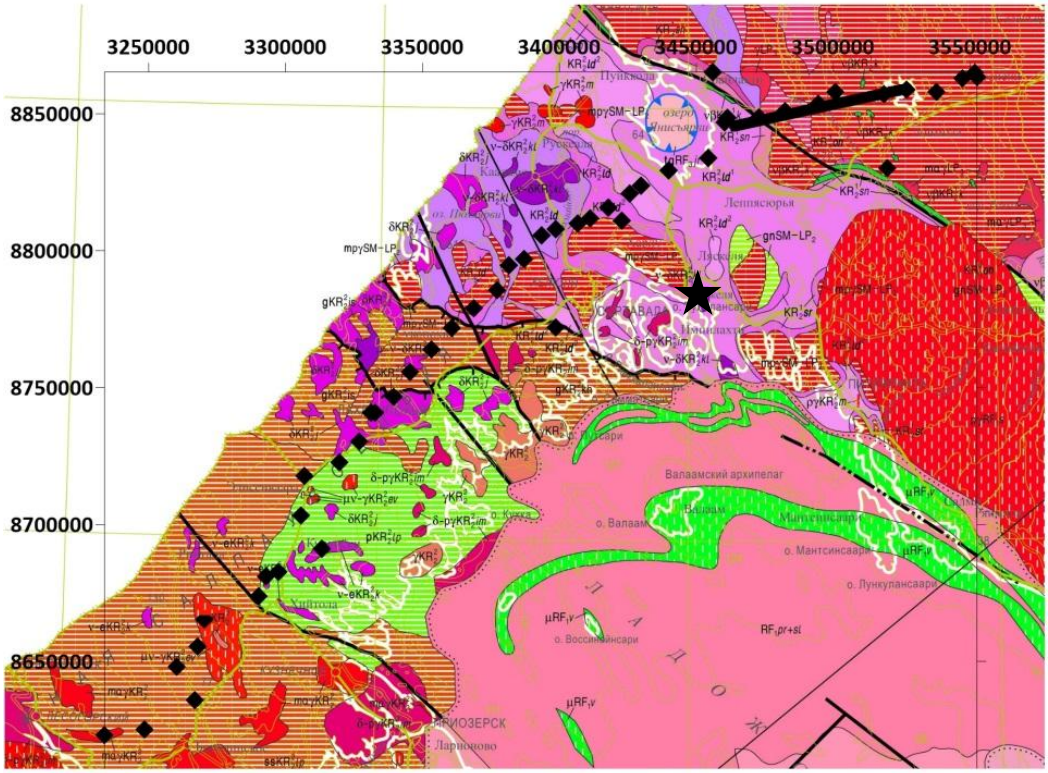

Рисунок 1. Положение пунктов наблюдения (черные ромбы) МТ-МВ зондирований профиля Выборг-Суоярви 2013-2015 гг. на геологической карте масштаба 1:1000000 [под ред. Богданова, 2015]. Черной линией обозначен участок аэромагнитного профилирования, звёздочкой – положение массива Валимяки.

В разделе 1.1 рассмотрены особенности геологического строения района, включая состав, возраст и условия формирования архейских и палеопротерозойских комплексов Карельского кратона и Свекофеннского орогена. Геологическая структура территории сформирована в результате многоэтапных тектоно-метаморфических процессов, сопровождавшихся развитием зон интенсивной переработки и формированием контрастных литологических границ.

В разделе 1.2 проанализированы существующие схемы тектонического районирования, отражающие положение ключевых структурных элементов, включая Раахе–Ладожскую шовную зону и сопряжённые с ней системы разломов. Зона сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена выделяется как область длительной тектонической активности, в пределах которой сочетаются надвиговые и сдвиговые деформации, формирующие зоны повышенной проницаемости и контролирующие современную структурную организацию коры.

В разделе 1.3 обобщены сведения о полезных ископаемых района, включая проявления железистых кварцитов, сульфидной и редкометалльной минерализации. Их пространственное распределение связано с разломными зонами и участками тектономагматической переработки, что указывает на определяющую роль глубинных структур в формировании рудных систем.

В разделе 1.4 дана характеристика объектов детальных исследований. В подразделе 1.4.1 рассмотрена Янисъярвинская зона как крупная разломная структура, отличающаяся повышенной трещиноватостью и электропроводностью; её особенности позволяют рассматривать данную зону как область тектонической переработки и повышенной проницаемости. В подразделе 1.4.2 описан Валимякский комплекс раннеорогенных габброидов, включающий в себя массив Валимяки.

В разделе 1.5 рассмотрены результаты геофизических исследований региона. В подразделе 1.5.1 приведены схемы петрофизического районирования, отражающие пространственную неоднородность физических свойств пород. В подразделе 1.5.2 обобщены данные о магнитной восприимчивости, намагниченности, плотности и электропроводности, вариации которых в данном регионе в том числе обусловлены процессами амфиболизации, графитизации и тектонической переработки. В подразделе 1.5.3 проанализированы результаты гравимагнитных исследований, выявляющие основные региональные аномальные зоны и их связь с геологическим строением. В подразделе 1.5.4 рассмотрены данные сейсмических исследований, характеризующие блоковую структуру коры и наличие зон разуплотнения. В подразделе 1.5.5 обобщены результаты электромагнитных исследований, согласно которым по [Ковтун и др., 1998] Ладожская аномалия электропроводности представляет из себя массивный проводящий блок, имеющий два главных проводящих ядра (рис. 2А), расположенных на расстоянии 80 км друг от друга.

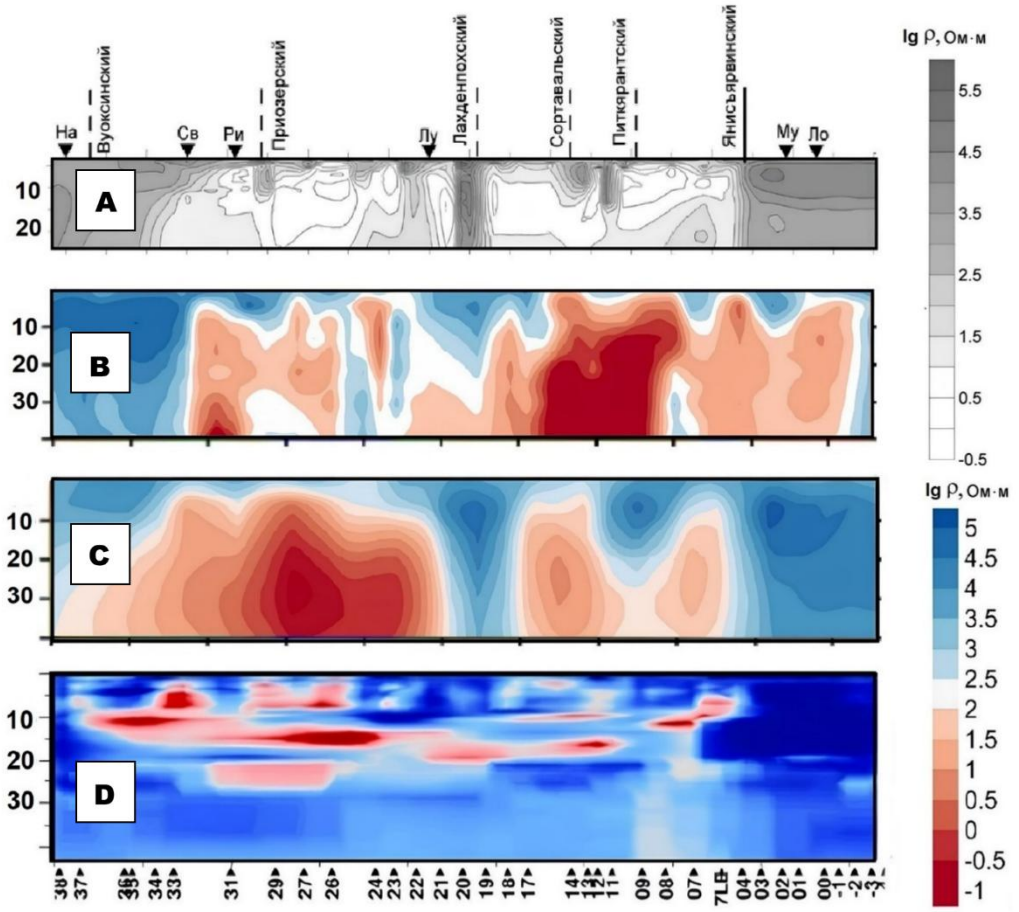

Рисунок 2. Сопоставление различных результатов инверсии AMT и MT/MB данных профиля Выборг-Суоярви. Положение тектонических разломов нанесено в соответствии с [Ковтун, 1998]. A - Квазидвумерная инверсия по результатам ретроспективных AMT/MT зондирований(пункты показаны треугольниками) [Ковтун, 1998]. B - Квазидвумерная инверсия эффективного импеданса по результатам зондирований 2013-2015 гг. C - Трехкомпонентная двумерная сглаживающая инверсия по алгоритму Rebocc [Siripurnvaraporn, 2000]. D - Двумерная детерминантная инверсия по алгоритму 2DInv [Varentsov, 2007].

Выводы к главе 1. Проведённый анализ геолого-геофизической изученности Северного Приладожья показал, что зона сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена представляет собой сложную по строению и истории развития область, сформированную в результате многоэтапной тектоно-метаморфической эволюции. Современные представления о геологическом строении региона отражают сочетание архейских и палеопротерозойских комплексов, преобразованных в условиях интенсивной деформации, метаморфизма и магматизма, что обусловило формирование контрастных литологических границ и зон тектонической переработки.

Тектоническое районирование свидетельствует о ключевой роли Раахе–Ладожской шовной зоны и сопряжённых с ней разломных систем, которые

контролируют структурную организацию коры и выступают в качестве каналов повышенной проницаемости. Размещение полезных ископаемых тесно связано с данными структурами, что подчёркивает их значение в процессах рудогенеза и глубинного перераспределения вещества.

Анализ геофизических исследований показывает, что регион характеризуется сложным распределением физических свойств, обусловленным литологическими различиями и степенью метаморфической переработки. Гравимагнитные и сейсмические данные отражают блоковое строение коры и наличие зон разуплотнения, тогда как электромагнитные исследования выявляют протяжённые проводящие зоны, приуроченные к разломам, а также интерпретируемые как области графитизации. В совокупности это указывает на существование коровых зон тектонической проницаемости, играющих определяющую роль в формировании геофизических аномалий и глубинной структуры региона.

Глава 2. Региональная геоэлектрическая модель вдоль профиля Выборг–Суоярви.

В главе рассмотрены методика проведения, обработка и интерпретация данных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований, выполненных вдоль профиля Выборг–Суоярви, и построена региональная геоэлектрическая модель земной коры. Особое внимание уделено повышению достоверности данных и комплексному использованию различных передаточных функций для выявления глубинных проводящих структур.

В разделе 2.1 описаны условия проведения полевых работ в 2013–2015 гг., применяемая аппаратура и конфигурация сети наблюдений. Эксперимент включал в себя 43 суточных (рядовых) зондирования с шагом 2-8 км станциями MTU «Phoenix Geophysics» и 9 трёхсуточных (глубинных) станциями LEMI с шагом 20-25 км.

В разделе 2.2 рассмотрены методы обработки данных MT/MB зондирований, в результате которых получен многокомпонентный ансамбль передаточных функций, включающий импеданс, типпер и магнитный тензор. Использование широкого набора параметров позволило более полно охарактеризовать геоэлектрическую структуру среды, включая проявления анизотропии и неоднородностей.

В разделе 2.3 выполнено сопоставление результатов обработки с применением удалённых баз, что позволило снизить влияние помех и повысить устойчивость оценок передаточных функций. Это обеспечило более высокое качество исходных данных для последующей интерпретации.

В разделе 2.4 проведён анализ материалов зондирований, включая карты инвариантов, полярные диаграммы и индукционные векторы. По их результатам произведена оценка размерности среды, выделены зоны аномальной проводимости, определены их пространственная ориентировка и характер

погружения, а также прослежена их связь с известными тектоническими структурами.

В разделе 2.5 рассмотрены методика и результаты инверсии данных. Применение сглаживающих одномерных (рис. 2B) и двумерных (рис. 2C) подходов позволило получить предварительные представления о распределении проводимости и выделить основные проводящие горизонты. Для дальнейшего комплексного анализа была выбрана модель, полученная в рамках инверсии детерминанта эффективного импеданса (рис. 2D), как правило, обеспечивающего стабильное (в меньшей степени зависящее от 3D искажений) построение достаточно разрешенного разреза глубинной электропроводности в пределах одного профиля. Получена модель, в которой выделяются наклонные проводящие зоны, прослеживаемые до глубин порядка 10 км и интерпретируемые как элементы коровой разломной системы, связанные с процессами графитизации и тектонической переработки.

Выводы к главе 2. Результаты магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований вдоль профиля Выборг–Суоярви позволили получить детализированное представление о геоэлектрическом строении земной коры в зоне сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена. Применение современной аппаратуры и оптимальной конфигурации наблюдений обеспечило получение данных, достаточных для анализа глубинных неоднородностей.

Комплексная обработка с использованием полного набора передаточных функций, а также привлечение удалённых баз, позволила существенно повысить качество исходной информации и устойчивость интерпретации. Анализ инвариантов, полярных диаграмм и индукционных векторов выявил наличие зон аномальной проводимости и позволил определить их пространственную ориентировку и взаимосвязь с тектоническими структурами.

Результаты одномерных, двумерных и трёхмерных инверсий согласованно отражают наличие системы среднекоровых проводящих объектов с общим пологим юго-западным падением и наклонных проводящих зон, прослеживаемых до глубин порядка 10 км. Их геометрия и пространственная организация соответствуют разломным структурам и интерпретируются как проявление коровой зоны тектонической проницаемости, связанной с процессами графитизации и метаморфогенно-деформационной переработки пород, что подтверждает первое положение, выносимое на защиту.

Глава 3. Модели локальных структур земной коры в зоне контакта с Карельским кратоном.

В главе представлены результаты детальных аэромагнитных исследований, выполненных с использованием беспилотных носителей, и построены модели локальных структур земной коры: контакта Карельского

кратона и Свекофеннского орогена (Янисъярвинской зоны) и массива Валимяки (рис.1).

В разделе 3.1 изложена методика проведения аэромагнитной съёмки с квантовым аэромагнитометром GeoShark на носителе Геоскан-401, особенности полевых работ с беспилотными носителями и этапы обработки данных. Использование повысотной съёмки с использованием базовых станций ГНСС и решение позиционной задачи в дифференциальном режиме обеспечило возможность вычисления вертикального градиента магнитного поля по данным повысотной съёмки, что позволило более надёжно определять разделять глубину источников аномалий.

В разделе 3.2 приведены результаты аэромагнитной съёмки вдоль участка профиля Выборг–Суоярви в пределах Янисъярвинской зоны. В магнитном поле (рис. 3) выделяются линейная региональная составляющая и локальные аномалии, приуроченные к контактовым и разломным зонам, что согласуется с геоэлектрическими результатами. Наиболее чёткие положительные аномалии приурочены к субвертикальным контактам между подразделениями свиты Наатсельскя($Pt_{1-2}nt_{1-2}$), и предположительно связаны с амфиболизацией сланцев.

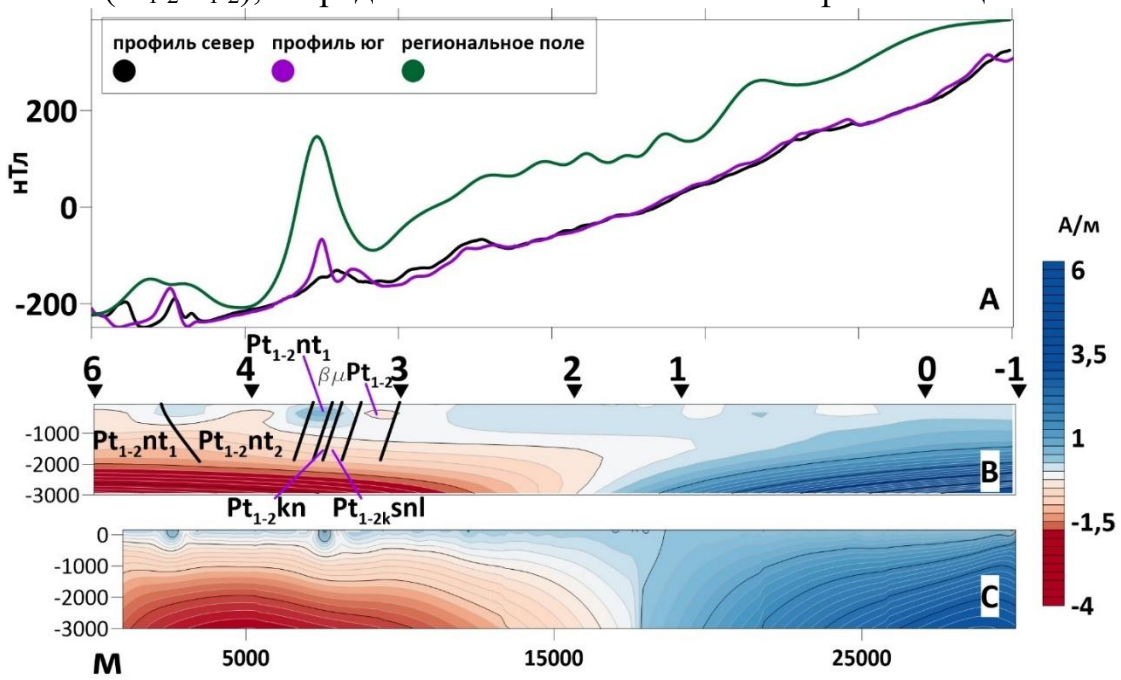

Рисунок 3. А – кривые аномального магнитного поля по данным региональной съёмки масштаба 1:200000 и аэромагнитной профильной съёмки с БВС; В – трехмерная спектральная инверсия регионального аномального магнитного поля (GIS Integro, [Мицын, 2018]) с наложенными геологическими границами по [Геологическая…, 1962; Ладожская…, 2020]; С – двумерная инверсия по данным аэромагнитной съёмки с БВС (ПО GravMagInv2D, [Чепиго, 2022]).

В разделе 3.3 рассмотрены результаты площадной повысотной съёмки массива Вялимяки и острова Мякисало (рис. 4). По полученным картам аномального магнитного поля выделяются локализации магнитных источников

как внутри известных границ комплекса, так и за его пределами. В северо-восточной части острова Мякисало обнаруживается вытянутая аномальная зона, находящаяся в одном направлении простирания с аномальной зоной в континентальной части. Использование вертикального градиента, построенного по данным повысотной съёмки, позволило разделить глубинность источников и выделить отдельные элементы структуры.

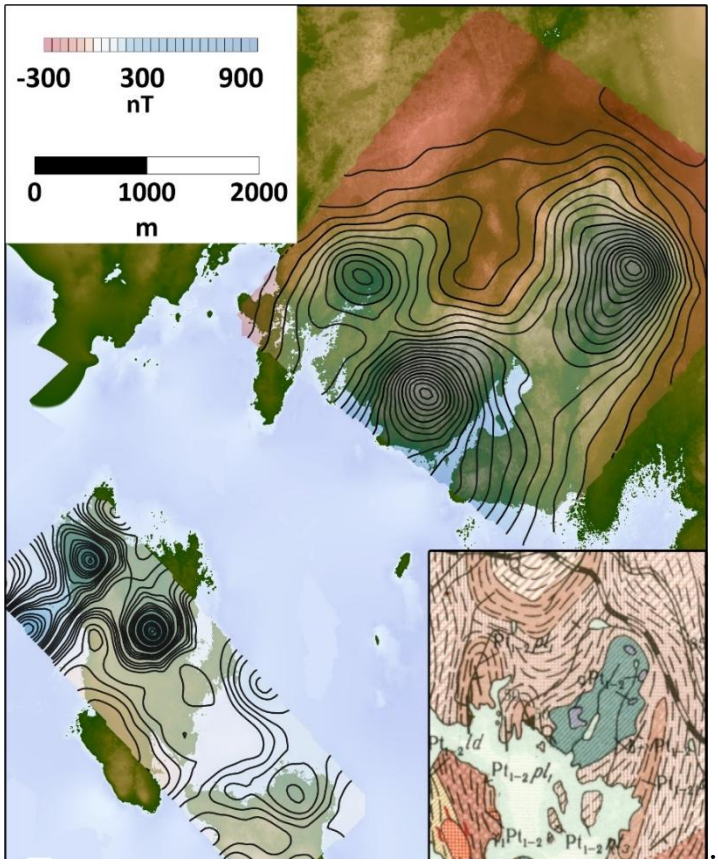

Рисунок 4. Цифровая модель рельефа района массива Валимяки с наложенными изолиниями аномального магнитного поля по данным аэромагнитной съёмки с БПЛА, выполненной на высотах полёта 340 м над массивом Валимяки и 200 м над островом Мякисало.

По результатам двухэтапной трёхмерной инверсии – сначала спектральной, для составления стартовой модели, а после монтажным методом построена модель распределения намагниченности, в которой выделено крупное глубинное тело с высокой намагниченностью и система апофиз, интерпретируемых как ответвления от основного магматического источника (рис. 5).

Выводы к главе 3. Проведённые аэромагнитные исследования с использованием беспилотных воздушных судов позволили получить высокодетальные данные о структуре магнитного поля и уточнить строение локальных объектов в зоне сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена. Применение маловысотной и повысотной съёмки обеспечило значительное повышение разрешающей способности метода и позволило

оценить вертикальные градиенты магнитного поля, что существенно расширило возможности интерпретации.

Результаты съёмки в пределах Янисъярвинской зоны выявили локальные аномалии, приуроченные к контактовым и разломным структурам, что согласуется с геоэлектрическими данными и подтверждает защищаемое положение 2.

Трёхмерная инверсия магнитного поля массива Валимяки показала наличие крупного глубинного тела с высокой намагниченностью, а также системы субвертикальных апофиз, связанных с ним. Эти результаты свидетельствуют о глубинной природе источников магнитных аномалий и их связи с магматическими и тектоническими процессами, формирующими структуру коры в пределах исследуемой территории, что подтверждает третье защищаемое положение.

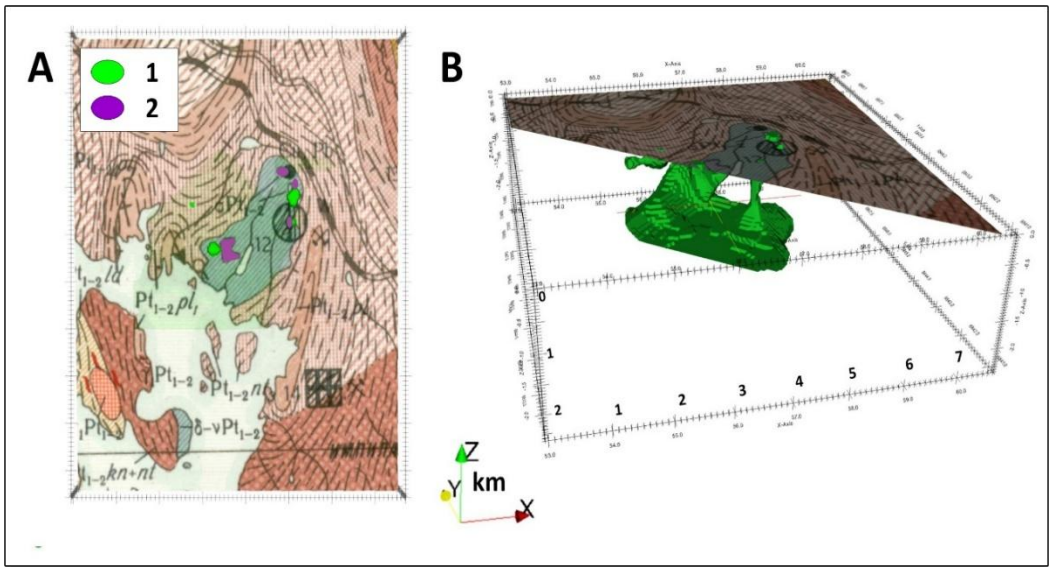

Рисунок 5. Сопоставление фрагмента геологической карты с очертаниями массива Валимяки и выходами магнитных пород комплекса и результатами трехмерной инверсии монтажным методом в реализации ГИС Integro [Мицын, 2021]: (A) — в плане, (B) — в разрезе. 1 — результат инверсии; 2 — известные рудоносные выходы пироксенитов на дневную поверхность

Глава 4. Комплексный анализ геолого-геофизических данных.

В главе на основании описанных в предыдущих главах результатах с привлечением других исследований построена согласованная модель строения земной коры вдоль профиля Выборг–Суоярви и уточнена структура Янисъярвинской зоны.

В разделе 4.1 проведён кластерный анализ результатов регионального плотностного, магнитного и геоэлектрического моделирования, позволивший выделить группы параметров, соответствующие различным типам геологических сред. Сопоставление петрофизических характеристик выявило устойчивые закономерности их распределения для повышения обоснованности интерпретации.

В разделе 4.2 представлена интегральная геолого-геофизическая модель разреза вдоль профиля Выборг–Суоярви (рис. 6). В модели выделяется система наклонных проводящих зон, пространственно сопряжённых с областями отрицательной эффективной намагниченности, формирующих протяжённую коровую зону тектонической проницаемости. Характер их залегания и пространственная согласованность с разломными структурами позволяют связать их формирование с процессами метаморфогенно-деформационной переработки и графитизации.

В разделе 4.3 выполнено сопоставление геофизических разрезов Янисъярвинской зоны для выделения блоковых и надвиговых структур(рис. 7). Для этой задачи отобраны параметры и методы, наиболее чувствительные к вертикальным неоднородностям: двумерная инверсия комплексных типперов Wz в продольной поляризации магнитотеллурического поля, спектральные амплитуды микросейсмов полученные сотрудниками лаборатории 703 ИФЗ РАН в 2025 г. методом микросейсмического зондирования (ММЗ) [Жостков, 2015]. Для дополнительной оценки плотности магнитных источников использованы линеаменты распределения избыточной намагниченности [Коснырева, 2018]. Результаты комплексного анализа представлены на рисунке 7, условные обозначения: 1 – блок повышенной трещиноватости, выделенный в соответствии с идеями [Свириденко и др., 2017] по данным ММЗ и МТЗ; 2 – зона повышенной вертикальной проводимости 10-100 Ом*м с локальными положительными магнитными аномалиями в верней части разреза; 3 - метаосадки и метавулканиты с проводящим слоем, обогащенным графитом; 4 – границы надвиговых структур свекофеннского орогена (ладожской серии); 5 – границы слоя в породах Карельского кратона, выделенного по аномальным показателям амплитуд микросейсмов и пониженным (порядка 10^3-10^4 Ом*м) на фоне окружающих структур значениям сопротивления.

Данный результат позволил уточнить границы надвиговой структуры, выделенной ранее по геоэлектрическому и магнитному профилированию, а также положение в верхней части разреза блока трещиноватости, приуроченного к Янисъярвинской зоне, прослеживающейся на больших глубинах по результатам предыдущих сейсмических исследований. Такая структура может рассматриваться как глубинный канал, контролирующий перераспределение вещества и развитие тектоно-метаморфических процессов, а также влияющий на современную геодинамическую активность региона.

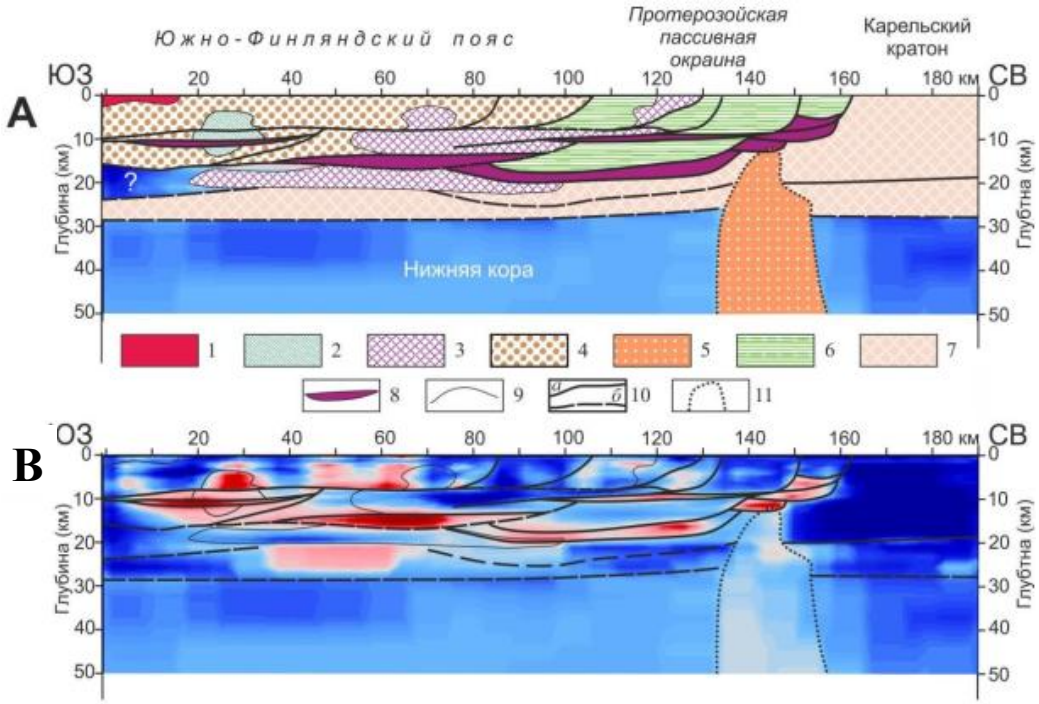

Рисунок 6. А – Результаты совместной геологической интерпретации геофизических данных Северного Приладожья по линии профиля Выборг-Суоярви [Ладожская…, 2020]. 1 – граниты рапакиви Выборгского массива; 2-3 – интрузивные тела: 2 – сульфидоносные габброиды (плотность – 2.83, повышенная электропроводность), 3 – щелочные ультраосновные породы (плотность – 2.9, повышенное сопротивление); 4 – гранулиты (плотность – 2.75-2.8, повышенная электропроводность графитоносных прослоев); 5 – область пониженного сопротивления в пограничной зоне между архейской корой Карельского кратона и палеопротерозойскими комплексами Свекофеннского орогена и Южно-Финляндского гранулитового пояса, предположительно коррелируется с областью гомогенизированной (в терминах сейсмических отражений и структурных особенностей) коры, занимающей аналогичное структурное положение; 6 – метаосадки и метавулканиты пассивной окраины с проводящим слоем, обогащенным графитом, в основании; 7 – архейский гранито-гнейсовый комплекс Карельского кратона; 8 – зоны и прослои высокой электропроводности – прослои и линзы сланцев и гранулитов, обогащенных графитом, и зоны разломов, насыщенные графитом, 9 – границы интрузивных тел, 10 – разломы, преимущественно надвигового типа, проведенные уверенно (а), предполагаемые (б); 11 – граница области гомогенизированной коры. В – структурные линии интерпретации на геоэлектрическом разрезе детерминантной двумерной инверсии профиля Выборг-Суоярви

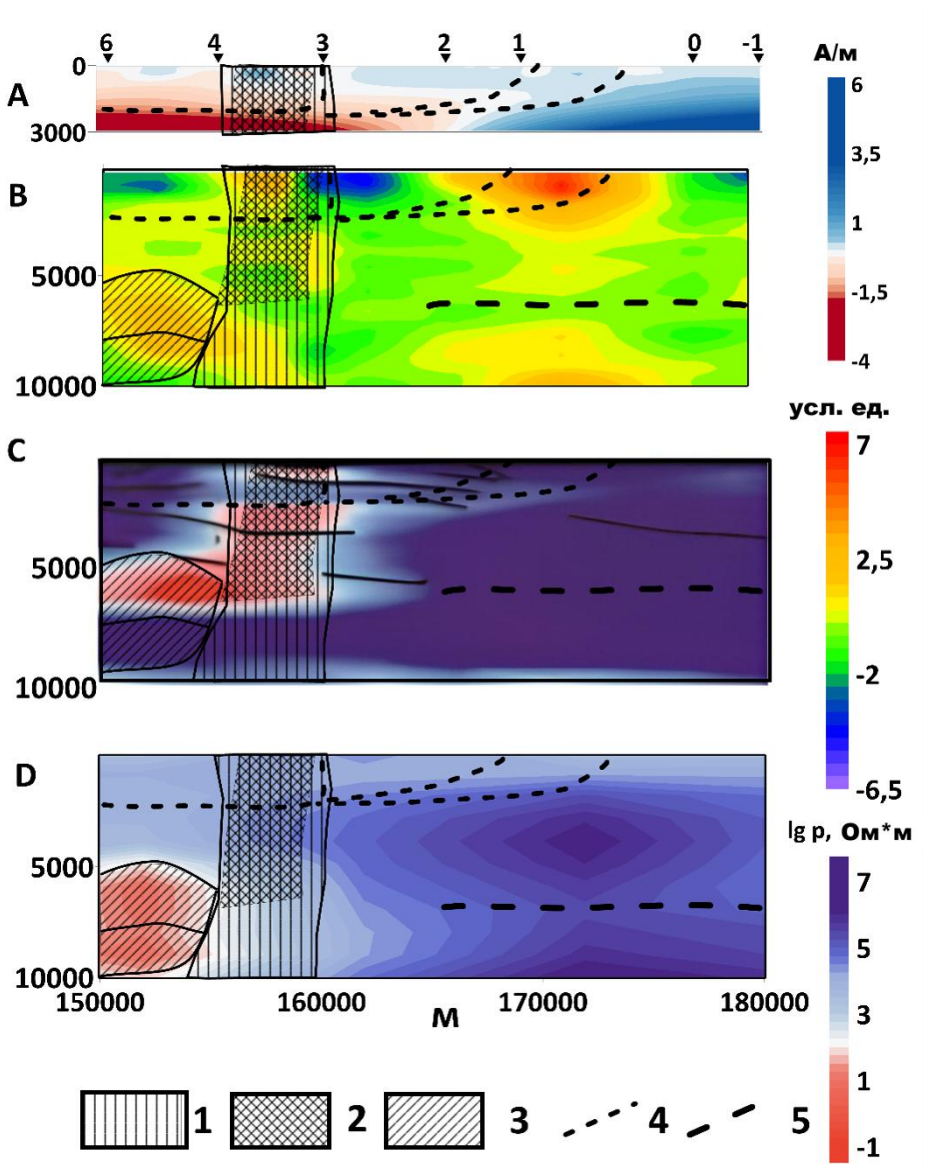

Рисунок 7. Комплексный анализ геофизических данных над Янисъярвинской зоной: А – трехмерная инверсия регионального аномального магнитного поля треугольниками показаны пункты MT/MB зондирования; В – предварительный глубинный разрез спектральных амплитуд микросейсмов результат профильной съемки методом микросейсмического зондирования (ММЗ[Жостков и др.,2015] (Преснов, Белобородов лаб.703 ИФЗ РАН); С – геоэлектрический разрез по результатам двумерной инверсии комплексных типперов Wz (продольная поляризации магнитотеллурического поля) D – геолектрический разрез детерминантной двумерной инверсии 2DINV

Выводы к главе 4. Комплексный анализ геолого-геофизических данных позволил интегрировать результаты различных методов и построить согласованную модель строения земной коры вдоль профиля Выборг–Суоярви. Применение кластерного анализа обеспечило выделение классов геологических сред на основе совокупности петрофизических характеристик, что повысило обоснованность интерпретации.

В средне- и нижнекоровых уровнях изученные структуры, как правило, характеризуются отчетливым юго-западным падением, наиболее вероятно, приуроченные к контактовым надвиговым зонам с графитсодержащими супракрустальными поверхностями палеопротерозойских свекофеннид в процессе их срастания на юго-западной границе Карельского кратона в конце Палеопротерозоя.

В верхней части разреза они имеют большую крутизну падения и приурочены к основным разломам, выявленным на поверхности, в том числе неотектоническим, которые граничат с Раахе-Ладожской тектонической зоной. В этих областях возможно также присутствие минерализованной метеорной воды, обеспечивающей добавочную компоненту ионной проводимости. В ЮЗ части разреза на глубинах 15–25 км наблюдается существенное увеличение суммарной мощности (интегральной проводимости) проводящих структур, по-видимому, формирующих обнаруженную в ходе пионерских зондирований в регионе Приладожья низкочастотную магнитовариационную Ладожскую аномалию [Рокитянский и др., 1981].

Детальная модель Янисъярвинской зоны подтверждает её роль как ключевого элемента данной системы, представляющего собой глубинный канал, контролирующий перераспределение вещества, развитие тектоно-метаморфических процессов и формирование геофизических аномалий. В совокупности полученные результаты формируют целостное представление о строении и эволюции зоны сочленения Карельского кратона и Свекофеннского орогена и позволяют рассматривать её как крупную коровую структуру, определяющую геодинамическое развитие региона.

Результаты данной главы позволили дополнительно подтвердить и обосновать защищаемые положения 1 и 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача уточнения глубинного и приповерхностного строения Раахе–Ладожской шовной зоны в пределах Северного Приладожья на основе комплексной интерпретации данных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в сочетании с результатами аэромагнитной съёмки с БВС и комплексным анализом с привлечением данных других исследований.

Выполнен сбор, систематизация и критический анализ геолого-геофизических и петрофизических данных по региону, обеспечившие обоснованность постановки инверсии и последующей геологической интерпретации. Построены двумерные и трёхмерные геоэлектрические модели вдоль профиля Выборг–Суоярви, а также трёхмерные магнитные модели локальных структур.

Сравнительный анализ обработки и двумерной инверсии различных ансамблей данных при помощи разных алгоритмов позволил сделать выводы об эффективности их использования при решении поставленных задач. Наилучшее разрешение показала модель по двумерной инверсии детерминанта эффективного импеданса в программе 2DInv. Опыт трехмерной инверсии внес практический вклад в разработку методики моделирования при помощи суперкомпьютеров. Для дальнейшего трехмерного моделирования области Ладожской аномалии необходимо привлечение большего количества распределенных по площади данных.

Установлено, что Ладожская аномалия электропроводности представляет собой не единое проводящее тело, а систему пространственно разобщённых проводящих объектов различной морфологии и генезиса. Показано, что на среднекоровых глубинах проводящие структуры характеризуются согласованным юго-западным падением и приурочены к зонам тектонического контакта Свекофеннских комплексов и Карельского кратона, сформированным в условиях палеопротерозойской коллизии.

Выявлена вертикальная неоднородность проводящих структур: в верхней части разреза они локализуются в пределах разломных зон, включая неотектонические нарушения, и характеризуются более крутыми углами падения. Установленная геометрия проводников свидетельствует о многостадийной тектонической эволюции шовной зоны и унаследованном характере её деформаций.

На основе сопоставления результатов магнитного и геоэлектрического моделирования установлена пространственная корреляция локальных положительных магнитных аномалий с зонами повышенной электропроводности. Данные зоны интерпретированы как области развития графитсодержащих и сульфидсодержащих пород, контролируемые разломно-контактными структурами. Магнитная составляющая наиболее вероятно обосновывается графитизацией сланцев соанлахтинской свиты и метаморфическими процессами в контактовых зонах пород ладожской серии. Уточнено положение надвиговых элементов и выделены зоны повышенной трещиноватости, потенциально являющиеся каналами флюидной миграции.

По результатам трёхмерной инверсии повысотных аэромагнитных данных, построена объемная модель массива Валимяки. Установлено наличие пластообразного тела высокой намагниченности с центром на глубине порядка 1.5 км, осложнённого системой субвертикальных каналов, приуроченных к участкам известной рудной минерализации. Показано, что магнитные структуры комплекса выходят за пределы картируемого массива и вероятно формируют единую глубинную систему, включая проявления на острове Мякисало.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные результаты рекомендованы к использованию при составлении комплексных геолого-геофизических моделей региона. Глубинные и среднеглубинные исследования Раахе-Ладожской зоны могут стать базой для построения моделей минеральных систем, связанных со свекофеннским тектономагматическим циклом.

Модель магнитного строения массива Валимяки открывает новые перспективы для разведывательного потенциала Валимякского комплекса. В силу того, что месторождение было закрыто в середине 20 века на основании данных лишь о приповерхностном строении месторождения, объёмная модель массива позволяет определить возможные точки выхода рудосодержащих каналов от общего пластообразного источника на небольшие глубины, где возможна их оценка и разработка.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Дальнейшие перспективы разработки темы связаны, в первую очередь, с расширением области построения модели Раахе-Ладожской зоны в пределах Северного Приладожья, создание согласованных моделей с исследованиями за его границами. Создание более широкой и плотной площадной сети магнитотеллурических измерений позволит построить разрешённые трёхмерные модели.

Продолжение аэромагнитных исследований зоны контакта Карельского кратона и Свекофеннского орогена к зоне Мейери и переход от профильных к площадным измерениям позволит выделить контактовые зоны и прослои пород высокой намагниченности на протяжении всей области сочленения, что откроет новые перспективы для геологических и металлогенических исследований.

В области Валимякского комплекса необходимо проведение водных магнитометрических работ, которые позволят составить полное представление о структуре аномального магнитного поля. Полученная по этим результатам модель магнитного строения массива Валимяки потребует уточнения комплексом геофизических методов, в первую очередь аудио магнитотеллурических зондирований (АМТЗ). Построение согласованной геолого-геофизической модели позволит проследить корни рудной системы, выявить потенциальные области добычи полиметаллических руд.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Соколова Е. Ю., Голубцова Н. С., Ковтун А. А., Куликов В. А., Лозовский И. Н., Пушкарев П. Ю., Рокитянский И. И., **Таран Я. В**., Яковлев А. Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. — 2016. — № 1. — С. 48–64.
2. **Таран Я. В**., Алёшин И. М., Матвеев М. А., Мокров Д. К., Морозов Ю. А., Передерин Ф. В., Розенберг Н. К., Холодков К. И. Предварительные результаты полевых геолого-геофизических исследований массива Вялимяки (Северное Приладожье // Геофизические процессы и биосфера. — 2025. — Т. 24, № 1. — С. 63–73.
3. Алёшин И. М., Соловьёв А. А., Холодков К. И., Передерин Ф. В., **Таран Я. В.** Вертикальный градиент геомагнитного поля по результатам повысотной аэромагнитной съемки // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2025. — Т. 520, № 1. — С. 124–128
4. **Taran Y. V**., Aleshin I. M. Petrophysical properties of rocks of the northern ladoga // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Vol. 25. — P. ES4003
5. **Taran Y. V**., Aleshin I. M., Bolshakov E. M., Sokolova E. Y., Tikhotskiy S. A UAV aeromagnetic survey of the Valimyaki complex (Northern Ladoga area): First estimates of the buried intrusion structure // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — no. 6. — P. ES6017
6. **Taran Y. V**., Aleshin I. M., Aleshin M. I., Beloborodov D. E., Koryagin V. N., Mokrov D. K., Perederin F. V., Presnov D. A., Rosenberg N. K., Sidorov R. V., Sokolova E. Yu., Startseva L. Iu., Kholodkov K. I., Philipovich A. V. A New Stage of Integrated Geophysical Investigations Along the Vyborg–Suojärvi Profile (Northern Ladoga Region) // Russian Journal of Earth Sciences — 2026 — no. 26 — P. ES4001
7. Алёшин И.М., Соловьев А.А., **Таран Я.В.** Повысотная аэромагнитная съемка для in situ-измерений вертикального градиента магнитного поля // Геофизические процессы и биосфера. —2026. — Т. 25. № 3. — С. 69-77.

Подписано в печать 19.11.2026 г.
Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.
Тираж 100 шт. Заказ № _____
Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88