

УДК 550.837.211

**В.А. Куликов¹, А.П. Ионичева², А.В. Королькова³, П.Ю. Пушкарев⁴,
Е.Ю. Соколова⁵, А.Г. Яковлев⁶**

ТРЕХМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ В ЮЖНОМ ПРИЛАДОЖЬЕ

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1*

ФГБУН «Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН» 123242, Москва, Б. Грузинская, 10, стр. 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Schmidt Earth Physics Institute RAS, 123242, Moscow, B. Gruzinskaya, 10, bd. 1

Представлены результаты интерпретации магнитотеллурических зондирований, выполненных в южном Приладожье. При проведении 3D инверсии использованы как новые данные, полученные рабочей группой ЛАДОГА в 2018–2021 гг., так и данные опорного профиля 1-ЕВ (участок «Петля»), отработанного в начале 2000-х гг. На основе результатов автоматической инверсии, проведенной в программе ModEM (Egbert and Kelbert), построена трехмерная геоэлектрическая модель земной коры до глубины 60 км, отражающая сложное неоднородное строение исследуемой территории.

В геоэлектрической модели выделены две аномальные зоны коровой электропроводности юго-восточного и северо-восточного направления, первая из них — продолжение известной Ладожской аномалии. Наличие второй проводящей структуры подтверждает результаты одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных И.И. Рокитянским в разных участках Восточно-Европейской платформы в начале 1980-х гг.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, 3D обратные задачи.

The article presents the results of the interpretation of magnetotelluric soundings performed in the Southern Ladoga region. When performing the 3D inversion, both new data obtained by the LADOGA working group in 2018–2021 and data from the profile 1-EV (the “Loop” section) worked out in the early 2000s were used. Based on the results of automatic inversion performed in the ModEM program (Egbert and Albert), a three-dimensional geoelectric model of the earth’s crust to a depth of 60 km is constructed, which shows the complex heterogeneous structure of the studied territory.

In the geoelectric model, two anomalous zones of core electrical conductivity of the south-eastern and north-eastern directions are distinguished, the first of which is a continuation of the well-known Ladoga anomaly. The presence of the second conducting structure confirms the results of single magnetovariational sounding performed by Igor Ivanovich Rokityansky in different parts of the East European Platform in the early 80s of the last century.

Keywords: magnetotellurics, MT-surveys, crustal high-conductive anomalies, resistivity image, 3D inversion.

Введение. Ладожская аномалия электропроводности — одна из наиболее изученных электроразведочными методами коровых аномалий на территории России. Большая часть магнитотеллурических (МТ) зондирований выполнена вкрест регионального простираения аномалии в северном Приладожье. Предшественниками были построены комплекс-

ные профильные геоэлектрические и комплексная геолого-геофизическая модели, а по МТ-данным проведена 3D-инверсия [Ковтун и др., 1998; Минц, Соколова, 2018; Соколова и др., 2019].

Впервые аномалия выявлена и описана И.И. Рокитянским [Рокитянский и др., 1981, 1982]. Большой вклад в изучение Ладожской аномалии внесли

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail:* vic@nw-geophysics.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; *e-mail:* yaroslavtseva.anna@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, студентка; *e-mail:* sanya.korolkokokova@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail:* pavel_pushkarev@list.sokol

⁵ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, вед. науч. с., канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* sokol_l@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. физ.-мат. н.; *e-mail:* mail@nw-geo.ru

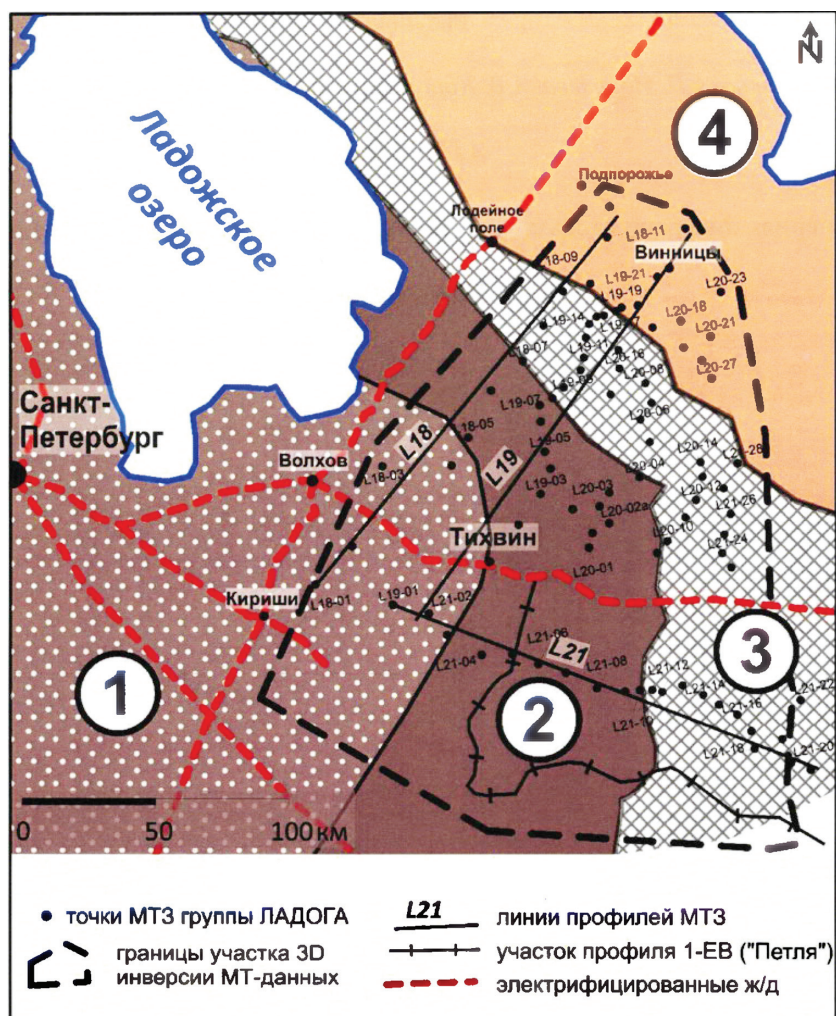


Рис. 1. Положение точек МТЗ в южном Приладожье: 1, 2 — Южно-Финляндский гранулитогнейсовый пояс (1 — гранулитогнейсы; 2 — мафитовые гранулиты); 3 — Ладожско-Ботническая зона; 4 — Карельский блок

А.А. Ковтун [Ковтун и др., 1998, 2011] и А.А. Жамалетдинов [Жамалетдинов и др., 2018].

Южная часть Ладожской аномалии изучена в меньшей степени. Это связано с двумя причинами: а) сильной зашумленностью территории электрифицированными железными дорогами Санкт-Петербург–Мурманск и Санкт-Петербург–Вологда; б) усилением экранирования глубинных структур за счет увеличения мощности и, соответственно, суммарной продольной проводимости (S) осадочного чехла. В 1990-е гг. и в начале 2000-х гг. в рамках программы «Московская синеклиза» были проведены работы методом МТЗ в Северном и Южном Приладожье под руководством И.С. Фельдмана [Фельдман, Эринчек, 2009].

С 2013 г. дальнейшее изучение глубинной электропроводности в районе Ладого-Ботнической шовной зоны ведется рабочей группой ЛАДОГА, объединившей сотрудников кафедры геофизики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, Института геологии КарНЦ РАН и сервисной геофизической компании ООО «Северо-Запад».

На первом этапе, в период с 2013 по 2016 г., основные работы группы ЛАДОГА проводились по-прежнему в Северном, а также на северо-востоке Приладожья [Соколова и др., 2016; Куликов и др.,

2019]. Начиная с 2018 г. основной объем работ перенесен в Южное Приладожье, где с 2018 по 2021 г. были организованы 4 экспедиции, снято более 80 точек МТЗ (рис. 1), по данным которых построены и проанализированы карты параметров тензора импеданса, проведен первый вариант трехмерной инверсии МТ-данных для Южного Приладожья [Куликов и др., 2019, 2021]. Цель нашей работы — представление методики и анализ актуальных результатов этих магнитотеллурических исследований.

Специфика района работ. Район Южного Приладожья существенно отличается от района предыдущих работ на территории северного и северо-восточного обрамления Ладожского озера по уровню промышленных шумов. Высокий уровень помех здесь связан с работой электрифицированных железных дорог Москва–Мурманск и Санкт-Петербург–Вологда. Утечки тока, происходящие на подстанциях дороги, представляют собой преимущественно сигналы типа «ступень» или «одиночный импульс» (рис. 2) и в большей степени проявляются в электрическом поле. Широкий спектр таких сигналов приводит к искажению кривых магнитотеллурического зондирования в широком частотном диапазоне.

Радиус влияния железных дорог зависит не только от амплитуды токов утечки, но и от геоэлектриче-

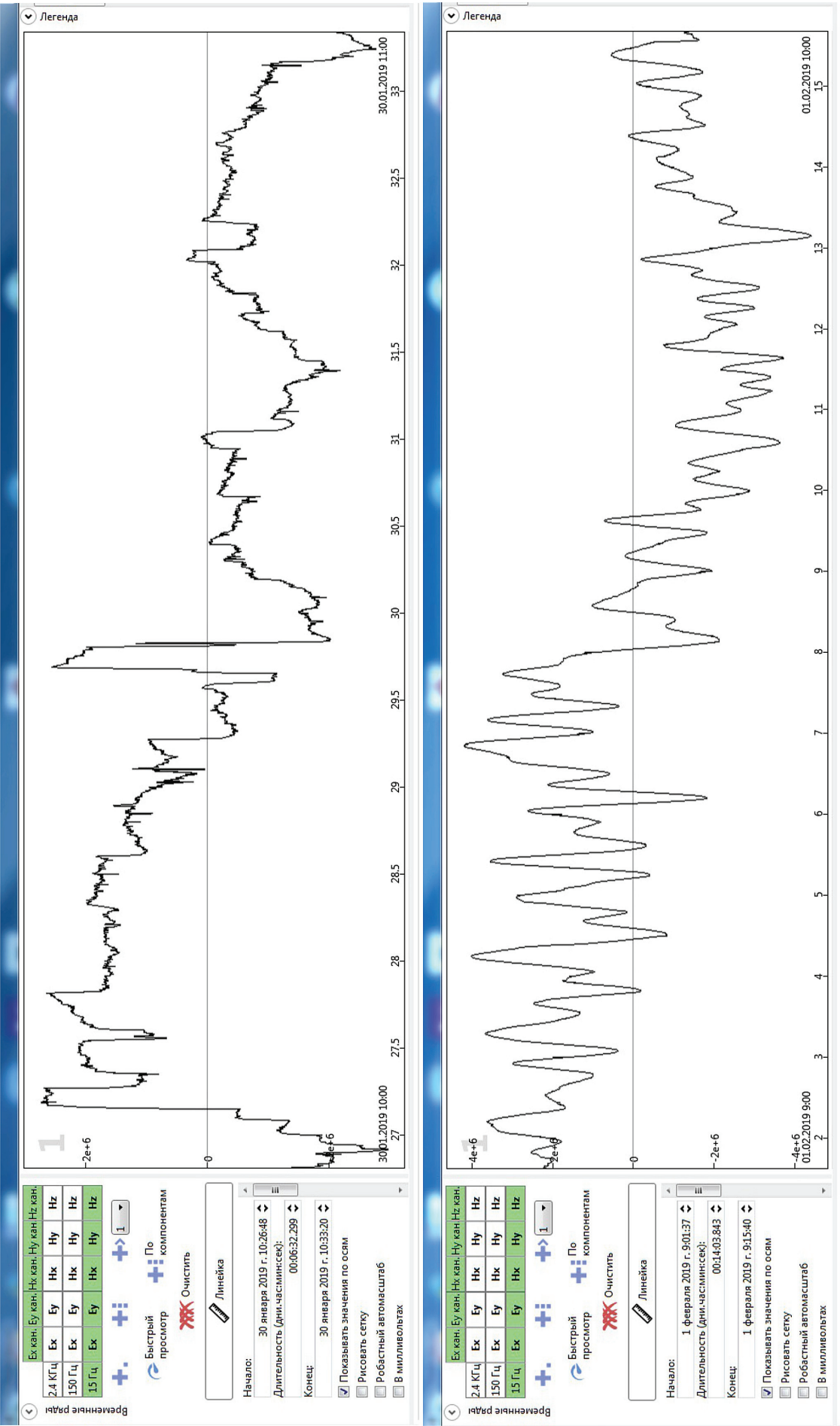


Рис. 2. Окно программы Eri-Kit (ООО «Северо-Запад»). Примеры 10-минутных записей компонент электрического поля на точке с высоким (вверху) и низким (внизу) уровнем промышленных помех

ского разреза, а точнее, от величины гальванической константы $g = \sqrt{S_1 T_2}$, где S_1 — продольная проводимость первого слоя (осадочного чехла), а T_2 — поперечное сопротивление второго слоя (кристаллического фундамента) [Алексанова и др., 2003]. Поэтому максимальное расстояние, на котором фиксируются помехи, наблюдается на северо-восточном фланге площади работ над Карельским блоком архейского возраста, где удельное сопротивление фундамента составляет тысячи–десятки тысяч омметров. Над коровыми проводящими зонами Ладжской аномалии радиус влияния помех от железных дорог уменьшается за счет уменьшения параметра T_2 и происходит заметное улучшение качества данных [Kulikov et al., 2020].

Более интенсивные помехи фиксируются от железной дороги Москва–Мурманск. В меридиональной компоненте они проявляются на расстоянии до 70–80 км. Железная дорога Санкт-Петербург–Вологда проявляется в большей степени на широтной электрической компоненте, радиус ее влияния меньше и составляет около 20–30 км. С необходимостью удаления от железных дорог связана неравномерная сеть измерений и большие пропуски на отдельных профилях.

Для подавления помех использована методика синхронных измерений с базовой станцией. В 2019 г. базовая станция находилась в центре профиля работ в районе п. Алёховщина, в 2021 г. базовая станция была расположена в п. Александровка (Калужская область) на базе геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Для расчета компонент горизонтального магнитного тензора (ГМТ) использованы записи с магнитной обсерватории Института физики Земли имени О.Ю. Шмидта, расположенной в п. Борок (Ярославская область). Данные обсерватории взяты из открытых источников.

Материалы и методы исследований. Объем измерений и качественный анализ данных. При проведении магнитотеллурических работ использовано два вида аппаратуры: низкочастотные станции LEMI-417М (ЛЦ ИКИ, Украина) и магнитотеллурические станции МЭРИ-ПРО, разработанные в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва), с датчиками магнитного поля IMS-010 (ООО «Вега», г. Санкт-Петербург). Станции LEMI-417М использовали только на начальной стадии работ в Южном Приладожье, а основной объем измерений выполнен со станциями «МЭРИ-ПРО». Регистрировали пять компонент МТ-поля.

Общий объем измерений методом МТЗ в южном Приладожье с 2018 по 2021 г. составил более 80 физических точек (ф. т.). В 2018, 2019 и 2021 гг. работы выполняли (рис. 1) в профильном варианте по линиям Кириши–Подпорожье (профиль L18), Тихвин–Винницы (профиль L19) и Струнино–Долоцкое (профиль L21). По этим профилям выполнена двумерная интерпретация и построены глубинные

модели удельного электрического сопротивления (УЭС) [Kulikov et al., 2020].

Для качественного площадного анализа данных и трехмерной инверсии к материалам, полученным группой ЛАДОГА в 2018–2021 гг., добавлены результаты магнитотеллурических работ на профиле 1-ЕВ (участок «Петля», рис. 1). Измерения на опорном профиле 1-ЕВ проводили в начале 2000-х гг., причем выполненные силами «НПП Спецгеофизика» и ООО «Северо-Запад» наблюдения на участке «Петля» были одними из первых работ на территории России с аппаратурой MTU-5 канадской фирмы Phoenix Geophysics [Берзин и др., 2002]. Чтобы согласовать результаты работ группы ЛАДОГА со старыми данными профиля 1-ЕВ, зимой 2021 г. были проведены повторные измерения на отдельных точках опорного профиля (рис. 3).

Качественный анализ МТ-данных включал в себя расчет и построение карт кажущегося сопротивления для серии периодов, карт фаз импеданса, параметров неоднородности и асимметрии, а также построение амплитудных и фазовых полярных диаграмм, индукционных векторов, компонент ГМТ.

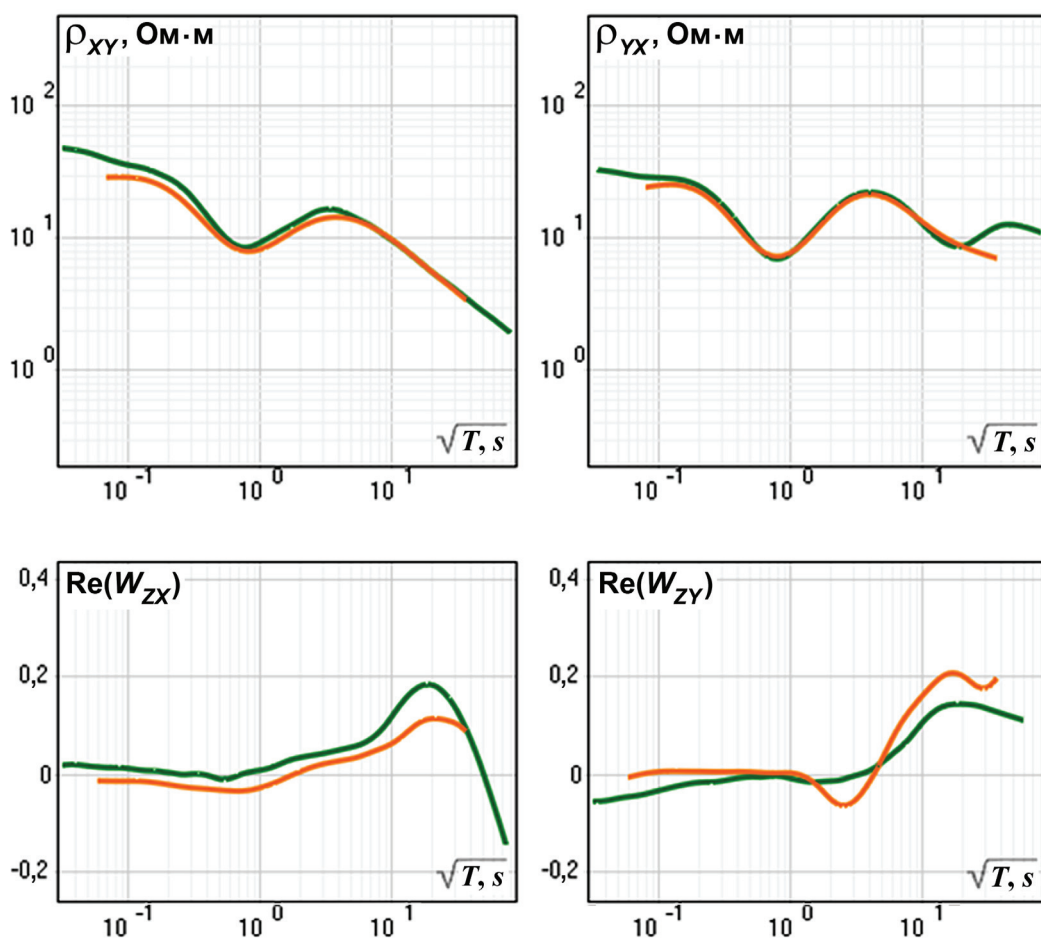
Карты эффективной компоненты кажущегося сопротивления (ρ_{ef}) и амплитуды реальных индукционных векторов Визе для периода 100 с приведены на рис. 4. На основе поведения индукционных векторов в ручном режиме были приблизительно восстановлены оси проводников, которые показаны пунктирными линиями.

На основе качественного анализа МТ-данных можно выделить два основных направления проводящих структур в земной коре. В северной части площади работ главное направление северо-западное, отвечающее простиранию Ладжско-Ботнической зоны. На основании поведения индукционных векторов можно заключить, что при продвижении на юг направление проводника изменяется с северо-западного на субмеридиональное. Общая ширина аномальной области составляет около 80 км, но максимальные значения проводимости прослеживаются по ее северо-восточному флангу. В южной части площади работ превалирует северо-восточное направление проводников, что отвечает азимуту простирания Южно-Финляндского гранулитового пояса (4 на рис. 1).

Азимуты осей коровых проводников совпадают с направлениями зон экстремумов, выделяющихся на полных горизонтальных градиентах гравитационного и магнитного полей (рис. 5).

Трехмерная инверсия МТ-данных. Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных осуществлялась с помощью программы ModEM [Egbert, Kelbert, 2012; Kelbert et al., 2014]. Программа ModEM, как и большинство программ решения обратной задачи, основана на минимизации Тихоновского функционала $\Phi(m, d)$, состоящего из двух слагаемых — функционала невязки и стабилизирующего функционала:

Рис. 3. Сравнение кривых кажущегося удельного сопротивления (вверху) и реальных компонент векторов Визе (внизу) для данных, полученных в 2021 г. (зеленые линии), и на опорном профиле 1-ЕВ (оранжевые линии)



$$\Phi(m, d) = (d - f(m))^T C_d^{-1} (d - f(m)) + \nu (m - m_0)^T C_m^{-1} (m - m_0),$$

где d — наблюдаемые данные; m — модель, $f(m)$ — оператор прямой задачи (модельные данные), C_d — матрица погрешностей данных; m_0 — стартовая или априорная модель; C_m — матрица гладкости модели; ν — параметр регуляризации, отвечающий за вклад априорной модели или сглаживания в общий функционал невязки; T — транспонирование матрицы.

Вычисление прямой задачи $f(m)$ основано на методе конечных разностей, т. е. вся исследуемая область разбивается на конечное число кубов с постоянным удельным электрическим сопротивлением (УЭС) внутри каждого из них. При решении обратной задачи использован метод нелинейных сопряженных градиентов (NLGG). Параметры C_m и C_d отвечают за сглаживание модели в разных направлениях XYZ (C_m) и за веса данных (C_d). Эти параметры вариативны, и от их выбора может зависеть качество получаемых результатов.

Для проведения трехмерной инверсии необходимо найти компромисс между желаемой детальностью модели и объемом данных. Общий объем данных для инверсии составил 105 ф. т. Вычисления проводили на 31 периоде от $4 \cdot 10^{-3}$ до $4 \cdot 10^3$ с с расчетом 5 точек на декаду.

Веса компонент тензора импеданса определяют их погрешностью, вычисленной как процент от

$\sqrt{|(Z_{xy} \cdot Z_{yx})|}$. Так, для компонент Z_{xy} и Z_{yx} ошибка задавалась на уровне 5%, для дополнительных компонент — 15%. При использовании типпера (W_z) его погрешность была принята равной 5%.

В качестве стартовой модели использовано однородное полупространство с сопротивлением 1000 Ом·м. По горизонтали модель была разбита на ячейки размером 3000×3000 м, мощность первого слоя составила 50 м, высота остальных ячеек увеличивалась с глубиной. Сглаживание модели (C_m) для инверсии задавалось различным в направлениях X (0,3), Y (0,3) и Z (0,4).

Качество решения обратной задачи определяется расхождением между наблюдаемыми и модельными данными. В программе ModEM для оценки точности подбора используется параметр RMS (среднеквадратичная невязка, нормированная на погрешность данных). Мы использовали в качестве критерия остановки вычислений условие $RMS \leq 3$. Однако решение обратной задачи осуществляется с использованием нескольких компонент данных, которые имеют разную размерность и погрешность. Мы вычислили среднеквадратические невязки для отдельных компонент магнитотеллурических данных.

При $RMS=2,7$ невязка по основным компонентам кажущегося сопротивления составила 23%, по фазе импеданса — 7° , по модулю вещественного индукционного вектора — 0,07. Это относительно

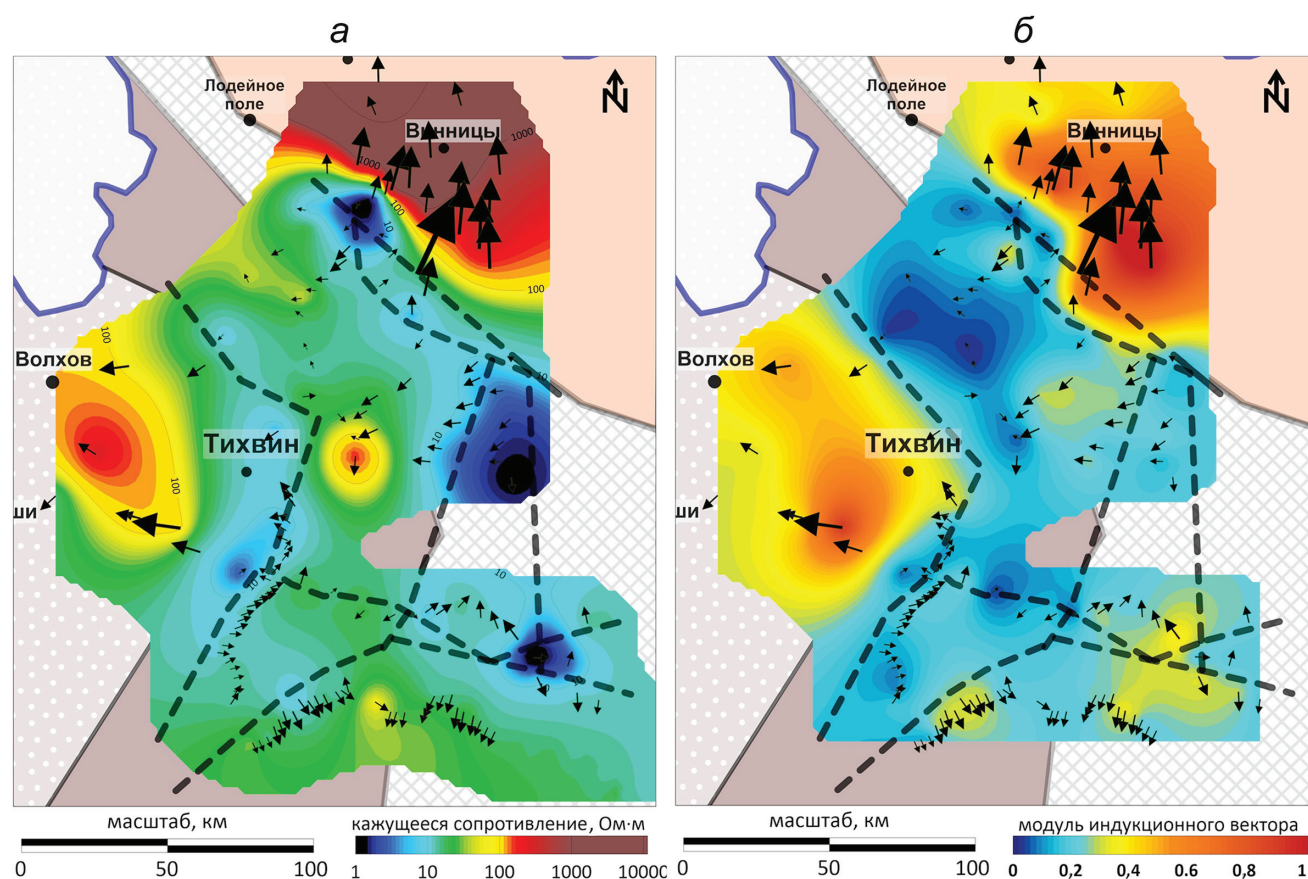


Рис. 4. Карта эффективной компоненты кажущегося сопротивления (а) и модуля индукционного вектора на периоде 100 с (б). Черными стрелками показаны действительные индукционные векторы (в конвенции Визе — «от проводника»), по результатам анализа амплитуд и азимутов которых намечены оси коровых проводников (пунктирные линии)

высокие невязки для 1D и 2D интерпретации, но хороший результат для трехмерной инверсии в условиях высокого уровня помех.

Результаты исследований и их обсуждение.
Анализ итоговой 3D модели удельного сопротивления. Результаты трехмерной инверсии можно представить в виде куба значений удельного электрического сопротивления, набора карт-срезов УЭС для разных глубин, набора глубинных разрезов УЭС по отдельным линиям. В объемном виде демонстрировать модель лучше во время визуального представления результата расчета, например, во время презентации. Для площадного анализа и сопоставления с геологической картой или картами потенциальных полей лучший способ представления результатов 3D инверсии — карты-срезы для разной глубины. На рис. 6 приведены такие карты для глубины 5 и 20 км.

Наиболее яркий результат 3D инверсии — выделение Ладожского корового проводника, ось которого лежит примерно на линии продолжения северо-восточного берега Ладожского озера. На меньшей глубине детальность результатов выше, и можно видеть загиб Ладожского проводника на юг.

Вторая область низких значений УЭС находится на пересечении профилей 1-ЕВ и L21. Предположительно этот проводник имеет северо-восточное направление и проходит дальше на север несколько восточнее г. Тихвин. К сожалению, в этой части

площади работ откартировать его положение затруднительно из-за пересечения электрифицированной железной дорогой Санкт-Петербург–Вологда.

Для уточнения глубинного строения коровых проводников и сравнения с предыдущими вариантами двумерной интерпретации мы сопоставили глубинные разрезы УЭС, полученные по 3D и 2D инверсиям по профилям L18, L19 и L21. Профили L18 и L19 имеют северо-восточное направление и пересекают практически перпендикулярно Ладожскую аномалию.

Основные черты проводящих зон земной коры на юго-востоке Приладожья, полученные по результатам 2D и 3D инверсий, близки (рис. 7, а–в). Наиболее крупная проводящая структура Ладожской аномалии имеет наклон около 40° в юго-западном направлении, погружаясь под Южно-Финляндский пояс. Минимальные значения УЭС в ее пределах фиксируются в районе профиля L19 на глубине 12–20 км. На северном профиле L18 присутствует еще одна проводящая субвертикальная зона, расположенная западнее (под точками 4, 5) и соединяющаяся на глубине около 20 км с основной осью Ладожского проводника (рис. 6, а, б). Эта зона приурочена к известной палеорифтовой структуре — Ладожско-Пашскому грабену, который изучали ранее аудиоманнителлурическими методами [Stepanov et al., 2016].

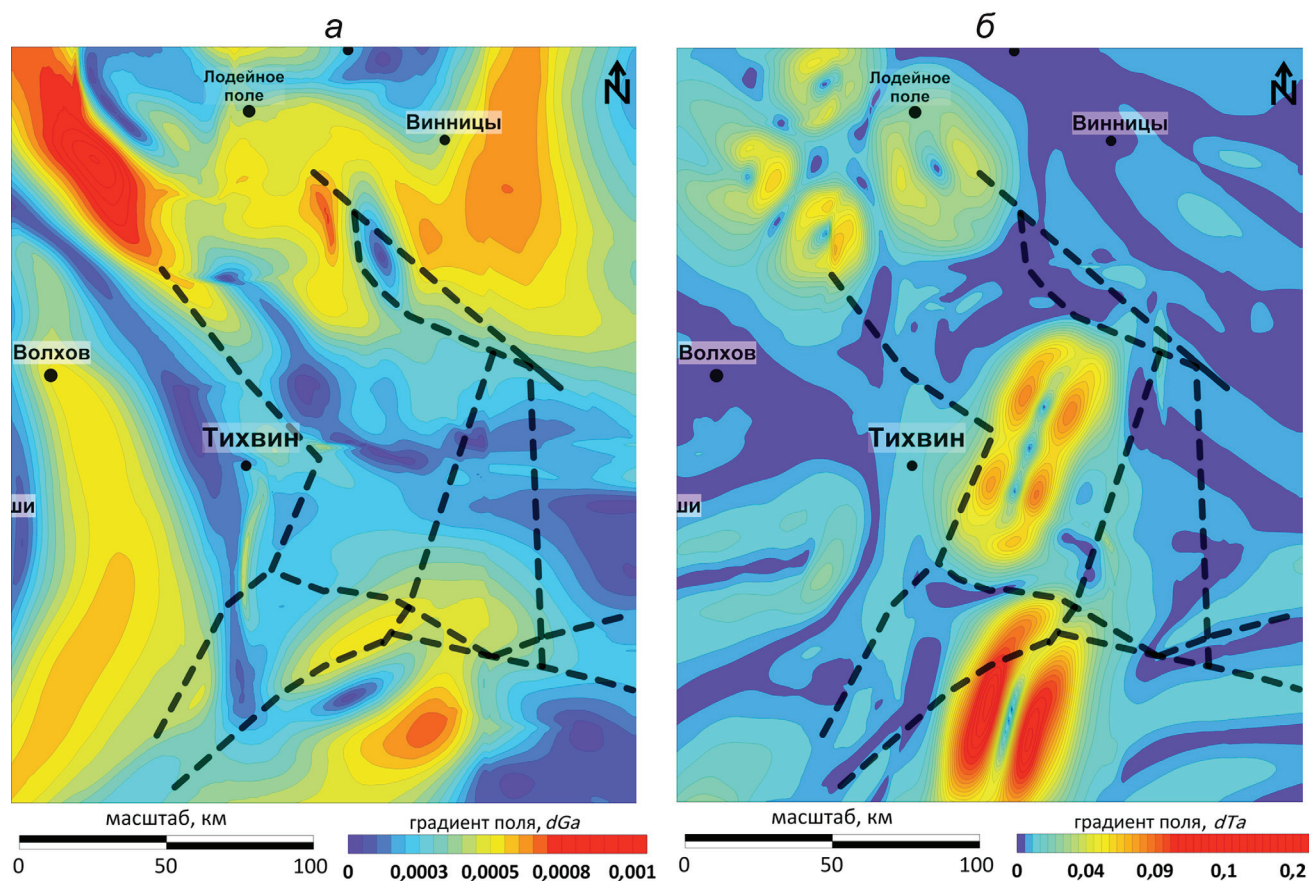


Рис. 5. Карты амплитуды полных горизонтальных градиентов аномального гравитационного (а) и магнитного (б) полей

В рамках эквивалентности обратной задачи мы получили по профилям L18 и L19 альтернативные модели УЭС с более пологим погружением корового проводника в западном направлении [Куликов и др., 2020]. Выбор такой модели обоснован результатами работ по профилю Выборг–Суоярви, где геоэлектрическая модель была согласована с региональными комплексными геофизическими данными (финские геотраверсы), и гравиметрической и геологической информацией [Минц, Соколова, 2018]. Однако нельзя исключить, что в южной части структура корового проводника, трассирующего границы между крупными блоками земной коры ВЕП, изменяется, а угол наклона становится круче.

Отметим также, что чем больше глубина, тем выше неоднозначность решения обратной задачи. Это связано еще и с тем, что длительность записей, выполненных рабочей группой ЛАДОГА, не превышала 20 ч, тогда как для изучения средне- и нижнекоровой глубины желательны выполнять измерения в режиме ГМТЗ с длительностью записи не менее 2 сут.

Азимут профиля L21 близок к широтному. Профиль заложен в первую очередь для изучения глубинной структуры проводника северо-восточного направления, ортогонального Ладожской зоне. Геоэлектрические срезы по профилю L21 по результатам 2D и 3D инверсий имеют много общих черт, но заметно различаются по уровню значений удельного сопротивления (рис. 7). В западной части профиля

наблюдается субвертикальная проводящая зона, уходящая на глубину более 50 км. Наклон проводника западный, угол наклона $75\text{--}80^\circ$. По результатам 2D инверсии минимальные значения УЭС в пределах аномальной зоны фиксируются на глубине от 8 до 25 км и составляют десятки доли омметра. По результатам 3D инверсии минимальный уровень сопротивления составляет около 100 Ом·м. Восточная часть профиля, как это видно на картах кажущихся параметров и карт-срезов УЭС (рис 4, 6), проходит параллельно субширотным проводящим структурам, которые проявляются за счет бокового влияния на геоэлектрических разрезах в виде ложного горизонтального проводника.

Заключение. Качественный анализ МТ-данных показывает, что в Южном Приладожье мы имеем дело со сложным трехмерным геоэлектрическим строением земной коры, определяемым суперпозицией ряда тектонических структур, включая палеорифтовые разного простирания. Тектонические (и геоэлектрические) структуры, протягивающиеся в северо-западных румбах, соподчинены простиранию Ладожско-Ботнической зоны, а северо-восточные — отвечают изгибу Южно-Финляндского гранулитового пояса [Минц и др., 2010]. Если для построения геоэлектрической модели севера Ладожской аномальной зоны можно было использовать в качестве основного инструмента интерпретации двумерную инверсию, то в сложных условиях Южного При-

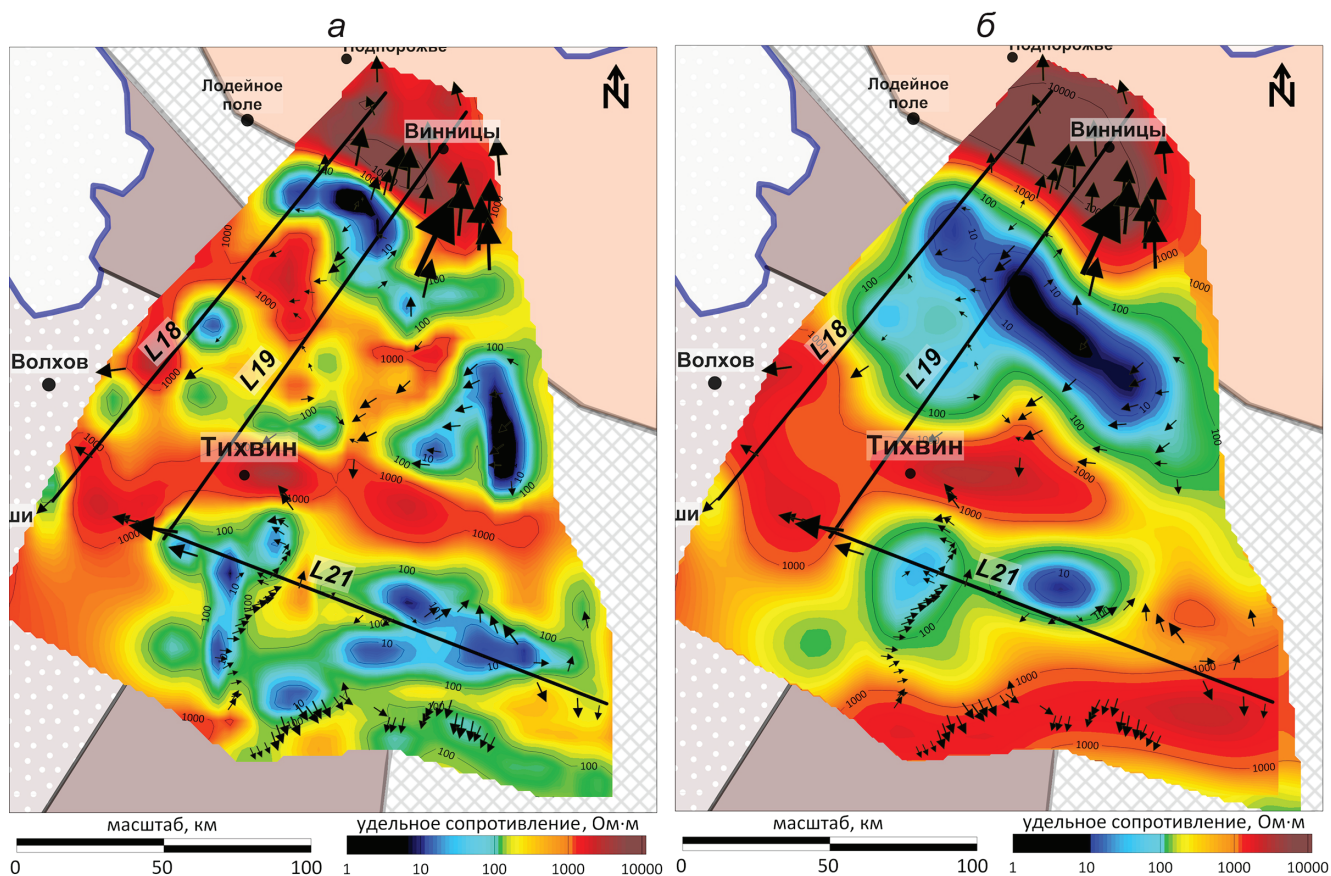


Рис. 6. Результаты 3D инверсии, удельное электрическое сопротивление на глубине 5 км (а) и 20 км (б)

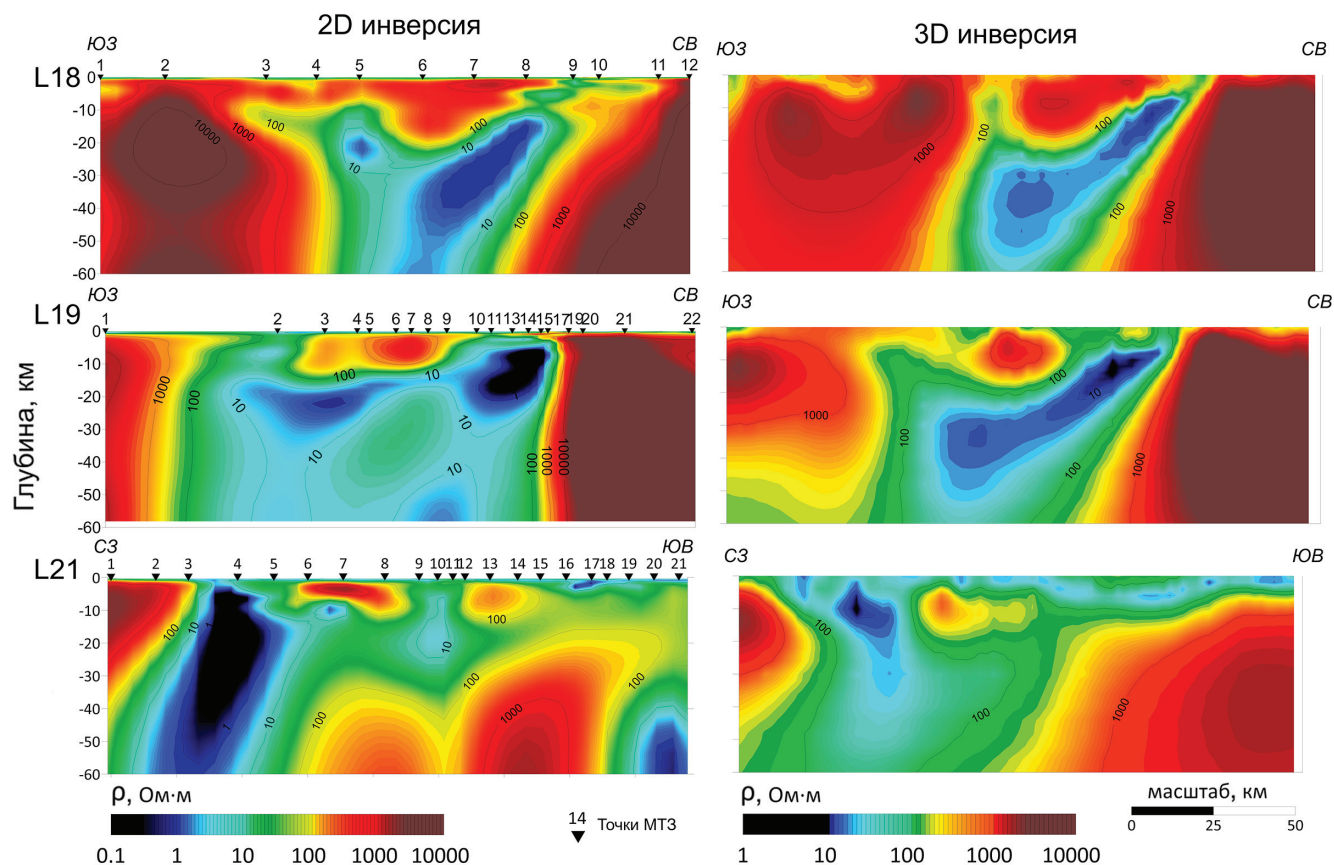


Рис. 7. Сравнение глубинных моделей УЭС по линиям профилей L18, L19, L21 (сверху вниз). Положение профилей показано на рис. 1

ладожья единственным возможным инструментом интерпретации МТ-данных остается трехмерная инверсия, учитывающая влияние всех аномалиеобразующих объектов. Сложное геологическое строение изучаемого региона отражается и в потенциальных геофизических полях в виде наложения аномалий разной ориентировки.

Применение аппарата современной 3D инверсии позволило нам получить принципиально новый результат — построить объемную модель структуры Ладожской аномалии коровой электропроводности в Южном Приладожье. В рамках 3D инверсии мы объединили данные магнитотеллурических зондирований, полученных в разные годы и с разной

аппаратурой, в частности, согласовали материалы рабочей группы ЛАДОГА и профиля 1-ЕВ.

Контрастная проводящая структура, выявленная в западной части профиля L21, имеет северо-восточное простирание и, возможно, маркирует северную границу широкого палеорифтового пояса, разделяющего Фенноскандию, с одной стороны, и Сарматия и Волго-Уралию — с другой.

Существование этой проводящей структуры было предсказано И.И. Рокитянским в работе [Рокитянский и др., 1982] по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных в разных участках северо-востока Восточно-Европейской платформы в начале 1980-х гг.

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.
- 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 имени В.В. Федынского. М.: ГЕОС, 2002. 1 с.
- Жамалетдинов А.А., Колесников В.Е., Скороходов А.А. и др. Результаты электропрофилирования на постоянном токе в комплексе с АМТЗ по профилю, пересекающему Ладожскую аномалию // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 2. С. 91–110.
- Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц И.Л. и др. Строение коры и мантии по профилю Суоярви–Выборг по магнитотеллурическим данным // Вестн. СПбГУ. 1998. Сер. 4. Вып. 4. С. 25–34.
- Ковтун А.А., Варданыц 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., Ионичева А.П., Королькова А.В. и др. Анализ магнитотеллурических данных в южном Приладожье // Тр. IV Междунар. геолого-геофизической конф. и выставки «ГеоЕвразия–2021. Геологоразведка в современных реалиях» Т. I. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. С. 331–334.
- Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Десятов Д.О. и др. Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю Кириши–Подпорожье 2018 г. // Тез. Междунар. геолого-геофизической конф. и выставки «ГеоЕвразия–2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». М., 2019. С. 446–452.
- Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Ионичева А.П. и др. Электропроводность фундамента Восточно-Европейской платформы в юго-восточном Приладожье по данным магнитотеллурических зондирований // Физика Земли. 2020. № 6. С. 66–85.
- Минц М.В., Соколова Е.Ю. Рабочая группа LADOGA. Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Геология докембрия. 2018. № 2. С. 34–61.
- Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабяниц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. В 2-х т. М.: Геокарт; ГЕОС. 2010.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на северо-западе европейской части СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 101–106.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности // Геофиз. журн. 1981. № 3. С. 97–99.
- Соколова Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А. и др. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. 2016. № 1. С. 48–61.
- Соколова Е.Ю., Минц М.В., Голубцова Н.С. и др. Глубинные модели Ладожской аномалии электропроводности по результатам синхронных МТ-МВ зондирований на профиле Выборг–Суоярви и в юго-восточном Приладожье // Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. С. 284–302.
- Фельдман И.С., Эрнчек Ю.М. Геоэлектрическая модель земной коры вдоль профиля I-ЕВ (Балтийский щит — Прикаспийская синеклиза) // Мат-лы Всеросс. школы-семинара по электромагнитным исследованиям Земли. Москва, 2009. М., 2009.
- Egbert G.D., Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 189. P. 167–251.
- Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Comput. Geosci. 2014. Vol. 66. P. 40–53.
- Kulikov V.A., Sokolova E.Y., Ionicheva A.P. et al. Electrical conductivity of the basement of east European platform in the southeastern Ladoga region from magnetotelluric data // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2020. Vol. 56, N 6. P. 789–807.
- Stepanov K., Antashchuk K., Saraev A. Clarification of Pasha Rift Structure in Pasha-Ladoga Basin Based on AMT and Gravity Data // Geophysica. 2016. Vol. 51, N 1. P. 51–67.

Поступила в редакцию 28.04.2021

Поступила после доработки 30.06.2021

Принята к публикации 13.12.2021