

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ФУНДАМЕНТА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

© 2020 г. В. А. Куликов^{1, *}, Е. Ю. Соколова^{2, 3, **}, А. П. Ионичева^{1, ***},
П. Ю. Пушкарев^{1, ****}, А. Г. Яковлев¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ), г. Москва, Россия

*E-mail: vic@nw-geophysics.ru

**E-mail: sokol_l@mail.ru

***E-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com

****E-mail: pavel_pushkarev@list.ru

Поступила в редакцию 07.06.2019 г.

После доработки 25.01.2020 г.

Принята к публикации 23.04.2020 г.

В статье представлены результаты магнитотеллурических зондирований в юго-восточном Приладожье, проведенных в 2018–2019 гг. с целью изучения глубинного геоэлектрического строения фундамента Восточно-Европейской платформы в области сочленения Русской плиты и Фенноскандинавского щита. Обсуждены материалы помехоподавляющей обработки наблюдений вдоль 180-км профиля Тихвин–Винницы и инвариантного анализа получаемых магнитотеллурических и магнитовариационных передаточных операторов. С помощью двумерной инверсии по линии профиля построена геоэлектрическая модель земной коры до глубин 50 км, в которой ярко проявились структуры ЮВ сегмента Ладужской аномалии коровой электропроводности, приуроченной к протяженной Ладого-Ботнической тектонической зоне на границе AR и PR доменов щита. Выявлены принципиальные черты сходства новой 2D-модели Ладужской аномалии с аналогичной моделью, построенной ранее для профиля Выборг–Суоярви (северное побережье Ладужского озера): генеральное падение в юго-западном направлении проводящих структур коры и существенное увеличение их интегральной проводимости на глубинах 15–20 км в пределах южных участков профилей. Дана предварительная геологическая трактовка построенного разреза сопротивлений по линии Тихвин–Винницы.

Ключевые слова: юго-восток Фенноскандинавского щита, Приладожье, магнитотеллурические зондирования, геоэлектрическое строение, помехоподавляющая обработка наблюдений.

DOI: 10.31857/S0002333720050051

ВВЕДЕНИЕ

Теоретический и практический интерес к изучению глубинного строения щитов древних платформ с помощью геоэлектрических методов во многом обусловлен широким распространением в их коре хорошо проводящих графит- и сульфидсодержащих комплексов горных пород. Уверенно выделяемые по интенсивным индуцированным аномалиям электромагнитного поля, эти объекты служат яркими маркерами уникально сохранившихся докембрийских структур (вулканогенно-осадочных и гранулитовых поясов, разломов) и обычно генетически и пространственно ассоциированы с важными минерагеническими зонами [Ковтун, 1989; Naganjaneyulu, Santos, 2011; Weck-

mann, 2012; Жамалетдинов, Кулик, 2012; Yin et al., 2014; Минц и др., 2018; Zhamaletdinov et al., 2019; Kolesnikov et al., 2019; и др.].

Подобные исследования в пределах Фенноскандинавского (Балтийского) щита Восточно-Европейской платформы (ВЕП) имеют давнюю историю [Лазарева, 1967; Рокитянский и др., 1981; Hjelt, 1984; Rajunpaa, 1987; Ковтун, 1989; Korja et al., 2002]. Одна из крупнейших на территории ВЕП, Ладужская коровая аномалия электропроводности (ЛА), приуроченная к Ладого-Ботнической шовной зоне, сочленяющей Карельский (архейский) и Свекофенский (палеопротерозойский) геоблоки щита (рис. 1), была открыта благодаря магнитовариационным (МВ) зонди-

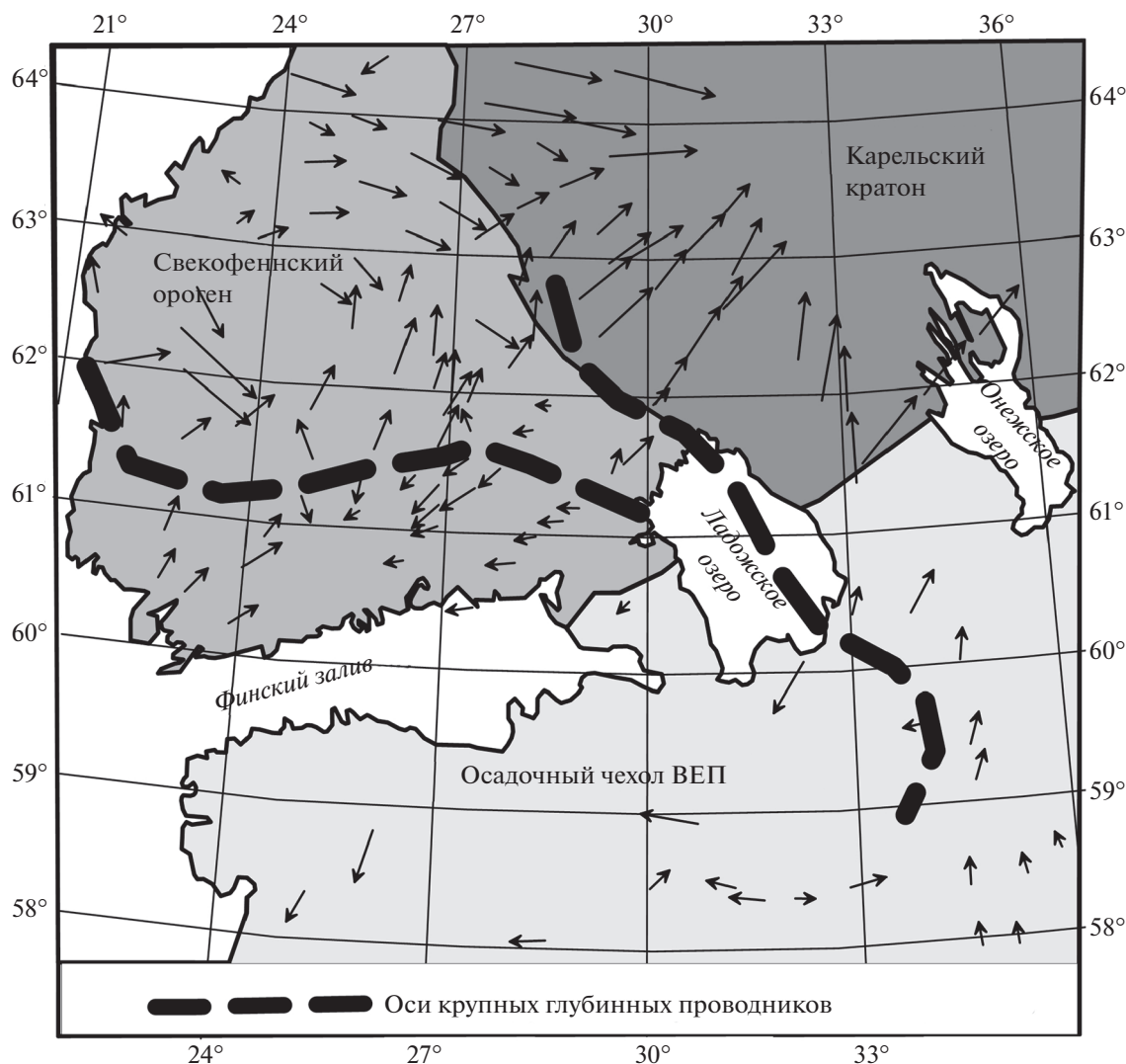


Рис. 1. Действительные вектора индукции для периодов 600–1800 с (в конвенции Визе, “от проводника”) из сводной коллекции [Wibranes, 1999], обобщающей материалы площадных магнитовариационных исследований 80–90-х годов на территориях Южной Финляндии и Северо-Востока России [Рокитянский и др., 1981; Rajupraa, 1987]. Пунктирными линиями показаны оси наиболее крупных глубинных проводников ЮВ Фенноскандинавского щита (в соответствии с квазитрехмерной моделью электропроводности Фенноскандинавского щита SMAP по [Korja et al., 2002]).

рованиям в конце 70-х годов прошлого века [Рокитянский и др., 1981].

Представления о структуре электропроводности ЛА неуклонно совершенствовались: на ранних этапах — геоэлектриками Ленинградской школы [Васин, 1988; Ковтун и др., 1998; 2011; и др.], а в последние годы — главным образом, благодаря соединению усилий и разностороннего опыта геологов и геофизиков из исследовательских центров Санкт-Петербурга, Москвы, Петрозаводска и Киева, объединившихся в Рабочую группу ЛАДОГА. В рамках этого проекта был впервые осуществлен профильный эксперимент синхронных магнитовариационных и магнитотеллурических зондирований в области существенной двумерности ЛА —

Северном Приладожье [Соколова и др., 2016]. Его результаты дали весомые основания для прояснения природы аномалии и новых геотектонических построений [Минц и др., 2018].

В то же время уже по результатам обобщения материалов ранних этапов изучения ЛА [Рокитянский и др., 1981; Korja et al., 2002] высказывалось предположение, что на юго-востоке области проводники ЛА имеют более сложную, отличающуюся от двумерной, конфигурацию (рис. 1). Ее особенности стоило связывать со спецификой структурно-вещественных комплексов докембрийского фундамента в ЮВ Приладожье. Представления о строении фундамента ВЕП в ЮВ Приладожье, частично перекрытого-осадочным

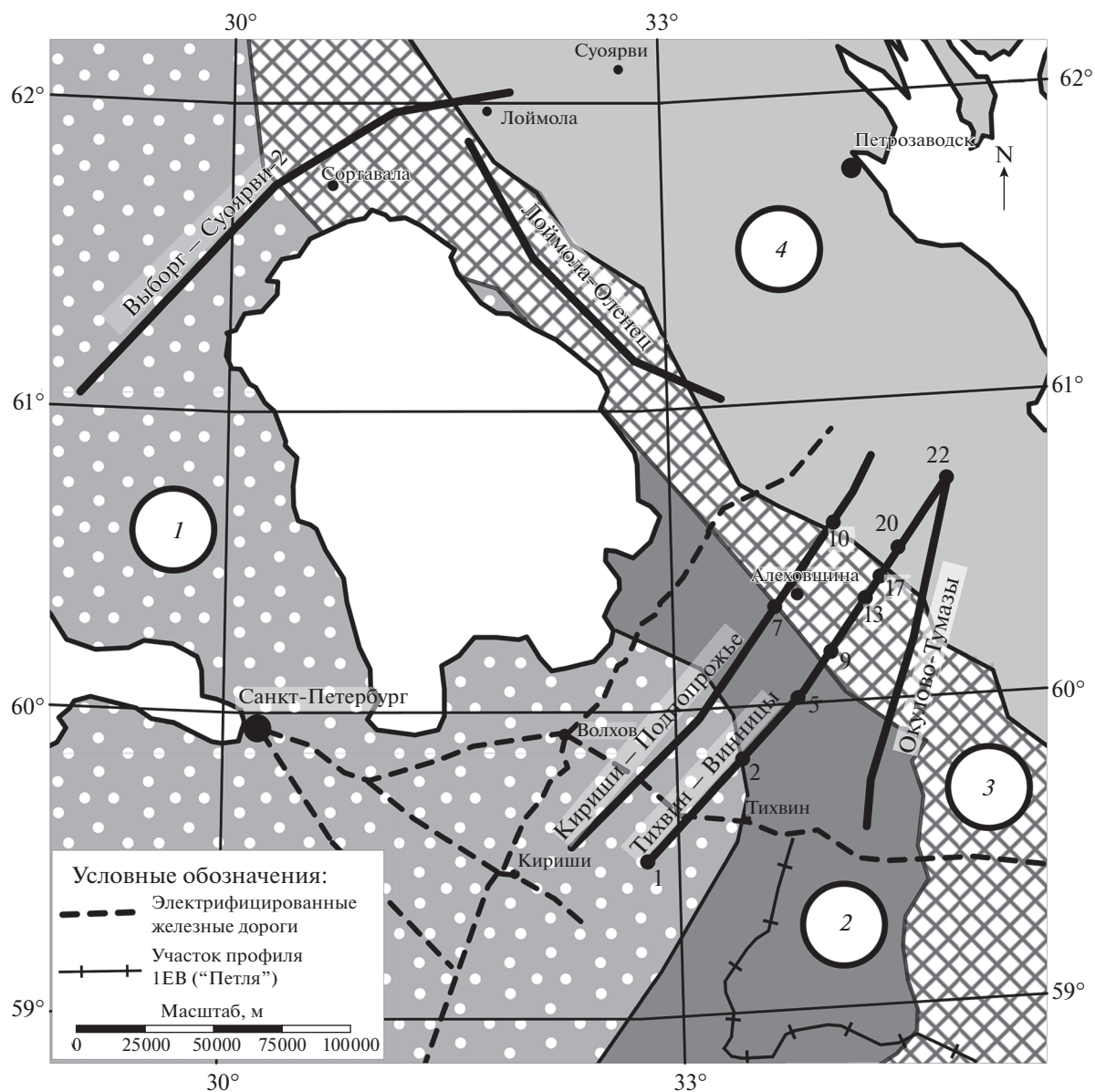


Рис. 2. Расположение профилей синхронных широкополосных и глубинных МТ/МВ зондирования, выполненных рабочей группой ЛАДОГА в период с 2013 по 2019 гг., на фоне геологической карты (по работе [Минц и др., 2010]). 1, 2 – Южно-Финляндский гранулит-гнейсовый пояс (1 – гранулит-гнейсы; 2 – мафитовые гранулиты); 3 – Ладожско-Ботническая зона; 4 – Карельский блок.

чехлом Русской плиты, были получены в работе [Минц и др., 2010], главным образом, по результатам комплексных геофизических работ на геотраверсе 1-ЕВ, данным немногочисленных параметрических скважин, а также – результатам анализа карт потенциальных геофизических полей. Было показано, что в пределах ЮВ Приладожья ключевую роль играют структуры, маркирующие сочленение Карельского кратона и Свекофеннского аккреционного орогена. Как и в Северном Приладожье – это простирающийся с СЗ на ЮВ Ладого-Ботнический пояс (в иной терминологии

Раахе-Ладожская сутура, далее РЛС) и Южно-Финляндский гранулит-гнейсовый пояс [Минц и др., 2018] (рис. 2). Имеющая ширину от 20 до 50 км РЛС сложена в различной степени метаморфизованными раннепротерозойскими вулканогенно-осадочными комплексами шельфа и континентального склона подвергшейся рифтогенезу пассивной окраины Свекофеннского океана. В этой зоне сосредоточены известные месторождения медных, никелевых, полиметаллических и других руд.

Южно-Финляндский гранулитогнейсовый пояс протягивается вдоль северного побережья Финского залива, далее надвинут в направлении с ЮЗ на СВ на структуры РЛС в Северном Приладожье и, как предполагается, протягивается к Южному Приладожью, где разворачивается в направлении оз. Ильмень и города Старая Русса. На южном берегу Ладожского озера также известны структуры, связанные с рифейской активизацией и представленные восточным замыканием Ладожского авлакогена — Пашским грабеном [Stepanov et al., 2016].

По результатам магнитотеллурических зондирований 70–90 гг. в ЮВ Приладожье, позднее дополненных зондированиями на опорном геотраверсе 1-ЕВ [Берзин и др., 2002] и на профилях программы “Московская синеклиза” [Фельдман, Эринчек, 2009], не удавалось в должной мере проследить южные отроги проводников ЛА и установить их связи с коровыми тектоническими структурами. Необходимы были дополнительные, современные глубинные зондирования на северо-востоке и на юго-востоке от Ладожского озера. Эти работы осуществлялись группой ЛАДОГА в период с 2013 по 2019 гг. [Соколова, 2017; Куликов и др., 2019], (рис. 2).

В настоящей статье анализируются новые данные проекта ЛАДОГА по ЮВ Приладожью — результаты синхронных МТ-ГМТ зондирований, проведенных в 2018–2019 гг. по региональным 180-километровым профилям Кириши–Подпорожье и Тихвин–Винницы (рис. 2) с использованием двух видов магнитотеллурической аппаратуры — низкочастотных станций LEMI-417 (разработка Львовского центра ИКИ НАНУ) и новой магнитотеллурической станции МЭРИ-ПРО, разработанной в компании ООО “Северо-Запад” (г. Москва).

Значительное внимание уделено проблемам борьбы с индустриальными электромагнитными шумами при оценивании магнитотеллурических передаточных функций, так как данные западного профиля, Кириши–Подпорожье, оказались сильно осложнены помехами от электрифицированной железной дороги Санкт-Петербург–Мурманск, проходящей вдоль юго-восточного берега Ладожского озера (рис. 2).

В фокусе настоящего исследования — анализ результатов обработки наблюдений вдоль менее подверженного ЭМ шумам, восточного, профиля Тихвин–Винницы: проводится инвариантный анализ построенных передаточных операторов электромагнитных полей, выявляется размерность изучаемых геоэлектрических структур и обосновываются подходы к проведению инверсий МТ данных. В Заключение представляется и обсуждается полученный в ходе инверсий разрез

коровой электропроводности ЮВ Приладожья по линии Тихвин–Винницы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ГЛУБИННЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЛАДОЖЬЯ

Первый этап исследования глубинного геоэлектрического строения ЮВ Балтийского щита в 70-х годах прошлого столетия привел к открытию региональной коровой аномалии электропроводности, зафиксированной с помощью пионерского для того времени метода магнитовариационного зондирования в северо-западном и юго-восточном обрамлениях Ладожского озера, в честь которого она и получила свое название [Рокитянский и др., 1981].

В последующее десятилетие развивающиеся технологии магнитотеллурического зондирования позволили геоэлектрикам из СПбГУ дополнительно охарактеризовать распределение коровых аномалий в этом регионе [Ковтун, 1989], в том числе выделить в разрезе ЛА Северного Приладожья два “ядра” высокой электропроводности: с центрами на глубинах 5–7 км (северное “ядро”) и на глубинах 15–20 км (южное) [Ковтун и др., 1998].

Результаты вышеупомянутых исследований региона Приладожья послужили главным источником информации для характеристики ЮВ части щита при построении квазитрехмерной модели суммарной проводимости земной коры всей Фенноскандии (модели SMAP), осуществленном в ходе выполнения международного проекта глубинного электромагнитного зондирования BEAR [Korja et al., 2002]. В области юго-западного Приладожья построения опирались лишь на пространственное поведение длиннопериодных векторов индукции и результаты одномерных инверсий амплитудных МТ кривых редкой сети зондирований. Согласно SMAP здесь проводник ЛА сохраняет свою квазилинейную структуру, но резко меняет простираемость с СЗ–ЮВ на СВ–ЮЗ (рис. 1), концентрируя максимальную проводимость (~10000 См) в коровом слое 0–30 км и опираясь на достаточно проводящее основание — слой 30–60 км с интегральной проводимостью ~500–1000 См [Korja et al., 2002].

В 2001 году через Юго-Восточное Приладожье прошел опорный геофизический профиль 1-ЕВ, включающий сегмент “Петля” (рис. 2), на котором были выполнены первые магнитотеллурические работы с современной цифровой аппаратурой Phoenix Geophysics [Берзин и др., 2002]. По мнению авторов упомянутой работы, этот участок геотраверса “подсек” край Ладожской аномалии, для которого удалось получить лишь обобщенные оценки параметров: интервал глу-

бин аномальной электропроводности — 10–40 км, сопротивление 2–8 Ом · м, интегральная проводимость S — несколько тысяч См.

Результаты одномерной интерпретации данных МТ профилей программы “Московская синеклиза”, проходящих через ЮВ Приладожье [Фельдман, Эринчек, 2009], также определили обширную зону хорошо проводящей коры под осадочными структурами Ладожской моноклинали (интегральная проводимость — до 10000 См). Однако полученное ограниченное разрешение геоэлектрических разрезов обуславливалось не только 1D-интерпретационным подходом, но, как отмечалось, также и невысоким качеством полевых наблюдений, осуществленных еще первым поколением отечественной цифровой аппаратуры (аналоговые станции ЦЭС-2).

Подкрепленные плотностным моделированием результаты недавних АМТ зондирований СПбГУ на профиле, пройденном вдоль южного берега озера вкост Паша-Ладожского грабена, выявили выполненную проводящими осадками структуру прогиба глубиной в первые километры и показали, что он контролируется разломными зонами, а его основание сложено изверженными породами основного и ультраосновного состава [Stepanov et al., 2016]. Кроме того, в северном окончании профиля, на траверсе СВ берега озера, была намечена мощная проводящая зона, глубинные корни которой не удалось разрешить в силу высоких рабочих частот примененного метода МТ зондирований.

В 2013 году зондированиями в Северном Приладожье были начаты работы по изучению глубинной структуры Ладожской аномалии, осуществляемые Рабочей группой ЛАДОГА, объединившей исследователей из СПбГУ, Геологического факультета МГУ, ИФЗ РАН, ИГ РАН, ИГ КНЦ и ООО “Северо-Запад”. Основной целью этих работ, проводимых с помощью современных технологий комплексных синхронных МТ/МВ зондирований, являлось получение новых детальных материалов о геоэлектрическом строении земной коры Приладожья, необходимых для развития моделей электропроводности области Ладожской аномалии и их включения в итоговую комплексную геолого-геофизическую модель строения коры юго-востока Балтийского щита, а также для дальнейшего совершенствования модели SMAR.

В период с 2013 по 2016 гг. группой ЛАДОГА были проведены магнитотеллурические зондирования в Северном Приладожье (профиль Выборг—Суоярви (В-С), 2013–2015 гг.), в Восточном Приладожье (профиль Лоймола—Олонец, 2016 г) и в Южном Приладожье (профили Тумаза—Окулово, 2016 г.).

Измерения, выполненные Рабочей группой ЛАДОГА в разведочном и глубинном диапазонах, отличались применением цифровой аппаратуры

с GPS-навигацией и использованием синхронных схем наблюдения, что позволяло улучшить шумоподавление при оценивании традиционных локальных передаточных операторов, тензоров импеданса $[Z]$ и матриц Визе—Паркинсона $[W]$, а также получить новые ресурсы для анализа индукционных откликов проводящих коровых структур — двухточечные операторы, в том числе, связывающие горизонтальные поля в двух точках магнитный тензор $[M]$ [Варенцов и др., 2003].

По материалам МТ/МВ зондирований профиля Выборг—Суоярви был построен глубинный разрез сопротивлений ЛА и проведена его геолого-геофизическая интерпретация. Полученные результаты заметно детализировали представления о проводящих объектах в Северном Приладожье: выявили присутствие в разрезе серии проводящих зон, полого падающих в ЮЗ направлении, и область концентрации теллурических токов, приуроченную к глубинам 15–20 км на южном окончании профиля. Природа глубинных проводников связывалась с присутствием метаморфогенного графита в толщах Южно-Финляндского гранулитового пояса, а для верхнекоровых проводников на участке РЛС — с графитизированными-сульфидизированными метаосадками и разломными зонами [Голубцова и др., 2016; Соколова, 2017; Таран и др., 2017].

Эти выводы послужили существенной опорой при создании модели глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена и сопредельных тектонических структур — Карельского кратона и Южно-Финляндского гранулитогнейсового пояса, построенной по геологическим, сейсмическим и геоэлектрическим данным в работе [Минц и др., 2018].

Развитие представлений о простирации “ветвей” аномалии в Южном Приладожье дала пленочная 3D-инверсия сводного ансамбля магнитовариационных данных по всей области Приладожья и прилегающим с севера финским территориям. Уверенно подтверждая наличие на профиле В—С двух коровых проводников (двух областей концентрации теллурических токов), разделенных относительно изолирующей областью, результат этой инверсии выявил подобные образы и на ЮВ берегу Ладоги, однако с довольно низким разрешением из-за существенно меньшего количества данных по ЮВ Приладожью, доступных анализу к 2017 г. [Golubtsova et al., 2017; Rokityansky et al., 2018].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РАБОТ

МТ/МВ наблюдения в ЮВ Приладожье были выполнены летом 2018 г. и в начале 2019 г. на профилях Кириши—Подпорожье и Тихвин—Винницы соответственно. Наряду с длиннопериодной

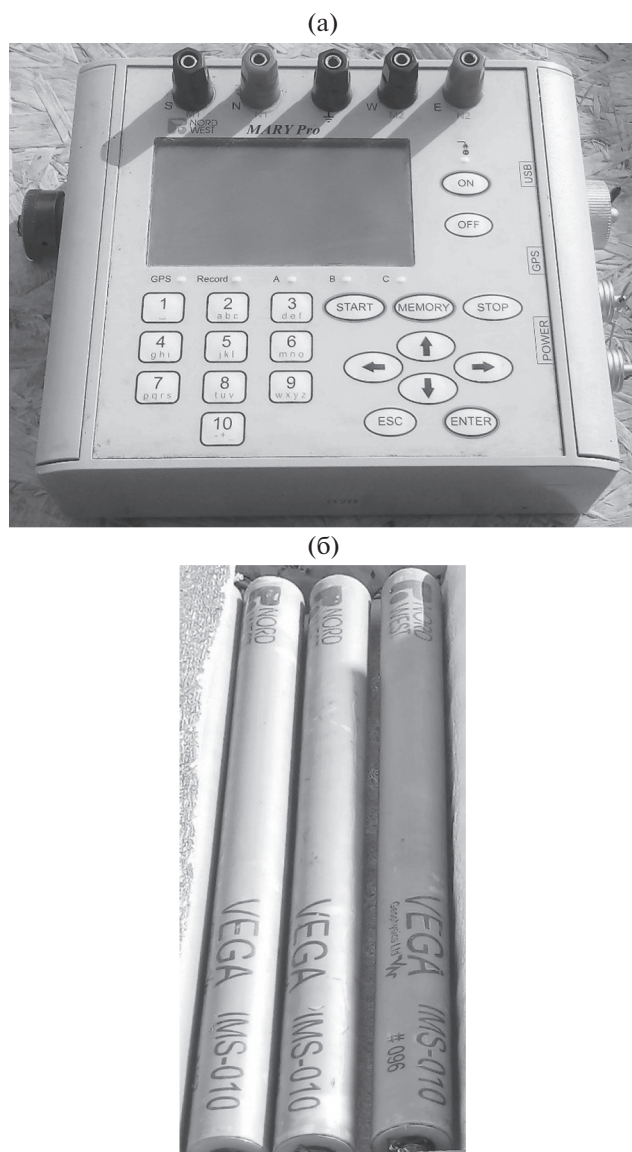


Рис. 3. Магнитотеллурическая станция МЭРИ-ПРО и набор датчиков IMS-10.

аппаратурой LEMI-417, зондирования на обоих профилях велись также с помощью новых магнитотеллурических станций “МЭРИ-ПРО”. Эта пятиканальная аппаратура (рис. 3а), разработанная в компании ООО “Северо-Запад” (г. Москва), предназначена для измерения двух электрических и трех магнитных компонент ЭМ поля. Для синхронизации с базовой точкой станция оснащена системой GPS с выносной антенной. Частотный диапазон станции 0.0001–1000 Гц. Для регистрации разных частотных диапазонов предусмотрен режим децимации с автоматическим переключением частот дискретизации сигнала – 2400, 150, 15 Гц. Датчики магнитного поля

IMS-010 (рис. 3б) разработаны в ООО “Вега” (г. Санкт-Петербург).

При измерениях использовалась стандартная “крестообразная” установка. Приемные линии $MN = 80$ м и индукционные датчики ориентировались на магнитные север (X) и восток (Y). Наблюдения на рядовых точках обоих профилей проводились двумя станциями в синхронном режиме. Параллельно велась запись на базовых станциях, расположенных около п. Лоймола в 2018 г. и п. Алеховщина в 2019 г. (рис. 2). Длина записи составляла около суток со станциями LEMI и 4–5 ч со станциями “МЭРИ-ПРО”.

Штатная обработка полученных записей электромагнитных полей осуществлялась с помощью новой программы оценивания МТ/МВ передаточных функций EPI-KIT (рис. 4), разработанной в ООО “Северо-Запад” (автор – Д.В. Епишкин). Предлагаемый в программе алгоритм включает в себя как хорошо известные статистические процедуры, так и ряд новых процедур, разработанных автором. К полезным инновациям лежащего в ее основе спектрально-статистического алгоритма, прежде всего, стоит отнести оригинальную идею использования “перекрестного взвешивания” (мультипликативных весовых коэффициентов) в итерационных робастных процедурах реализации традиционного метода взвешенных наименьших квадратов [Епишкин, 2018]. Применяемый подход к расчету весов при оценивании различных передаточных функций, позволяющий вести комбинированный учет и единовременное подавление влияния некоррелированных погрешностей в совокупности компонент МТ поля, а также возможности использования как электрического, так и магнитного полей на удаленной базе позволили эффективно оценивать полный набор передаточных функций в присутствии значительных электромагнитных (ЭМ) шумов. Для исследуемого региона наиболее интенсивными промышленными ЭМ шумами оказались эффекты электрифицированных железных дорог.

ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Типичными источниками промышленных электромагнитных помех, существенно затрудняющих проведение магнитотеллурических работ, являются линии электропередачи (ЛЭП), электрифицированные железные дороги (ЭЖД), трубопроводы, находящиеся под коррозионной защитой, промышленные предприятия.

Можно выделить источники помех двух типов: гальванического и индукционного. В источниках гальванического типа промышленный ток непосредственно стекает в землю, в источниках индукционного типа переменный ток, текущий в

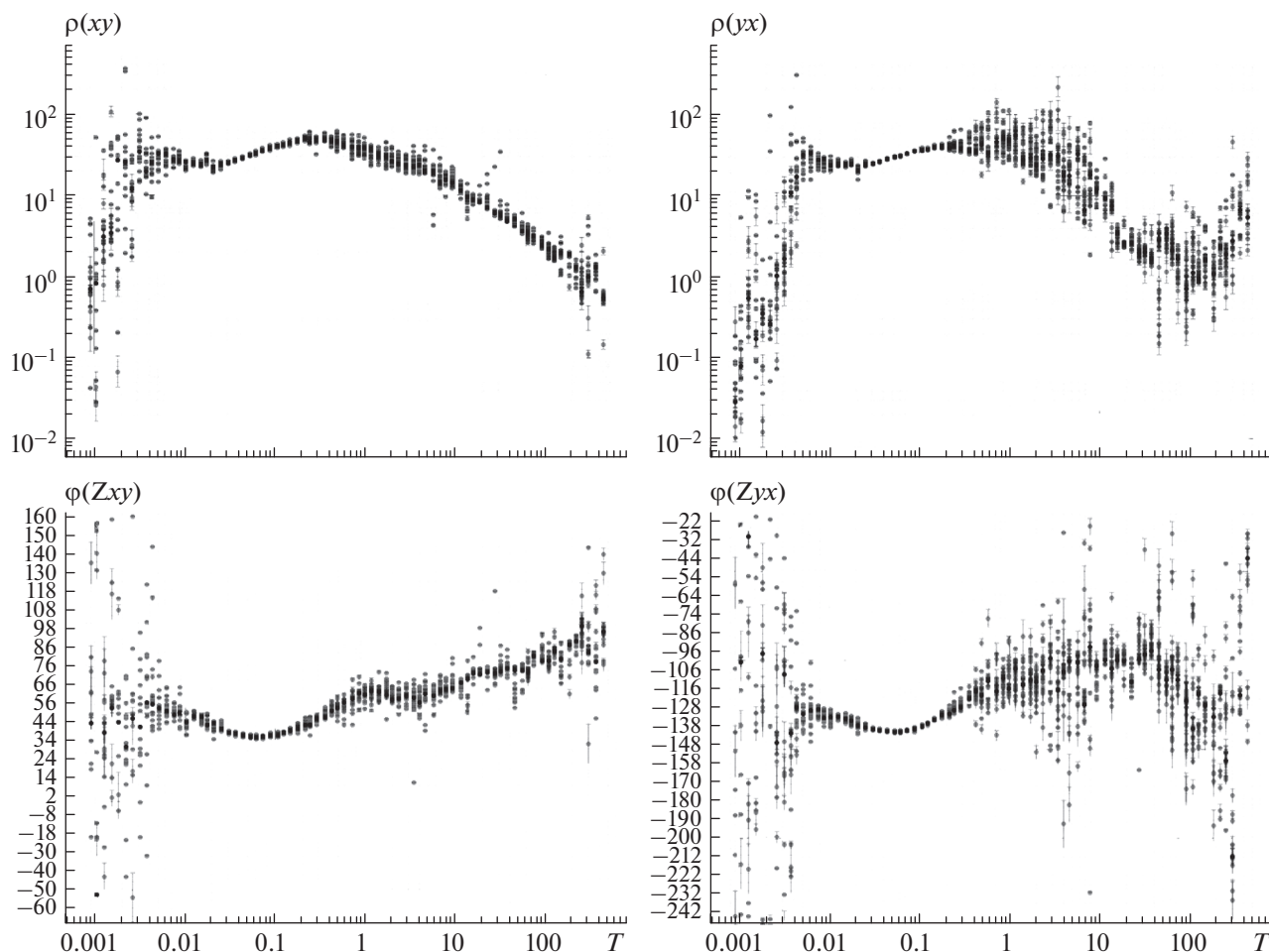


Рис. 4. Пример обработки данных в программе ERI-KIT: облака оценок фаз главных компонент импеданса и соответствующих кажущихся сопротивлений, полученных по множеству последовательных равных интервалов временного ряда, с доверительными интервалами. Черным цветом показаны средние значения. Направления X и Y соответствуют измерительным осям.

проводах, создает токи в земле вследствие явления электромагнитной индукции.

Наиболее интенсивные помехи гальванического типа вызываются полями ЭЖД. Особенно ярко эти помехи проявляется в электрическом поле. Распространению таких помех способствует наличие высокоомных экранов в разрезе, перекрытых проводящими отложениями.

Для электроснабжения железных дорог используется постоянный или переменный ток. И в том, и в другом случаях за счет изменения нагрузки и переключений тока в электромагнитном поле возникают помехи в широком спектре частот, но самые большие сигналы создают железные дороги постоянного тока.

Наиболее развитая сеть ЭЖД расположена в Центральной России, а железные дороги постоянного тока сосредоточены в радиусе 200–300 км вокруг Москвы и Санкт-Петербурга. В районе работ проходят сразу несколько дорог постоянного

тока, которые затрудняют проведение магнитотеллурических измерений. Это дороги Москва–Мурманск, Санкт-Петербург–Кириши, Санкт-Петербург–Вологда (рис. 2).

Поля ЭЖД начинают проявляться на расстояниях 50–70 км в области спектрального минимума МТ-поля в диапазоне от 0.1 до 1 Гц. При приближении к железной дороге область помех охватывает все более широкий частотный диапазон. При этом на кривых частотных зависимостей импеданса наблюдается участок существенного возрастания значений, а на кривых кажущегося сопротивления – восходящая ветвь, идущая круче 63°. Таким образом, кривые МТЗ, полученные вблизи ЭЖД, не могут быть проинтерпретированы в рамках модели плоской волны и подлежат отбраковке.

Проблему влияния железных дорог достаточно трудно решить даже с помощью современных робастных методов обработки МТ данных, использующих шумоподавление по методу удаленной

базы, т.е. с привлечением синхронных записей полей в дополнительных пунктах наблюдения, свободных от шума [Варенцов и др., 2003]. В МТ зондированиях ЮВ Приладожья эффекты ЭЖД наиболее сильно проявились на профиле Кириши—Подпорожье, проходящем почти параллельно железнодорожной линии Москва—Мурманск, удаленной в среднем на расстояние 30–50 км (рис. 2). Обработка данных длиннопериодных зондирований была проведена с помощью программы PRC-MTMV [Варенцов и др., 2003; Varentsov, Sokolova, 2005], которая кроме автоматических робастных процедур оценивания передаточных функций по серии различных временных окон и многоуровневого медианного осреднения получаемых оценок позволяет также применять адаптивные методы селекции отрезков записи по критерию однородности внешнего магнитного поля между рядовой и базовой точками. Последние существенно помогают устранять из рассмотрения интервалы, зашумленные эффектами ЭЖД [Sokolova, Varentsov, 2006].

Методические подходы, которые применяются в ходе помехоподавляющей обработки наблюдений на профиле Кириши—Подпорожье, иллюстрирует рис. 5. На нем представлены результаты оценивания магнитотеллурического импеданса Z и его инвариантов по двум записям станции LEMI-417 в п. 10 профиля (длительность записи a — 15 ч и записи b — 18 ч). Применялись как процедуры “одноточечного” оценивания (SS), при котором обрабатываются только локальные записи компонент ЭМ поля, так и обработка с привлечением записей трех удаленных баз (S07 — в рядовой т. 07; BAS — в п. Лоймола и МЕК — наиболее удаленной от точек профиля финской обсерватории Mekki-jarvi).

Анализ амплитудных и фазовых кривых различных компонент тензора Z выявил максимальные искажения северной компоненты электрического поля, близкой к направлению ЭЖД, и ортогональной магнитной. Рисунок 5а демонстрирует характер этих искажений на примере сравнения частотных зависимостей амплитуд главных импедансов Z_{xy} и Z_{yx} . Искажения максимальны в одноточечных (SS) оценках компоненты Z_{xy} : изменения оценок с ростом периода немонологичны, значения смещены вверх во всем диапазоне оценивания. Доверительные интервалы смещенных оценок существенно выше, чем у неискаженных (не показаны).

Шумоподавляющий эффект метода удаленной базы возрастает с ростом ее расстояния от точки зондирования: оценка S07 исправлена для периодов, не превышающих 20 с, BAS — до 80 с, а МЕК — до 110 с. И хотя при этом для базы МЕК отмечается потеря корреляции высокочастотных полезных сигналов (смещение для периодов менее 13 с), до-

вольно широкий объединенный диапазон исправленных оценок и их хорошее совпадение в нем позволяют достаточно уверенно провести экстраполяцию исправлений на весь диапазон периодов (FIN_spl). Эта процедура выполнена в программной системе Corrector (ООО “Северо-Запад”), позволяющей эффективно вести ручную коррекцию частотных зависимостей и проводить их сплайн-сглаживание при контроле соблюдения дисперсионных амплитудно-фазовых соотношений, согласно работе [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Корректность полученного финального сплайна FIN_spl подтверждает иное представление тех же результатов обработки наблюдений в т. 10 — в виде экстремальных эллипсов фазового тензора (см. следующий раздел и работу [Бердичевский, Дмитриев, 2009]), показанных на рис. 5б. Длины полуосей эллипсов откладываются равными величинам его минимальной и максимальной фазы; направление его короткой оси в квазидвумерном случае параллельно или ортогонально простиранию геоэлектрических структур. В случае сильных искажений (линейная поляризация ЭМ поля) эллипсы вытягиваются, вплоть до вырождения в отрезок. Рисунок 5б показывает, что эллипсы FIN_spl соответствуют своим аналогам по исправленным оценкам BAS, МЕК в диапазоне до 120 с и демонстрируют закономерное поведение на всех более длинных периодах.

Для уменьшения влияния дороги Москва—Мурманск работы следующего этапа (зима 2019 г.) были проведены по профилю Тихвин—Винницы, отнесенному на большее расстояние от ЭЖД. В целях минимизации эффектов железной дороги пришлось пойти на неравномерный шаг наблюдений по профилю. Так, в его юго-западной части из-за пересечения ЭЖД Санкт-Петербург—Вологда расстояние между точками № 1 и № 2 пришлось увеличить до 40 км (рис. 2). Уровень помех на этом профиле меньше, однако, на его северо-восточном участке влияние железной дороги сохранилось.

На рис. 6 приведены фрагменты записи магнитотеллурического поля, полученные на двух соседних точках профиля Тихвин—Винницы № 13 и № 17 (рис. 2). Точки расположены на незначительном расстоянии друг от друга (около 5 км) и на примерно одинаковом расстоянии от ЭЖД (≈ 55 км). Разница между этими точками состоит в том, что одна из них (№ 13) находится над коровым проводящим слоем, а другая уже в границах высокоомного архейского Карельского кратона.

Область распространения помех гальванического типа определяется гальванической константой $g = \sqrt{S_1 T_2}$, где S_1 — продольная проводимость первого слоя, а T_2 — поперечное сопротивление второго слоя [Алексанова и др., 2003].

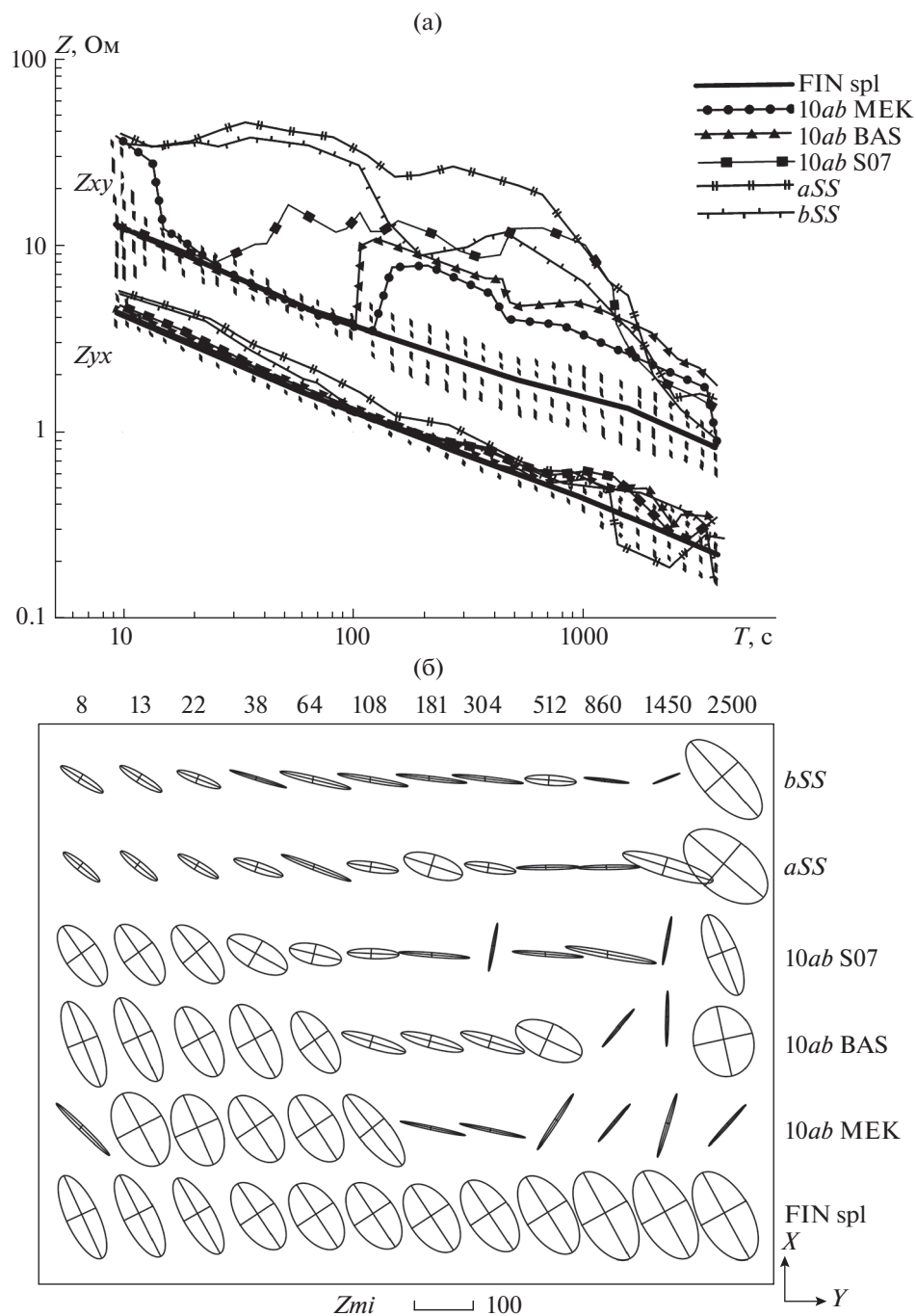


Рис. 5. Результаты обработки данных МТ зондирования LEMI в п. 10 (рис. 2), по программе PRC-MTMV ([Варенцов и др., 2003; Varentsov, Sokolova, 2005]), с финальной коррекцией в системе Corrector (ООО «Северо-Запад»); (а) – 6 вариантов оценок амплитудных зависимостей главных импедансов Z_{xy} , Z_{yx} (мВ/км · нТл) от периода T (с); (б) – развертка по периодам (горизонтальная ось – T , с) экстремальных эллипсов фазового тензора, построенных по 6 оценкам (а), соответственно. Ось X – направление на геомагнитный Север, ось Y – на Восток. Отрезок под рисунком (б) задает масштаб величины малой и большой осей эллипсов (100 градусов). $SS a, b$ – локальные (одноточечные) оценки по двум МТ записям в п. 10; S07, BAS, MEK – оценивание по сцепке ab по методу удаленной базы с использованием синхронных записей в рядовом пункте 7 (07), базовом (п. Лоймола, BAS) и геомагнитной обсерватории Mekrijärvi (MEK) (расположена в Финляндии за пределами площади рис. 2) соответственно; FIN_spl – финальная оценка, полученная в результате ручной коррекции остаточных длиннопериодных искажений и сплайн-сглаживания, показанная с итоговыми доверительными интервалами.

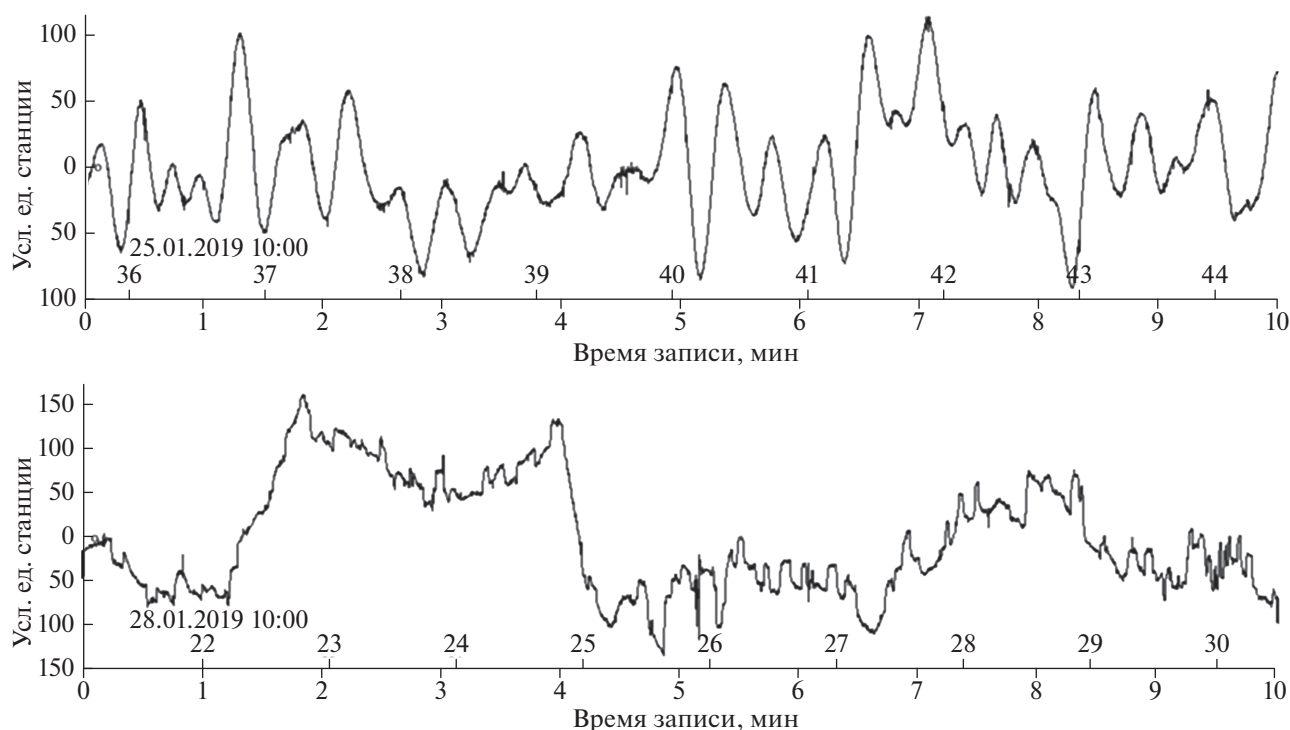


Рис. 6. 10-минутные фрагменты записи электрической компоненты E_x (ориентация С–Ю) на точках МТЗ профиля Тихвин–Винницы № 13 (вверху) и № 17 (внизу). Положение точек показано на рис. 2.

Суммарная проводимость осадочных пород (S_1) вдоль профиля работ изменяется, судя по кривым, незначительно, примерно от 15 до 30 См. Но над Свеклофенским орогеном и, особенно, в пределах Ладожско–Ботнической зоны, заметно снижается поперечное сопротивление верхней коры (T_2) по сравнению с высокоомным блоком Карельского кратона, что становится сразу заметно по уровню помех при переходе границы между блоками, которые существенно возрастают вместе с ростом (“уплотнением”) электрического поля над изолирующим блоком.

В борьбе с помехами на этом профиле оказалась вполне эффективной методика оценивания МТ/МВ передаточных функций с привлечением синхронных наблюдений удаленной базы, размещенной в его центре (п. Алеховщина), в области проявления корового проводника на участке с низким уровнем промышленного шума. Для большей части пунктов зондирования проведение обработки по программе EPI-KIT с использованием синхронных записей и последующим сплайн-сглаживанием в системе Corrector позволило существенно улучшить качество кривых МТЗ, особенно в области спектрального минимума поля. Типичный пример результатов обработки МТ данных на профиле Тихвин–Винницы дан на рис. 7.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНИВАНИЯ МТ/МВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ НА ПРОФИЛЕ ТИХВИН–ВИННИЦЫ

Качественный анализ результатов включал в себя расчет и построение псевдоразрезов кажущихся сопротивлений, фаз импеданса, параметров неоднородности и асимметрии по профилю, построение амплитудных и фазовых полярных диаграмм, индукционных векторов на отдельных периодах.

По форме кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса профиль можно разделить на три части (рис. 8). В северо-восточной части (МТЗ № 19–22) тип кривых ρ_k – НК. Минимум в левой части кривой ρ_k отвечает влиянию осадочных пород, а восходящая ветвь связана с высокоомными породами кристаллического фундамента. В центральной части профиля (МТЗ № 11–16) кривые ρ_k имеют тип Q. На отдельных точках восходящая ветвь кривой, отвечающая влиянию высокоомного фундамента, практически отсутствует. Низкочастотная нисходящая ветвь связана с влиянием корового проводника. В юго-западной части профиля кривые ρ_k имеют тип НК с ярко выраженным элементом “К”. Глубина до корового проводящего слоя при формальной оценке по асимптоте к левой нисходящей ветви составляет 12–25 км.

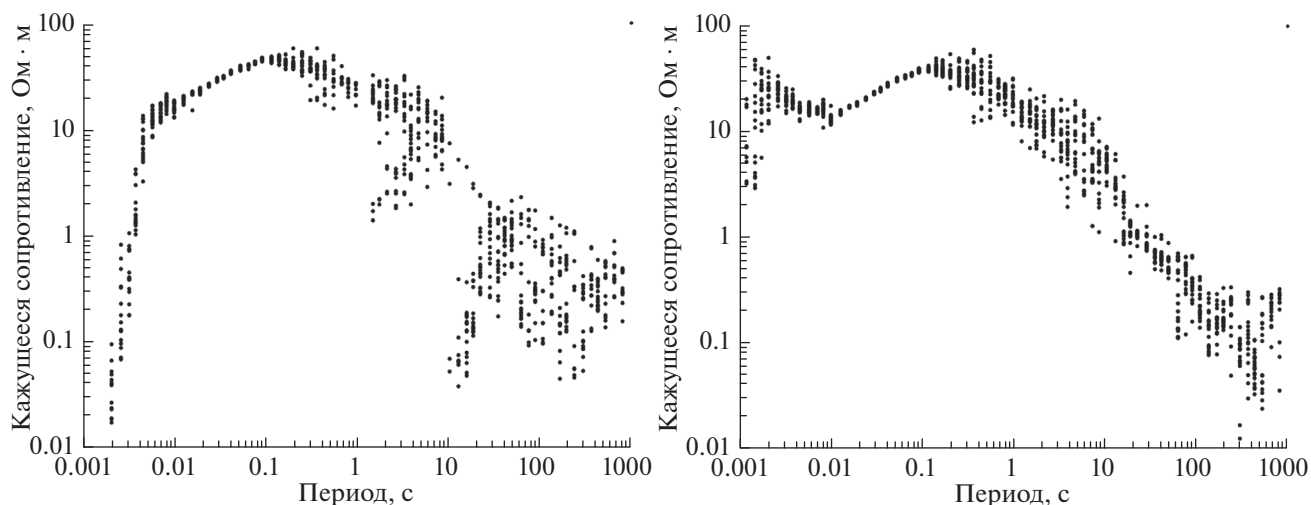


Рис. 7. Сравнение двух результатов обработки данных МТЗ в точке № 15 профиля Тихвин–Винницы по программе EPI-KIT [Епишкин, 2018] на примере оценок эффективной компоненты кажущегося сопротивления: (а) — одиночная обработка; (б) — обработка с использованием синхронных записей электрического и магнитного поля в базовой точке п. Алеховщина (рис. 2).

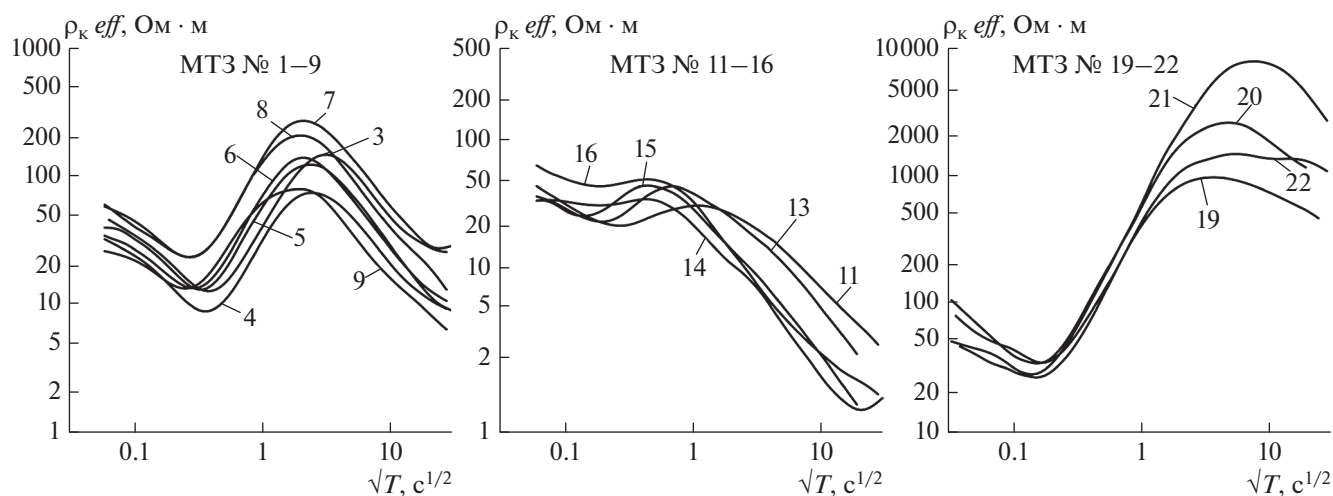


Рис. 8. Типичные кривые кажущегося сопротивления (эффективная компонента) для разных участков профиля Тихвин–Винницы (точки МТЗ показаны на карте рис. 2 под соответствующими номерами).

На основе анализа псевдоразрезов кажущихся сопротивлений и фаз импеданса (рис. 9) можно выделить следующие характерные черты геоэлектрического разреза:

1. Суммарная проводимость верхнего горизонта осадочных отложений плавно увеличивается с северо-востока на юго-запад.

2. В центральной части профиля, на больших периодах выделяется аномальная область, связанная с проводящей зоной в земной коре. Ширина аномальной зоны составляет примерно 100 км (50–150 км профиля). Минимальные глубины залегания проводника фиксируются в районе МТЗ

№ 17–19, где он практически сливается с верхним горизонтом осадочных пород. В юго-западном направлении наблюдается погружение проводника.

3. В районе МТЗ № 2–3 фиксируется субвертикальная зона пониженных сопротивлений в земной коре.

4. Максимальными значениями удельных сопротивлений характеризуются верхние горизонты земной коры в Карельском блоке (150–180 км профиля).

На рис. 10 приведены псевдоразрезы инвариантных параметров тензора импеданса, показы-

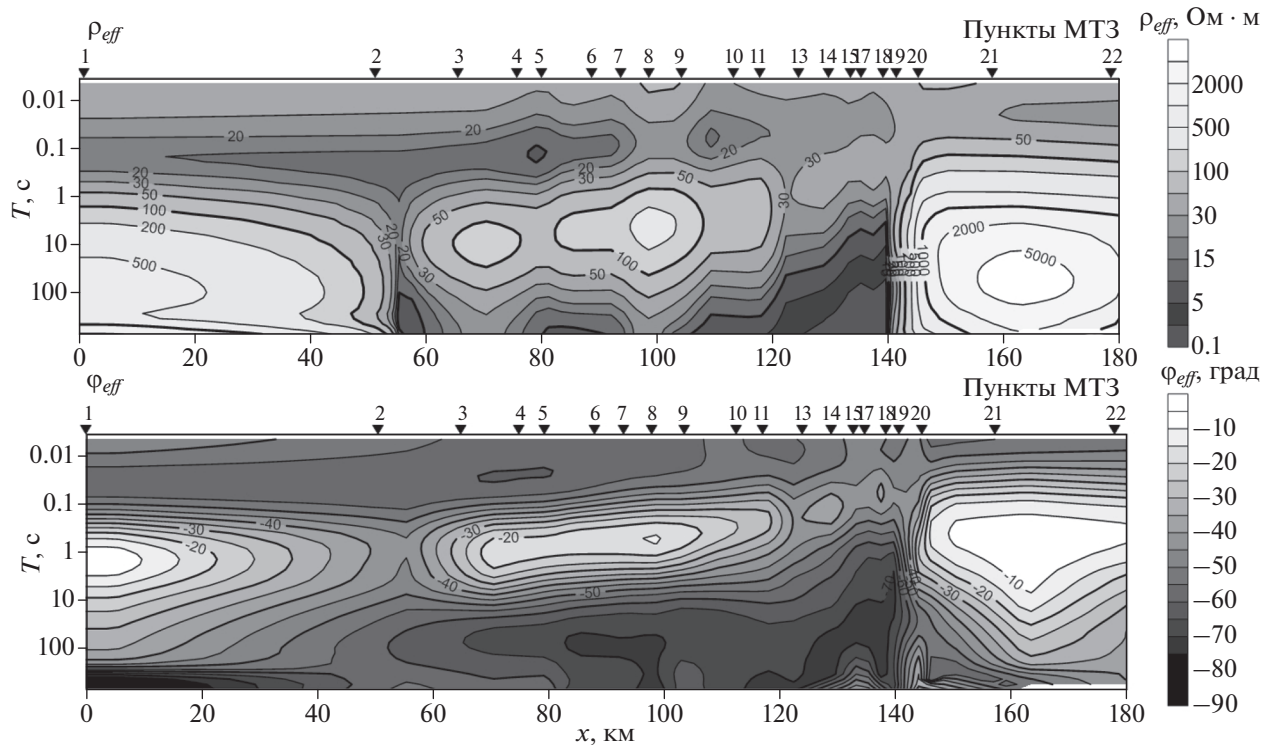


Рис. 9. Псевдоразрезы эффективных компонент кажущегося сопротивления и фазы импеданса по линии профиля Тихвин–Винницы.

вающих степень горизонтальной неоднородности и асимметрии среды: N и $skew$ [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Данные параметры рассчитаны по схеме Эггера. В модели, состоящей из горизонтально-однородных слоев (1D), $N = 0$. Если $N > 0.2$, то модель неоднородная. Параметр $skew$ является мерой асимметрии среды. В двухмерной или осесимметричной среде $skew = 0$, в присутствии трехмерных эффектов значения $skew$ повышаются более 0.2.

По результатам анализа частотных разрезов параметров неоднородности и асимметрии импедансного тензора, индукционный отклик глубинных геоэлектрических структур, пересекаемых профилем Тихвин–Винницы, можно охарактеризовать в целом как квазидвумерный с наложенными локальными трехмерными искажениями. Это заключение вполне справедливо для центральной части профиля, на участке между МТЗ № 3–17, однако, хуже выполняется для его краев (в области наиболее длинных периодов, рис. 106).

По ориентации амплитудных и фазовых полярных диаграмм компонент тензора импеданса, а также индукционных векторов и направлений главных осей фазового тензора (рис. 11) на периодах в десятки–первые сотни секунд было определено главное направление простирания глубинных геоэлектрических неоднородностей

(130–150° ЮВ), что обосновало возможность применения двумерного подхода к интерпретации магнитотеллурических данных по профилю Тихвин–Винницы с предварительным поворотом системы координат для МТ/МВ передаточных операторов на 50° по часовой стрелке. При проведении двумерной интерпретации азимуты продольного и поперечного направлений поляризации индукционных откликов были приняты как 140° ЮВ и 50° СВ соответственно.

ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ

Для построения глубинной геоэлектрической модели вдоль линии Тихвин–Винницы была проведена серия 2D-инверсий ансамбля профильных МТ/МВ передаточных функций. Инверсия проводилась в программе ZONDMT2D (автор – Каминский А.Е., г. Санкт-Петербург), где реализовано несколько вариантов решения обратной задачи магнитотеллурических зондирований.

Нами использовалась сглаживающая инверсия. Параметры сетки моделирования: первая вертикальная ячейка – 50 м, количество ячеек вертикальной сетки – 50, глубина модели – 60 км, размер горизонтальной ячейки – 3 км. Радиус сглаживания значений удельных электрических сопротивлений (УЭС) в ячейках модели был вы-

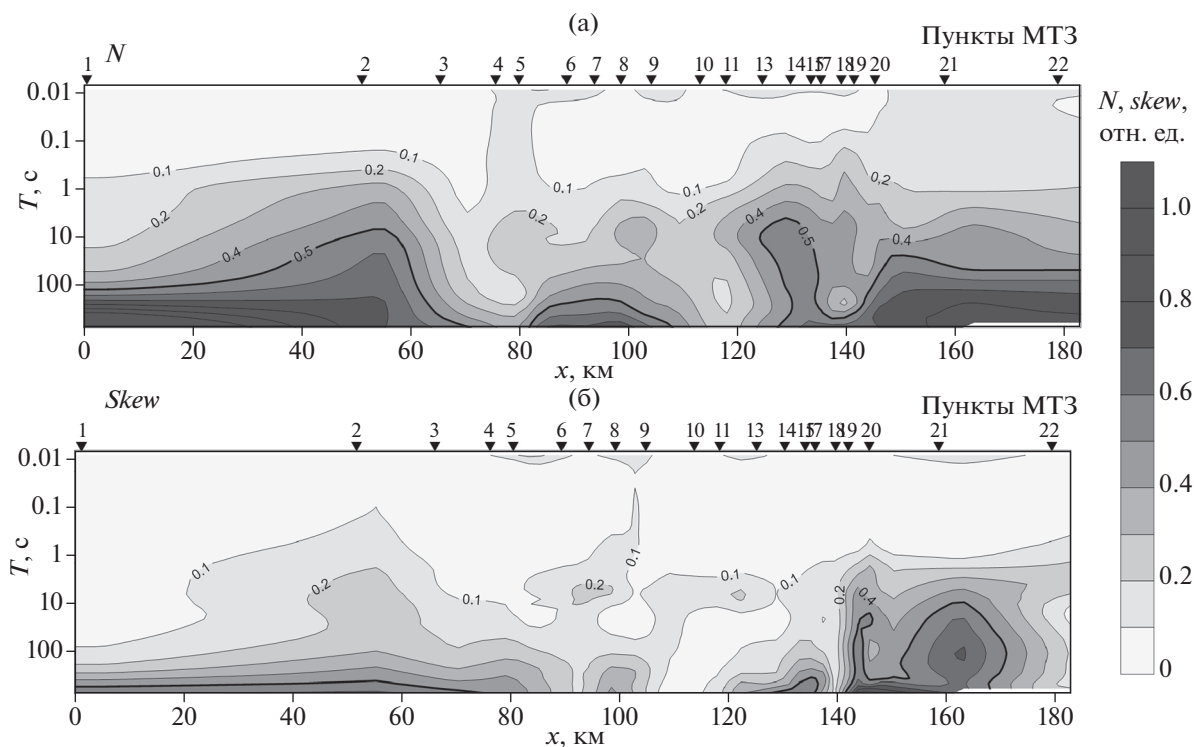


Рис. 10. Псевдоразрезы параметров неоднородности по линии профиля Тихвин–Винницы: параметр неоднородности N (а) и параметр асимметрии $skew$ (б), рассчитанные по схеме Эггерса.

бран $R = 0.2$ (сглаживание в горизонтальном направлении в 5 раз больше, чем в вертикальном).

Нормализация амплитудных кривых (устранение статических эффектов гальванических искажений) проводилась для главных компонент тензора импеданса путем низкочастотного пространственного сглаживания.

Наибольшего разрешения модели в верхней коре и наилучшей сходимости расчетных и наблюдаемых данных удалось достичь при проведении бимодальной инверсии по повернутым на 50° компонентам тензора импеданса и типперам I_z . Инверсия выполнялась с весовым приоритетом фазовых данных для уменьшения влияния статических искажений.

Геоэлектрическая модель по профилю Тихвин–Винницы приведена на рис. 12б, а на рис. 13 – соответствующие разрезы невязок подбора по отдельным компонентам данных. Максимальные расхождения наблюдаемых и модельных откликов фиксируются на краевых участках профиля, где по результатам инвариантного анализа экспериментальных магнитотеллурических данных были выявлены трехмерные искажения (рис. 10, рис. 11), при которых рациональный подбор наблюденого ансамбля в рамках 2D-модели с высокой точностью не представляется возможным. Рисунок 14 на примере фаз импеданса демонстрирует сопо-

ставление наблюдаемых и модельных псевдоразрезов, позволяя визуально оценить их хорошее соответствие в центральной части профиля и имеющиеся различия на его флангах, большие на северо-востоке, где профиль выходит на Карельский кратон. Общие выводы этапа качественного анализа МТ/МВ данных, а также достаточно низкий уровень невязок, достигнутый в процессе инверсии на большей части профиля (по кажущимся сопротивлениям не превышает 10%, по фазовым кривым импеданса – 2° , по типперам – 0.1), позволяют рассматривать результаты двумерной интерпретации данных МТ/МВ зондирований на линии Кириши–Подпорожье, в целом, как хорошее первое приближение разреза ЮВ продолжения коровых проводников ЛА, однако выявляется необходимость дальнейшего более детального анализа в рамках 3D-подхода.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ДВУМЕРНОЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На фоне высокоомных пород земной коры в центре профиля Кириши–Подпорожье на глубинах 1–20 км на полученном в результате 2D-инверсии разрезе сопротивлений выделяется крупная проводящая структура. В районе пересечения профилем Ладожско–Ботнического пояса (МТЗ № 13–17) кровля корового проводника находится

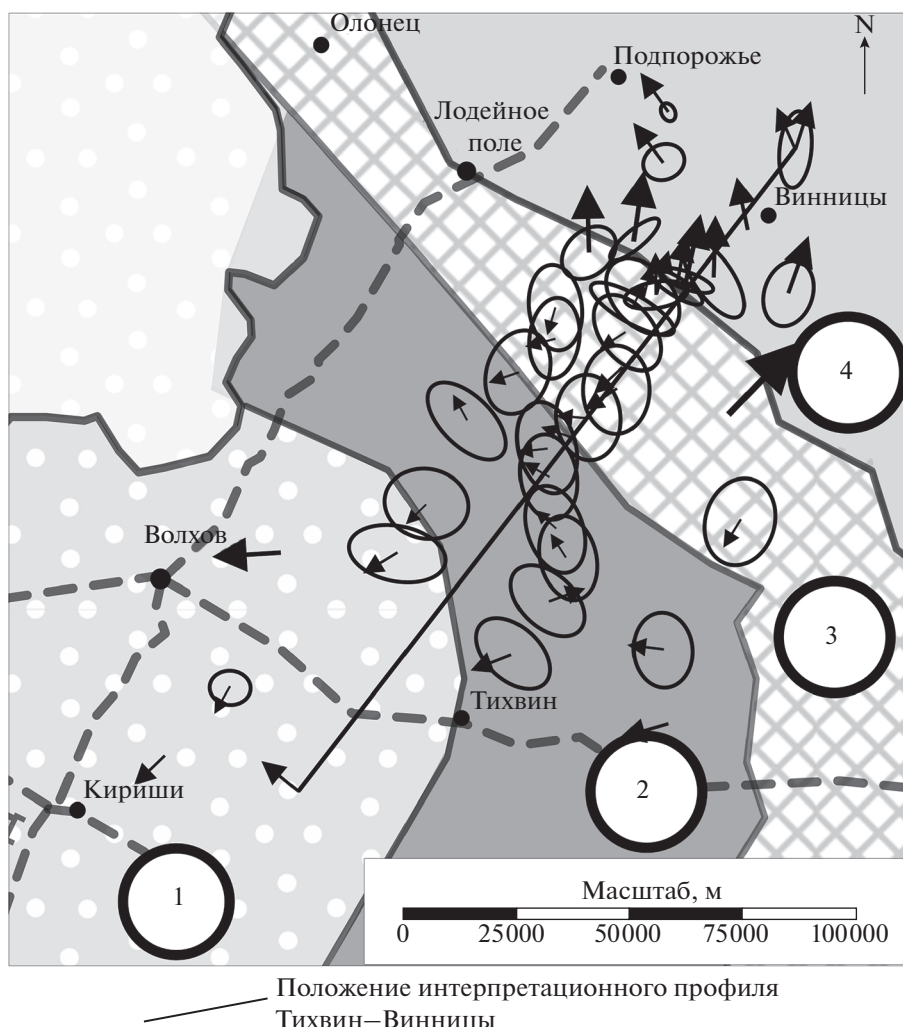


Рис. 11. Экстремальные эллипсы фазового тензора и действительные векторы индукции для периода $T = 136$ с в точках синхронных МТ/МВ зондирований 2016–2019 гг. в ЮВ Приладожье на фоне геологической карты (по работе [Минц и др., 2010], легенда — в подписи к рис. 2). Центры эллипсов совпадают с положением точек зондирований.

на глубинах около 1 км. На участке МТЗ № 10–13 проводник погружается примерно под углом 40° в юго-западном направлении до глубин 12 км (верхняя кромка), хорошо соотносаясь с крупной проводящей зоной, намеченной в верхнекоровом разрезе в работе [Stepanov et al., 2016]. На участке МТЗ № 2–10 наблюдается более пологое погружение проводящих структур в юго-западном направлении (угол около 5°) до глубины 15 км (положение кровли). Значения удельных сопротивлений в пределах корового проводника на отдельных участках опускаются до десятых долей Ом · м.

В районе МТЗ № 2 фиксируется еще одна суб-вертикальная проводящая зона, находящаяся на траверсе известных проявлений контролируемого разломными зонами Паша-Ладожского грабена [Stepanov et al., 2016], а также (по версии

[Минц и др., 2010]) — на контакте двух ветвей Южно-Финляндского гранулитового пояса: менее и более основных (мафитовых) гранулитов (рис. 2, рис. 9, рис. 12).

На рис. 12 сопоставлены модели сечения ЛА: обсуждаемый разрез сопротивлений по линии Кириши—Подпорожье (рис. 12б) и разрез сопротивлений, построенный вдоль профиля Выборг—Суоярви в Северном Приладожье (рис. 12а) [Сokolova, 2017; Таран и др., 2017].

Эти двумерные модели структуры Ладожской аномалии (в Северном и Южном Приладожье) в общих чертах схожи. Они демонстрируют одинаковую тенденцию погружения проводников в юго-западном направлении: от близповерхностных/верхнекоровых глубин у границы с Карельским кратоном (северо-восточные участки профилей) до 15–20 км (юго-западные). Аномально

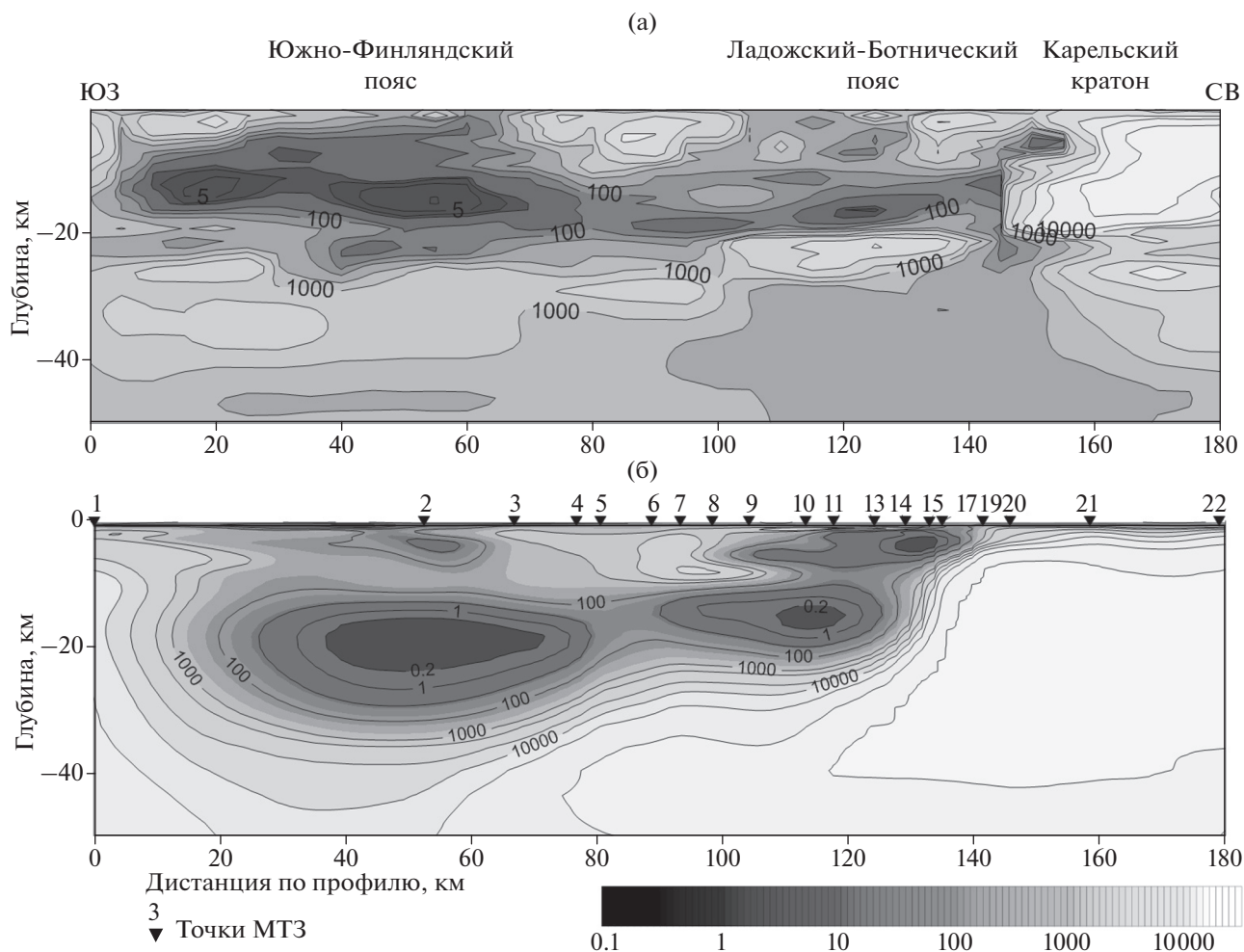


Рис. 12. Сопоставление разрезов сопротивлений (в $\text{Ом} \cdot \text{м}$) земной коры ЮВ Фенноскандинавского щита в области Ладожской аномалии электропроводности, полученных на основе 2D-инверсий МТ/МВ данных по профилям в Северном и ЮВ Приладожье (рис. 2): (а) – разрез по линии Выборг–Суоярви (по [Соколова, 2017], программа INV2D); (б) – разрез по линии Тихвин–Винницы (программа ZONDMT2D).

проводящие зоны в обоих разрезах, в целом, близки по размерам, глубине залегания, углам падения и уровню удельных электрических сопротивлений. Наибольшая интегральная электропроводность в них достигается в пределах Южно-Финляндского гранулитогнейсового пояса (~ 11000 и ~ 15000 См соответственно). На профиле Выборг–Суоярви разрез сопротивлений построен с использованием программы INV2D [Varentsov, 2007] и проработан несколько более детально, что позволяет видеть в структуре ЛА серию полого погружающихся к юго-западу неоднородно-проводящих пластин в верхней и средней коре, выходящих на поверхность в местах картирования известных разломов. На профиле Тихвин–Винницы эти отдельные горизонты низкого сопротивления, вероятно, сливаются в образ единой проводящей структуры, так как приме-

ненная сглаживающая инверсия не обеспечивает их разрешения.

Модели близки и по уровню сопротивлений пород непроводящей литосферы. В пределах Южно-Финляндского пояса земная кора характеризуется более низкими значениями УЭС ($n \times 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), по сравнению с Карельским блоком ($> 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

Построенная модель, в целом, согласуется с имеющимися более ранними представлениями о геоэлектрическом строении ЮВ Приладожья [Korja et al., 2002; Берзин и др., 2002; Фельдман, Эринчек, 2009]. Эти исследования также показали наличие высокопроводящих зон в верхней и средней коре этой области, дали сходные оценки их интегральных параметров, однако, в силу ограниченного объема данных и опоры на результаты 1D-интерпретации, – менее разрешенные образы проводящих структур ЛА.

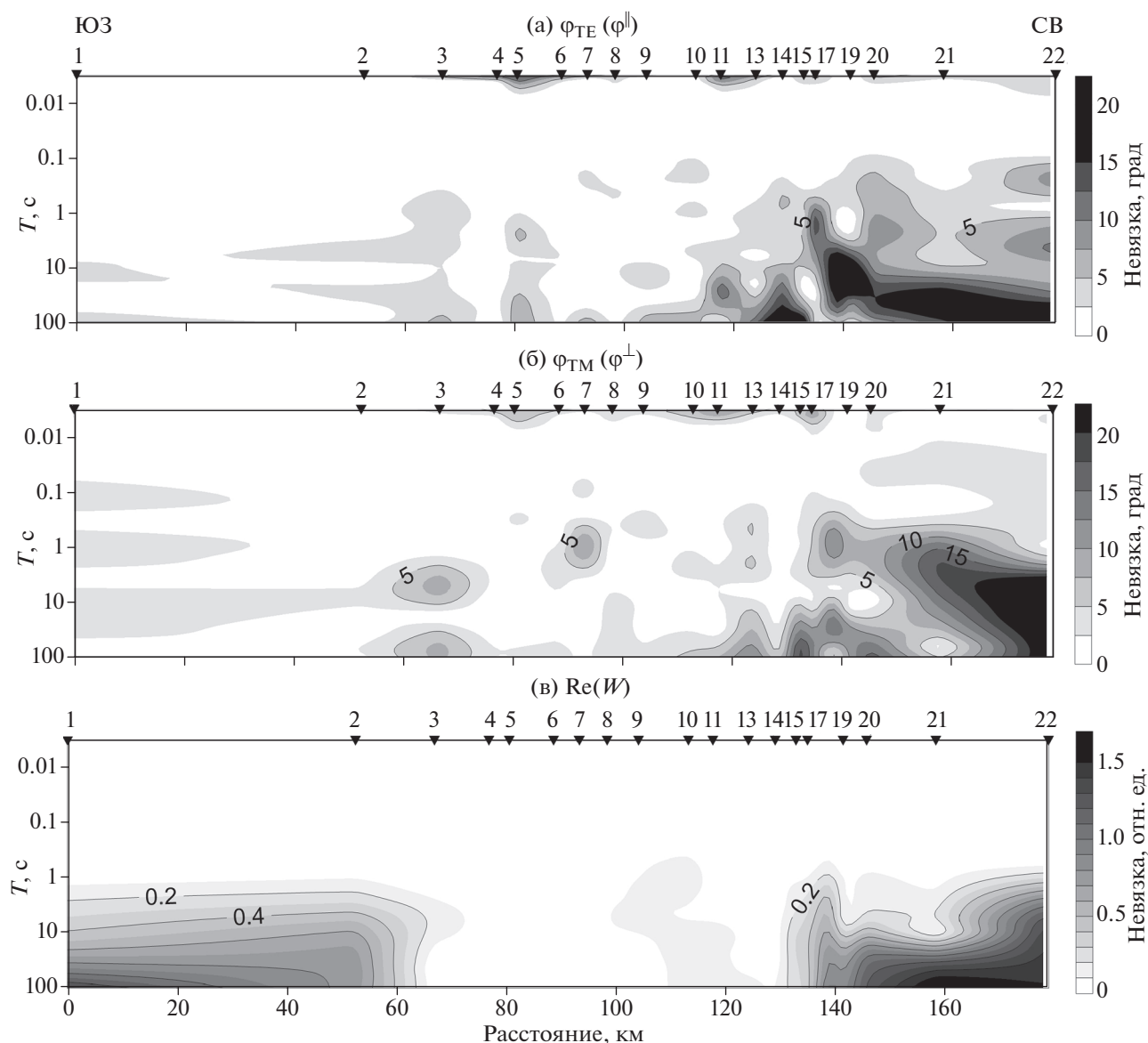


Рис. 13. Псевдоразрезы невязок продольной (а) и поперечной (б) компонент фазы тензора импеданса и реальной части компоненты матрицы Визе, характеризующие качество подбора наблюдаемых данных в результате МТ/МВ инверсии по профилю Тихвин–Винницы по программе ZONDMT2D.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены первые результаты работ методом МТЗ, которые были проведены летом 2018 г. и зимой 2019 г. на двух региональных профилях, пересекающих продолжение структур Ладожской аномалии электропроводности в ЮВ Приладожье. Подробный анализ проведен по материалам 180 км профиля Тихвин–Винницы. Полевые измерения на нем и обработка МТ-сигнала выполнены с использованием нового аппаратно-программного комплекса, разработанного в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва), который включает в себя 5-канальную станцию

МЭРИ-ПРО с индукционными датчиками IMS-010 и программу обработки данных EPI-KIT.

Несмотря на технические ограничения по длительности записи магнитотеллурического поля (не более 5 ч), благодаря методике синхронных измерений и последующей обработке с использованием как электрического, так и магнитного полей удаленной базы, на всех точках профиля был получен набор локальных и двухточечных передаточных МТ/МВ функций в широком диапазоне периодов от 0.001 до 1000 с.

По результатам двумерной бимодальной инверсии была получена геоэлектрическая модель по

профилю Тихвин—Винницы до глубины 50 км, демонстрирующая генеральное падение проводящих структур Ладожской аномалии в юго-западном направлении с областью максимальной концентрации теллурических токов на глубинах 15–20 км на южном окончании профиля. Следуя работе [Минц и др., 2018], эти проводящие структуры можно соотнести с надвигами на структуры Свекофеннского орогена высокометаморфизованных формаций Южно-Финляндского гранулитогнейсового пояса, включающих кристаллический графит, а также — с проводящими метасадочными и метавулканическими комплексами Раахе-Ладожской шовной зоны.

Материалы профильных МТ зондирований 2019 г. по линии Тихвин—Винницы в ЮВ Приладожье позволили впервые получить сечение южных ветвей ЛА и выявить его принципиальное сходство с разрезом этой аномалии, полученном в ходе изучения Ладожско-Ботнической зоны в Северном Приладожье (по профилю Выборг—Суоярви).

Построенная геоэлектрическая модель представила существенно новую информацию о строении земной коры южного крыла Ладого-Ботнической (Раахе-Ладожской) зоны, разграничивающей крупные структуры Юго-Востока Фенноскандинавского щита — Южно-Финляндский гранулитогнейсовый пояс и Карельский кратон. Однако для ее более глубокого анализа и истолкования в геотектонических терминах необходимы дополнительные исследования, в частности, повышение разрешения 2D-инверсии, проведение инверсии МТ данных по профилю Кириши—Подпорожье и переход к 3D-инверсии всех имеющихся данных по области Южного Приладожья, а также проведение комплексной геофизической интерпретации — с анализом потенциальных полей, характеризующихся в исследуемой области яркими аномалиями, а также сейсмических материалов геотраверса 1-ЕВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарны всем членам Рабочей группы ЛАДОГА и студентам кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, принимавшим участие в подготовке и проведении полевых работ в ЮВ Приладожье 2018–2019 гг., персонально — М.Ю. Нилову и Н.В. Шарову (ГИ КарНЦ), а также всем разработчикам использованных эффективных программных средств обработки, анализа и интерпретации МТ данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работы были поддержаны грантом РФФИ 16-05-00543 и ООО “Северо-Запад”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанова Е.Д., Куликов В.А., Пушкарёв П.Ю., Яковлев А.Г. Использование полей электрифицированных железных дорог при проведении электромагнитных зондирований // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 2003. № 4. С. 60–64.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
- Берзин Р.Г., Куликов В.А., Каплан С.А. Построение геоэлектрического разреза земной коры по данным МТЗ на участке Тихвин—Молоково профиля 1-ЕВ: Пятые геофизические чтения им. В.В. Федынского. М.: ГЕОН. 2002. 1 с.
- Варенцов Ив. М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р., Наливайко К.В. Методика построения передаточных операторов ЭМ поля для массива синхронных зондирований BEAR // Физика Земли. 2003. № 2. С. 30–50.
- Васин Н.Д. Геоэлектрическая характеристика разреза юго-западной Карелии // Записки Горного института. 1988. Т. 113. С. 57–63.
- Голубцова Н.С., Вагин С.А., Варданянц И.Л., Ковтун А.А., Куликов В.А., Ковачикова С., Лозовский И.Н., Пушкарёв П.Ю., Смирнов М.Ю., Соколова Е.Ю., Таран Я.В., Успенский Н.И., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Новые магнитотеллурические зондирования на профиле Выборг—Суоярви через Ладожскую аномалию электропроводности // Вопросы естествознания. 2016. № 2(10). С. 72–76.
- Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных синхронных магнитотеллурических зондирований. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2018. 132 с.
- Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофиз. журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 22–39.
- Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. Л.: изд-во: Ленинградского университета. 1989. 284 с.
- Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданянц И.Л. и др. Строение коры и мантии по профилю Суоярви—Выборг по магнитотеллурическим данным // Вестник СПбГУ. 1998. Сер. 4. Вып. 4. С. 25–34.
- Ковтун А.А., Варданянц И.Л., Успенский Н.И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны // Вопросы геофизики. 2011. Вып. 44. С. 124–133.
- Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Десятов Д.О. и др. Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю Кириши—Подпорожье 2018 г. Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки “ГеоЕвразия-2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии”. М. 2019. С. 446–452.
- Лазарева Н.В. Некоторые особенности поведения естественного электромагнитного поля на южном склоне Балтийского щита // Вопросы разведочной геофизики. 1967. Вып. 6.
- Минц М.В., Соколова Е.Ю. Рабочая группа LADOGA. Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Карельского НЦ РАН. 2018. Сер. Геология декабря. № 2. С. 34–61.

- Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С., Белоусова Е.А., Блох Ю.И., Богина М.М., Буш В.А. Докукина К.А., Заможняя Н.Г., Злобин В.Л., Каулина Т.В., Конилов А.Н., Михайлов В.О., Натанов Л.М., Пийп В.Б., Ступак В.М., Тихоцкий С.А., Трусов А.А., Филиппова И.Б., Шур Д.Ю. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС. 2010. Т. 1. 408 с. Т. 2. 400 с.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладжская аномалия электропроводности // Геофизический журнал. 1981. № 3. С. 97–99.
- Рокитянский И.И., Соколова Е.Ю., Терешин А.В., Яковлев А.Г. и рабочая группа LADOGA Аномалии электропроводности в зонах сочленения архейских и протерозойских геоблоков Украинского и Балтийского щитов // Геофизический журнал. 2018. Т. 40. № 5. С. 209–244.
- Соколова Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Пушкарёв П.Ю., Рокитянский И.И., Таран Я.В., Яковлев А.Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладжской аномалии электропроводности // Геофизика. 2016. № 1. С. 48–61.
- Соколова Е.Ю. и рабочая группа ЛАДОГА. Эксперимент синхронного МТ/МВ зондирования Ладжской аномалии электропроводности: новые свидетельства о структуре коры юго-востока Балтийского щита. Глубинное строение и геодинамика Приладжжя. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск. 2017. С. 205–214.
- Таран Я.В., Зайцев С.В., Соколова Е.Ю., Пушкарёв П.Ю. Опыт инверсии данных новых МТ/МВ зондирований по профилю Выборг-Суоярви через Ладжскую аномалию электропроводности. Глубинное строение и геодинамика Приладжжя. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск. 2017. С. 224–230.
- Фельдман И.С., Эрнчек Ю.М. Геоэлектрическая модель земной коры вдоль профиля I-ЕВ (Балтийский щит – Прикаспийская синеклиза). Материалы Всероссийской школы-семинара по электромагнитным исследованиям Земли. М. 2009.
- Golubtsova N.S., Kovachikova S., Sokolova E.Yu. LADOGAWG. Study of the deep conductivity structure of the lake-Ladoga region: quasi 3D- and 3D-models. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск. 2017. С. 287–291.
- Hjelt S.E. Deep electromagnetic studies of the Baltic shield // J. Geophysics. 1984. V. 55. № 3. P. 144–152.
- Kolesnikov V.E., Nilov M.Yu., Zhamaletdinov A.A. Multi-electrode electrical profiling in the Northern Ladoga area. Practical and theoretical aspects of geological interpretation of gravitational, magnetic and electrical fields / D. Nurgaliev, N. Matveeva (eds.). Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer Nature Switzerland. Proceedings of the 45-th Uspensky International Geophysical seminar. Kazan State University. 2018.
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A.D., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardaniants I.L. and the BEAR Working Group. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 535–558.
- Naganjaneyulu K., Santos M. Geophysical signatures of fluids in a reactivated Precambrian collisional suture in central India // Geoscience Frontiers. 2011. V. 2(3). P. 289–301.
- Pajunpää K. Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland // Geophys. J. R. astr. Soc. 1987. V. 91. P. 657–666.
- Rokityansky I.I., Sokolova E.Yu., Golubtsova N.S., Kovachikova S., LADOGA WG. Magnetovariational studies of Lake Ladoga crustal conductivity anomaly: from discovery in 70 th to understanding of its spatial behavior and deep structure on modern observations. 17th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Kyiv, Ukraine. 2018. 14–17. May. P. 1–6.
- Stepanov K., Antashchuk K., Saraev A. Clarification of Pasha Rift Structure in Pasha-Ladoga Basin Based on AMT and Gravity Data // Geophysica. 2016. V. 51. № 1–2. P. 51–67.
- Sokolova E.Yu., Varentsov I.V. EMTESZ WG, The RRMC technique fights highly coherent EM noise. Protokoll über das 21 Kolloquium “EM Tiefenforschung”. 2005. P. 124–136.
- Varentsov I.V., Sokolova E.Yu. EMTESZ-Pomerania WG. The magnetic control approach for the reliable estimation of transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project. Study of geological structures containing well-conductive complexes in Poland // Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sci. 2005. C-95 (386). P. 67–80.
- Varentsov I.V. Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data. Electromagnetic sounding of the Earth's interior. Methods in geochemistry and geophysics / Ed. Spichak V.V. Elsevier. 2007. V. 40. P. 189–222.
- Weckmann U. Making and Breaking of a Continent: Following the Scent of Geodynamic Imprints on the African Continent Using Electromagnetics // Surv Geophys. 2012. V. 33. P. 107–134.
- Yin Y., Unsworth M., Liddell M., Pana D., Craven J.A. Electrical resistivity structure of the Great Slave Lake shear zone, northwest Canada: implications for tectonic history // Geophys. J. Int. 2014. V. 199. P. 178–199.
- Zhamaletdinov A.A., Rokityansky I.I., Sokolova E.Yu. Evolution of ideas on the nature and structure of Ladoga anomaly of electrical conductivity. Practical and theoretical aspects of geological interpretation of gravitational, magnetic and electrical fields / D. Nurgaliev and N. Matveeva (eds.). Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Springer Nature Switzerland. Proceedings of the 45-th Uspensky International Geophysical seminar. Kazan State University. 2018.

Electrical Conductivity of the Basement of East European Platform in the Southeastern Ladoga Region from Magnetotelluric Data

V. A. Kulikov^{a, *}, E. Yu. Sokolova^{b, c, **}, A. P. Ionicheva^{a, ***},
P. Yu. Pushkarev^{a, ****}, and A. G. Yakovlev^a

^a*Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^c*All-Russian Research Geological Oil Institute (VNIGNI), Moscow, 105118 Russia*

^{*}*e-mail: vic@nw-geophysics.ru*

^{**}*e-mail: sokol_l@mail.ru*

^{***}*e-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com*

^{****}*e-mail: pavel_pushkarev@list.ru*

The paper presents the results of magnetotelluric soundings conducted in 2018–2019 in the southeastern Ladoga region for studying the deep geoelectric structure of the basement of the East European platform at the junction of the Russian plate with the Fennoscandinavian shield. The results of noise suppression processing of the observations on the 180-km Tikhvin–Vinnitsa profile and the invariant analysis of the obtained magnetotelluric and magnetovariational transfer operators are discussed. A geoelectrical model of the Earth's crust along the profile down to a depth of 50 km is constructed by two-dimensional inversion. The model clearly reflects the structures of the southeastern segment of the Ladoga crustal conductivity anomaly confined to the extended Ladoga-Bothnian tectonic zone at the boundary of the Archaean (AR) and Proterozoic (PR) domains of the shield. Fundamental features of the similarity between the new 2D model of the Ladoga anomaly and the similar model previously constructed for the Vyborg–Suojärvi profile on the northern coast of Lake Ladoga are revealed: the general southwestward dip of the crustal conductive structures and a significant increase in their integral conductivity at the depths of 15–20 km within the southern segments of the profiles. A preliminary geological interpretation of the constructed resistivity section along the Tikhvin–Vinnitsa line is presented.

Keywords: magnetotelluric sounding, geoelectrical structure, noise suppression processing of observations