

УДК 550.372

РЕЗУЛЬТАТЫ СИНХРОННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ И МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ В РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОЙ АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Е.Ю. Соколова¹, Н.С. Голубцова², А.А. Ковтун³, В.А. Куликов², И.Н. Лозовский¹, П.Ю. Пушкарев², И.И. Рокитянский⁴, Я.В. Таран², А.Г. Яковлев²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Б. Грузинская, 10, Москва, Россия, 123242; e-mail: sokol_l@mail.ru

² МГУ имени М.В. Ломоносова. Ленинские Горы, Москва, Россия, 119234.

³ Санкт-Петербургский государственный университет. Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, Россия, 199034

⁴ Институт геофизики им. С.И. Субботина НАНУ. Пр. Палладина, 32, Киев, Украина, 03680.

Аннотация. В статье представлены результаты завершеного полевого этапа синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований вдоль профиля «Выборг-Суоярви-2», секущего область Ладожской аномалии электропроводности (ЛА) на юго-востоке Балтийского щита. Описываются методика эксперимента и граф обработки длиннопериодных и широкополосных данных, нацеленный на борьбу с индустриальными шумами. Результаты инвариантных разложений полученных локальных и двухточечных передаточных функций электромагнитного поля используются для оценки размерности и простираения геоэлектрических структур. Приведены результаты интерпретации зондирований в рамках квази-двумерного подхода, выполнено трехмерное моделирование региональной структуры электропроводности области ЛА.

Ключевые слова. Синхронные магнитотеллурические зондирования, передаточные функции, аномалия электропроводности, Балтийский (Фенноскандинавский) щит.

RESULTS OF SYNCHRONOUS MAGNETOTELLURIC AND MAGNETOVARIAIONAL SOUNDINGS IN THE AREA OF LADOGA CONDUCTIVITY ANOMALY

E.Yu. Sokolova¹, N.S. Golubtsova², A.A. Kovtun³, V.A. Kulikov², I.N. Lozovsky¹, P.Yu. Pushkarev², I.I. Rokityansky⁴, Ya.V. Taran², A.G. Yakovlev²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, Russia, 123242; e-mail: sokol_l@mail.ru

² Lomonosov MSU. Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234.

³ Saint Petersburg state university. Universitetskaya nab., 7-9, St. Petersburg, Russia, 199034.

⁴ Institute of Geophysics NAS of Ukraine. Palladin av., 32, Kiev, Ukraine, 03680.

Abstract. The paper presents methods and actual results of new profile MT/MV sounding implemented across Lake Ladoga conductivity anomaly (LA) on the South-Eastern part of the Baltic Shield. The data of synchronous broad-band and long-period observations are used to suppress abundant noises and construct frequency dependences of local and inter-stations transfer functions. The images of MT/MV responses and their invariant transformations are analyzed to estimate strike and dimensionality of geoelectric structures. First results of MT data inversion in quasi-2D manner as well as 3D modeling of regional conductivity structure of LA zone are discussed.

Key words. Synchronous magnetotelluric soundings, transfer functions, conductivity anomaly, Baltic (Fennoscandian) shield.

ВВЕДЕНИЕ. Магнитотеллурические и магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования, использующие естественное переменное электромагнитное (ЭМ) поле Земли для получения информации о распределении электропроводности в ее недрах, сегодня являются неотъемлемой частью комплекса геофизических методов изучения внутренней архитектуры докембрийских платформ (кратонов). Геоэлектрические образы этих древнейших геологических объектов планеты помогают восстановить структурно-вещественные особенности глубинного строения последних, а также используются для реконструкции ранней истории формирования земной коры. Так, уникальную информацию о процессах консолидации кратонов получают при изучении линейно-вытянутых коровых проводников, отмечающих шовные зоны на границе архейских и протерозойских блоков практически на всех древнейших щитах [10]. Результаты применения МТ-метода для

исследований этих тектонических сутур (в другой терминологии – пограничных мобильных поясов) представлены материалами по Западно- и Восточно-Европейским платформам в работах [17–19], по Африканской платформе – в обзоре [24], а также рядом работ по другим кратонам. Многие авторы связывают их возникновение с процессами аккреционно-коллизийной тектоники и/или рифтинга, сопряженными с этапами магматизма и металлогении.

На территории Восточно-Европейского кратона (ВЕК) наиболее крупными объектами подобного рода являются Кировоградская и Ладожско-Ботническая аномалии электропроводности, обнаруженные на Украинском и Балтийском щитах в 70–80-е годы XX века методом магнитовариационного профилирования [2, 14, 20] и позднее изучавшиеся с привлечением МТ-зондирований [11, 19]. В последние годы благодаря усовершенствованию измерительной аппаратуры и внедрению синхрон-

ных технологий зондирований в их изучении был достигнут заметный прогресс [1, 8, 22]. Необходимым развитием этих исследований стали новые зондирования Ладужской аномалии, которые были осуществлены в 2013–2015 гг. геоэлектриками из МГУ, СПбГУ, ИФЗ РАН и ООО «Северо-Запад», объединившимися в Рабочую группу LADOGA.

Настоящая статья представляет результаты завершенного полевого этапа синхронного МТ/МВ-зондирования Ладужской аномалии электропроводности вдоль профиля «Выборг–Суоярви-2» (рис. 1, 3) с использованием аппаратных платформ Phoenix и LEMI, обеспечивающих изучение электропроводности недр от близповерхностных горизонтов до верхнемантийных глубин. Описываются методика эксперимента и граф обработки его данных, нацеленный на борьбу с распространенными в регионе промышленными ЭМ-шумами. Анализируются полученные локальные и двухточечные передаточные функции ЭМ-поля и их инвариантные характеристики, дающие оценку размерности и простирания геоэлектрических структур. В контексте результатов, предшествующих МТ/МВ-работ на Ладоге, освещен первый опыт интерпретации данных новых зондирований, полученный с помощью их квази-2D-инверсий и 3D-моделирования региональной структуры электропроводности области ЛА.

Очерк истории изучения Ладужской аномалии электропроводности

Ладужско-Ботническая зона (ЛБЗ) долгоживущих разломов маркирует сочленение архейского Карельского и протерозойского Свекофенского мегаблоков Балтийского (Фенноскандинавского) щита и простирается с СЗ на ЮВ (рис. 1). Долгоживущие разломы зачастую характеризуются разнообразной минерализацией пород, включая сульфидную, графитовую и другие. В пределах ЛБЗ находятся месторождения медных, никелевых и полиметаллических руд, олова и колчедана. В разломах, связанных с разуплотнением, прогревом и дегазацией Земли, могут находиться флюиды. Все эти объекты обнаруживаются по аномалиям геофизических полей и параметров, причем наиболее четкими являются именно аномалии электропроводности. Этим обусловлена большая информативность данных глубинной геоэлектрики как метода определения структурно-вещественных параметров земной коры области ЛБЗ.

Электромагнитные наблюдения в российской части ЛБЗ, в Приладожье, были начаты в конце 70-х годов XX века Институтом геологии КФ АН СССР, НИИФ Ленинградского университета, Ленинградским горным институтом и Институтом геофизики АН УССР. Технология МТЗ тех лет в этом сложно построенном регионе с резкими приповерхностными неоднородностями не давала надежных региональных результатов. Однако метод магнитовариационного профилирования (МВП), предложенный в ИГ АН УССР [14], позволил и в таких условиях выявлять глубинные аномалии электропроводности и определять их основные параметры.

Анализ материалов первых наблюдений МВП на Балтийском щите 1977–1978 гг. в районе Онежского

озера – северного и южного Приладожья – позволил обнаружить и локализовать крупную региональную аномалию электропроводности [15]. Сводка результатов этих исследований приведена на рис. 2, представляющем полученные вектора индукции и оконтуренную по ним, а также с учетом аномального поля в горизонтальных компонентах, Ладужскую аномалию электропроводности (ЛА). Передаточные функции МВП по линии вкрест Ладужского озера определялись относительно базового пункта – обсерватории ЛО ИЗМИРАН в п. Красное (KR).

По пологому максимуму в интервале периодов 10–30 мин частотных характеристик H_a/H_0 , Z/H_0 суммарная проводимость площади поперечного сечения ЛА была оценена в $2 \cdot 10^8$ См·м. Соотношение северной и восточной аномальных магнитных компонент в максимуме частотной характеристики, а также векторы индукции, «собирающие» аномальное поле со значительно большей территории, указывали на генеральное СЗ-ЮВ простирание ЛА. Асимметрия профильной кривой H_a/H_0 была предварительно проинтерпретирована как указание на погружение проводящего тела к северу (рис. 2, б). Для более определенных выводов требовалось сгущение пунктов МВ-наблюдений.

Однако дальнейшее изучение ЛА продвигалось в рамках совершенствования методики МТЗ. МТ-зондирования, выполненные на Карельском перешейке сотрудниками ЛГИ, и аудиоманнитотеллурические (АМТ) зондирования ЛГУ послужили материалом для построения первой геоэлектрической модели разреза ЛА [6]. В конце 90-х годов она была уточнена по данным МТЗ, проведенным НИИФ ЛГУ в расширенном диапазоне периодов (10^{-3} – 10^4 с) по линии Выборг – Суоярви, включая прилегающие к ЛБЗ с севера и юга Центральном Карельском и Выборгском блоках. Разрез сопротивлений, построенный по итогам анализа расширенного набора данных, дал оценки глубины верхней кромки проводника, интегральной проводимости его сечения (два ядра: $1,5 \times 10^8$ и $0,6 \times 10^8$ См·м), а также параметры «нормальной» коры Выборгского и Ялонварского блоков [12].

МТ-исследования 90-х годов углубили знание об аномальной структуре ЛА, однако более четкое ее разрешение, необходимое для получения значимых геотектонических выводов, было лимитировано как недостаточной детальностью наблюдений, так и отсутствием тензорных МТ-данных. Так, геоэлектрическая модель сечения ЛА, построенная на базе 1D-подхода, не позволила ни подтвердить, ни опровергнуть свидетельства результатов сейсмического профилирования МОВЗ в поддержку гипотезы рифтовой природы Ладужской зоны, и актуальность новых МТ-наблюдений, способных дать материал для проведения высоко разрешающих 2D-инверсий, стала очевидной [9, 12].

Новый этап МТ/МВ-зондирований Ладужской аномалии

Возрождение интереса к дальнейшему изучению Ладужской аномалии, этого важного репера для построения эволюционных и металлогенических мо-

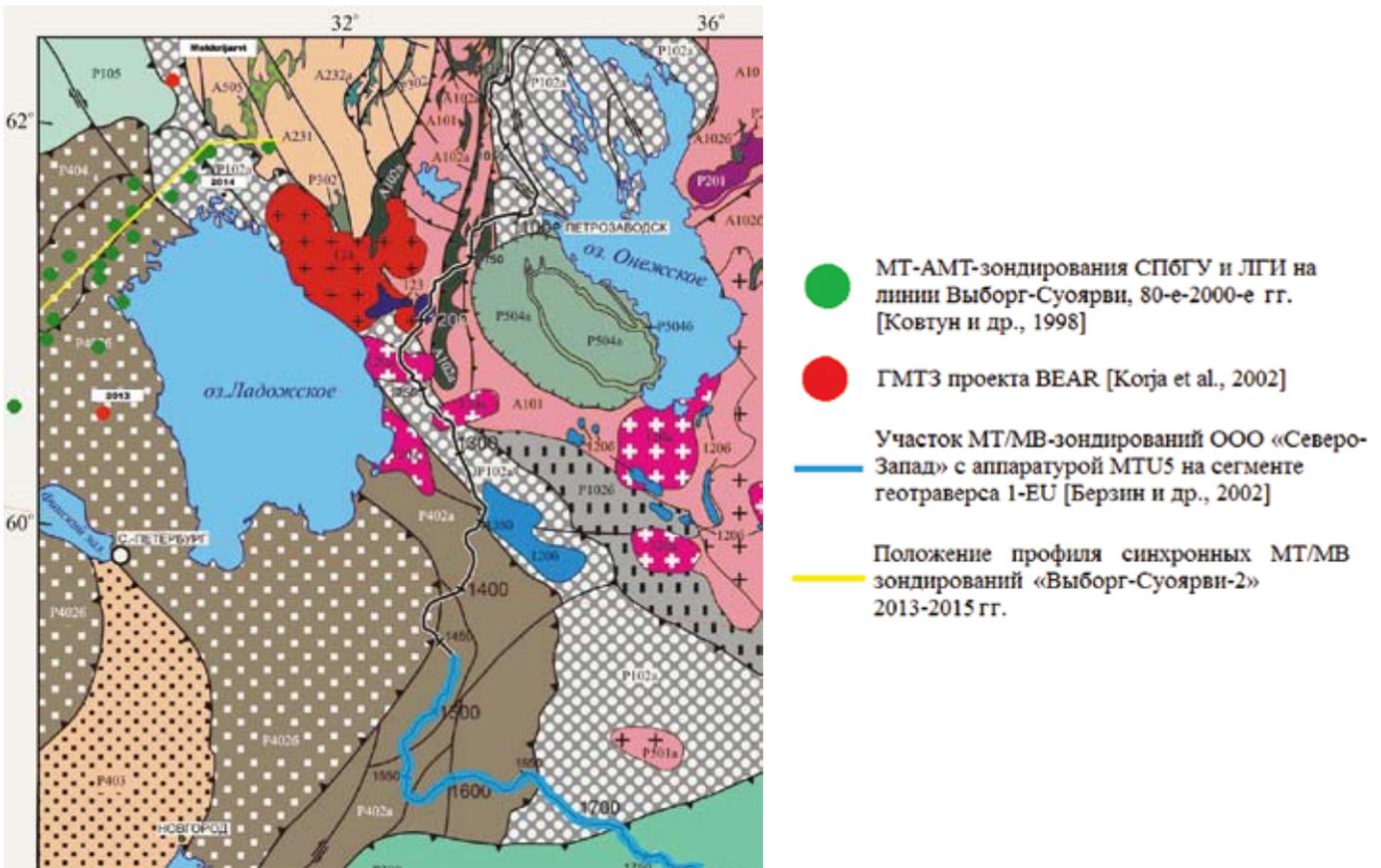


Рис. 1.

Профильные МТ/МВ-зондирования области Ладужской аномалии электропроводности, вынесенные на фрагмент геолого-тектонической карты 1:2500000 ранне-докембрийского фундамента Восточно-Европейского кратона [Минц и др., 2010]

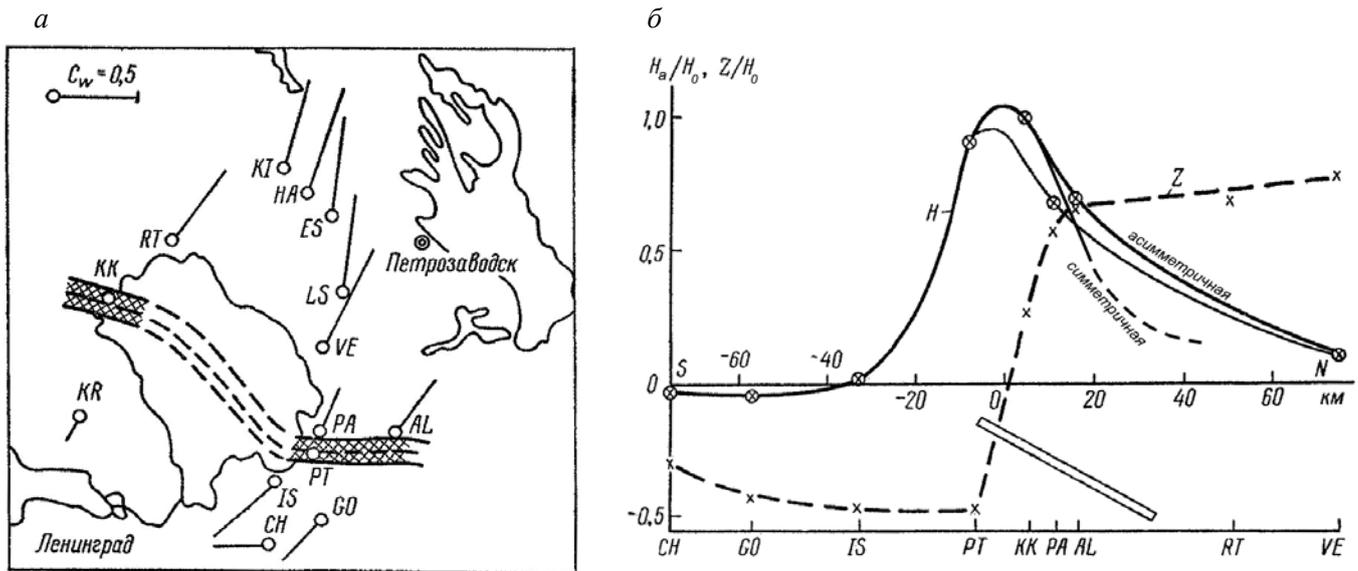


Рис. 2.

Представления о Ладужской аномалии электропроводности (ЛА), полученные в [Рокитянский и др., 1981] (с корректировкой автора).
 а – пункты МВ-наблюдений и действительные части векторов Визе для периодов 10–30 мин; штриховка и пунктир – участки проводника ЛА, надежно определенные по горизонтальным компонентам аномального поля и гипотетические соответственно;
 б – профильные графики нормированных на H_0 (северную компоненту в базовом пункте) аномальных северной H_a и вертикальной Z компонент магнитного поля

делей Балтийского щита, стало естественным сегодня благодаря прогрессу как в технологиях МТ-зондирования, так и в методах анализа их данных. Возможность существенно расширить представления о структуре и природе коровых проводников Ag-Pt шовных зон с помощью углубленного изучения ЛА мотивировала исследователей из СПбГУ, МГУ, ИФЗ РАН и ООО «Северо-Запад» к созданию в этих целях Рабочей группы LADOGA. Важными факторами при этом были: опыт региональных МТ-исследований СПбГУ; новые эффективные методы анализа МТ/МВ-данных, развиваемые московскими геоэлектриками; аппаратный парк и финансовая поддержка ООО «Северо-Запад», а также поддержка РФФИ. За 2013–2015 гг. группой LADOGA на профиле «Выборг–Суоярви-2» была выполнена внушительная серия детальных МТ/МВ-зондирований в их современной постановке (рис. 1, 3).

Особенности полевых наблюдений

Современная практика МТ/МВ-исследований опирается на совместный анализ электромагнитных полей, зарегистрированных синхронно на всей съемочной сети; в базовом варианте – в рядовых точках зондирования и в общем удаленном пункте наблюдений. Эти схемы зондирования позволяют улучшить шумоподавление при оценивании традиционных локальных передаточных операторов – тензоров импеданса $[Z]$ и матриц Визе-Паркинсона $[W]$, а также

получать новые ресурсы для интерпретации – двухточечные операторы например, – связывающий горизонтальные поля в двух точках магнитный тензор $[M]$ и другие [3, 7].

Новый этап изучения Ладужской аномалии электропроводности включал три полевые кампании 2013–2015 гг. и отличался от предшествующих применением цифровой аппаратуры с GPS-навигацией и использованием синхронных схем наблюдения в разведочном и глубинном диапазонах. Разведочные зондирования выполнялись двумя комплектами аппаратуры MTU-5 канадской фирмы Phoenix Geophysics (индукционные магнитные датчики, пятикомпонентная регистрация с дискретизацией 2400, 150 и 15 Гц), а опорные глубинные – двумя станциями LEMI-417M Львовского филиала ИКИ НАН Украины (феррозондовые датчики, 1-секундная дискретизация) с шагом 5–7 км и 20–25 км вдоль профиля соответственно (рис. 3).

Наблюдения в рядовых пунктах велись в попарно-синхронном режиме и сопровождалась одновременными записями третьей станцией MTU-5 в базовом пункте. В первый год полевых работ базовый пункт был организован на геомагнитной стационарной базе СПб филиала ИЗМИРАН в п. Красное (п. 2013), а для последующих кампаний – на северном берегу Ладужского озера (п. 2014). По договоренности с финскими коллегами в качестве дополнительных удаленных баз для длиннопериодных наблюдений использовались две ближайшие геомагнитные



Рис. 3.
Синхронные МТ/МВ-зондирования 2013–2015 гг. на профиле «Выборг–Суоярви-2»

обсерватории Финляндии – Нурмиярви и Меккриярви – с непрерывной режимной 1-секундной регистрацией магнитного поля. Опора на данные нескольких синхронных удаленных баз при проведении зондирований в области между Выборгом и Суоярви, изобилующей ЭМ-помехами от объектов промышленности и военных артефактов (рис. 4, а), была принципиальной особенностью методики эксперимента, позволяющей применить современные приемы шумоподавляющей обработки. Учитывалась также близость района работ к области полярного электроджета, неоднородное поле которого существенно искажает традиционные оценки передаточных функций, получаемые по данным зондирований на большей части Балтийского щита [21].

Качество регистрации ЭМ-полей полевой аппаратурой проверялось тестами идентичности записей станций. Рис. 4, б демонстрирует типичный пример хороших (вплоть до 2500–3000 с по электрическим каналам и 5000 с – по магнитным) результатов проверки в диапазоне 15 Гц по материалам трех станций MTU5, осуществлявших зондирования в 2 рядовых и удаленной базовой точках в 2014 и 2015 гг. Аналогичные проверки в двух высокочастотных диапазонах также показывали хорошее совпадение результатов оценивания [Z] и [W] по записям трех станций.

Полевые работы первой полевой кампании (2013 г.), проведенные ООО «Северо-Запад» в опытном однодневном режиме одновременных МТ- и ГМТ-зондирований, подтвердили работоспособность и эффективность этого комплекса на базе имеющихся аппаратных платформ и выявили необходимость удлинения времени наблюдения LEM1 на каждой точке для получения оценок на периодах до 10000 с. В сезон 2014 года два отряда МГУ сделали по 4 трехдневных синхронных ГМТ-зондирования LEM1, также успешно протестировав станции на идентичность. Позднее, во время МТ-кампаний ООО «Северо-Запада» 2014 и 2015 гг., в непосредственной близости от всех пунктов ГМТЗ были поставлены также и зондирования Phoenix (рис. 3), что позволило в итоге построить опорные частотные МТ- и МВ-кривые в диапазоне семи декад (0,003–10000) с.

Обработка данных зондирований и анализ полученных МТ/МВ-откликов

При обработке данных синхронных зондирований «Выборг–Суоярви-2» параллельно применялись два подхода. Первый использовал стандартный граф аппаратуры Phoenix для оценивания передаточных операторов (код SSMT2000) и программу Corrector (ООО «Северо-Запад») для последующей ручной отбраковки некондиционных оценок, итогового сглаживающего осреднения и анализа качества результата по критерию выполнения дисперсионных амплитудно-фазовых соотношений. Оценивание второй «рукой» выполнялось с помощью исследовательской программы PRC-MTMV [7], обеспечивающей отбор отрезков записи для обработки по критерию однородности внешнего магнитного поля между рядовой и базовой точками, оценивание передаточных функций с помощью автоматических

робастных процедур по серии различных временных окон и многоуровневое медианное осреднение получаемых оценок. В опытном варианте для сильно зашумленных точек применялась и программа Remote (H+E), использующая как магнитные, так и электрические удаленные каналы для дополнительной коррекции шума [16].

Рис. 5 представляет методический граф построения итоговых сводных МТ-кривых по данным разведочных и длиннопериодных зондирований с помощью трех программных комплексов (на примере обработки однодневных наблюдений Phoenix и трехдневных LEM1 в пространственно совмещенных т. L33 и т. 2, рис. 3).

Примененный граф обработки опирался на шумоподавляющий потенциал используемых программных средств, кросс-верификацию их результатов и финальное робастное осреднение, подавляющее остаточные искажения и стабилизирующее длиннопериодные отклики итоговых LP (LEM1+Phoenix) оценок, в том числе с использованием трех удаленных баз. Таким образом, несмотря на высокий уровень ЭМ-шума в регионе, для 8 опорных пунктов с шагом около 25 км вдоль линии ВС-2 были получены МТ/МВ-отклики в сводном интервале (0,003–6000/10000) с (рис. 5). По материалам остальных 37 рядовых зондирований Phoenix проведена двухточечная *Remote Reference* (RR) обработка с использованием наблюдений в базовых пунктах 2013, 2014 по программам SSMT2000 и Corrector и для большинства пунктов получены кондиционные частотные зависимости импеданса и типпера в интервале периодов 0,003–1000/4000 с (рис. 8). Ведется углубленная обработка длиннопериодного (15 Гц) диапазона программой PRC-MTMV с использованием баз в двух финских обсерваториях для продления оценок в область длинных периодов (пример на рис. 6).

Важным аспектом обработки наблюдений на профиле «Выборг–Суоярви-2» стало оценивание горизонтального магнитного тензора [M], проводимое с опорой на имеющиеся синхронные записи во всех удаленных пунктах (2013, 2014, МЕК, NUR и попарно-синхронные рядовые). Рис. 6, а показывает пример подобного оценивания и дает представление о хорошей сходимости результатов при использовании разных программ. Именно в анализируемом здесь 15 Гц диапазоне, в силу глубинных задач исследования ЛА, проводилась массовая обработка с оценкой [M]. Прием транзитивного пересчета оценок горизонтальных тензоров в рядовых точках (Т) с одной базы (Б1) на другую (Б2) по формуле $[M^{T/B2}] = [M^{B1/B2}] \cdot [M^{T/B1}]$ с использованием предварительно установленных связей двух баз $[M^{B1/B2}]$ позволил получать дополнительную оценку их точности для каждого пункта и обобщить представления о характерных границах диапазона надежного оценивания [M] на каждую из баз. Так, для оценок М/МЕК в большинстве точек это был интервал (20–2000/4000) с (рис. 6, б), аналогичный – для оценок на базу 2014, но несколько более узкий – для базы 2013 и удаленной Nurmijarvi. Главным назначением процедуры транзитивного пересчета является

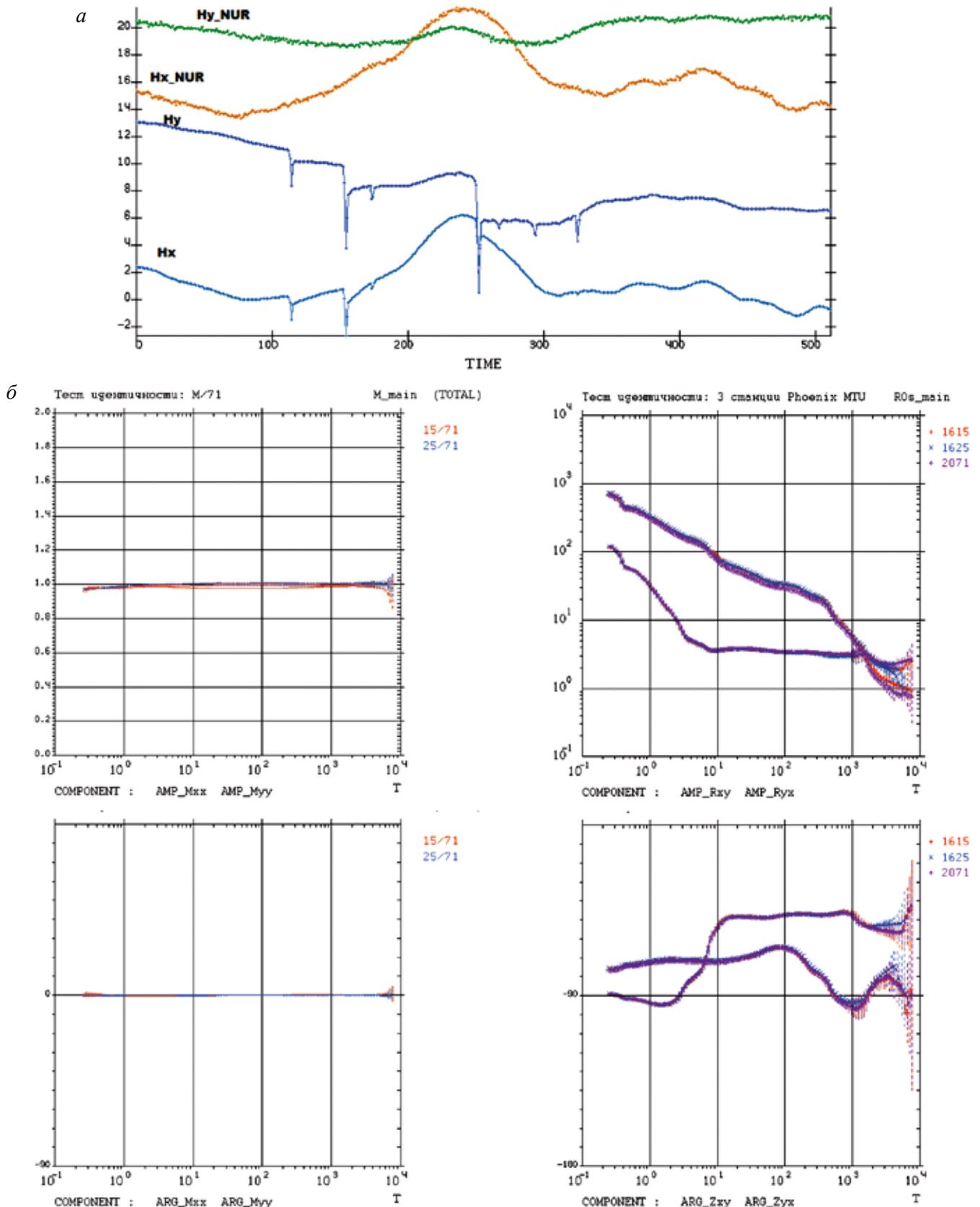


Рис. 4.

a – зашумленные временные ряды наблюдений LEMI в т. 5 в сопоставлении со свободными от помех синхронными записями финской обсерватории Нурмиярви; горизонтальная ось – время в секундах; вертикальная – амплитуда магнитного поля (в условных единицах);
б – результаты теста идентичности для трех станций MTU5 (№1615, 1625, 2071); оценивание MT/MВ передаточных функций по однодневным синхронным записям в одном и том же пункте зондирования: левые панели – оценки амплитуд (AMP) и фаз (ARG) главных (xx, yy) компонент горизонтального магнитного тензора M/2071; правые панели – локальные (одноточечные, SS, Single Site) оценки кажущихся сопротивлений и фаз для главных компонент тензора импеданса.
 Здесь и далее шкалы вертикальных осей: относительные единицы (Mxx, yy), градусы (ARG) и Ом-м (AMP_Roxy, ux); горизонтальные оси – период (с)

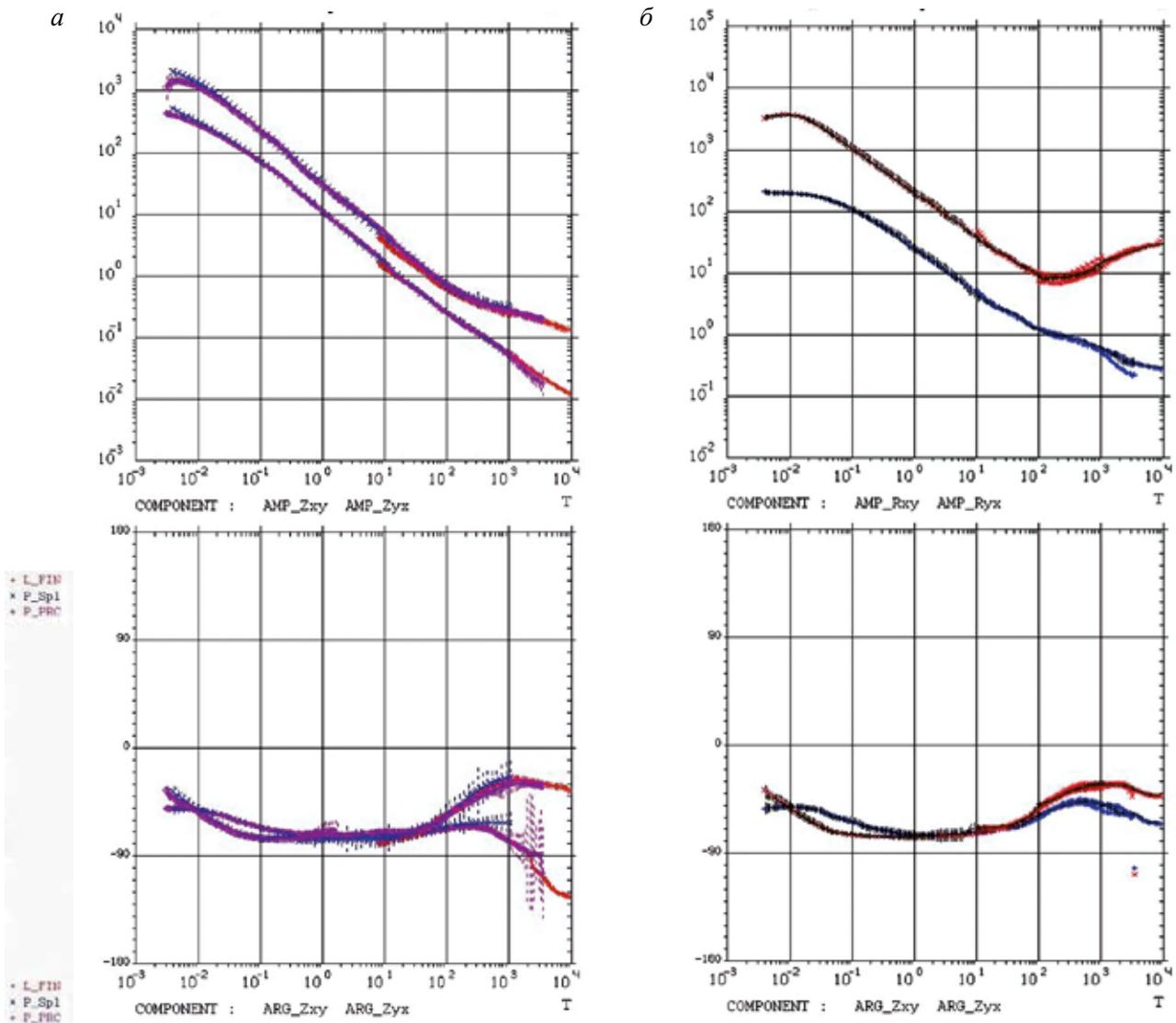


Рис. 5.

Методика обработки МТ-ГМТ-зондирований:

а – оценки амплитуд (AMP_Z, мВ/км·нТ) и фаз (ARG_Z, град.) главных компонент импеданса: по данным LEMI (L_FIN – робастное осреднение локальных одноточечных, Single Site, SS, оценок и 3 оценок, полученных по методу удаленной базы, Remote Reference, RR, с привлечением наблюдений в пунктах MEK, NUR и 2014 по программе обработки PRC-MTMV); и по данным Phoenix (сплайны, проведенные программой Corrector по RR оценкам SSMT2000 с использованием наблюдений на базе 2014, P_Spl, а также по программе PRC-MTMV, P_PRC);

б – получение итоговой широкодиапазонной частотной зависимости LP_Fin (черные кривые) с помощью робастного осреднения кажущихся сопротивлений (с предварительной коррекцией статического сдвига) и фаз фазового тензора, соответствующих трем импедансным оценкам (*а*), здесь показанных облаками красных (ху-компоненты) и синих (ух) крестиков

ся сведение различных оценок к единому референсному пункту «нормального» горизонтального поля. По результатам анализа частотно-профильных распределений компонент и инвариантов тензоров [M] (рис. 7, 8) единым базовым пунктом выбран L-04 на СВ окончании профиля в зоне «нормальной» коры Ag блока, на который будут нормированы все итоговые профильные распределения горизонтальных полей для последующих 2D-инверсий.

Анализ инвариантов передаточных операторов, оцененных по материалам разведочных и глубинных зондирований профиля ВС-2, проводился с опорой на менее искаженные МВ- и фазовые МТ-данные по методике, близкой к описанной в [Бердичевский и др., 2010]. Длиннопериодные данные

($T > n \cdot 100$ с) демонстрируют характерную устойчивую поляризацию ЭМ-откликов в направлении $\sim 50-55^\circ$ СВ (рис. 7, 9).

В более высокочастотной области (\sim до $n \cdot 10$ с) выявлены многообразные локальные эффекты верхнекоровых неоднородностей, в том числе гальванические эффекты и эффекты канализации токов (до $n \cdot 100$ с), проявленные в девиации индукционных векторов и главных осей экстремальных эллипсов фазовых тензоров (рис. 7).

В псевдорезазах фаз (например для фазы эффективного импеданса, рис. 10) можно выделить отклик протяженной проводящей структуры в коре центральной части профиля. Результаты инвариантного анализа данных [M] в широком диапазо-

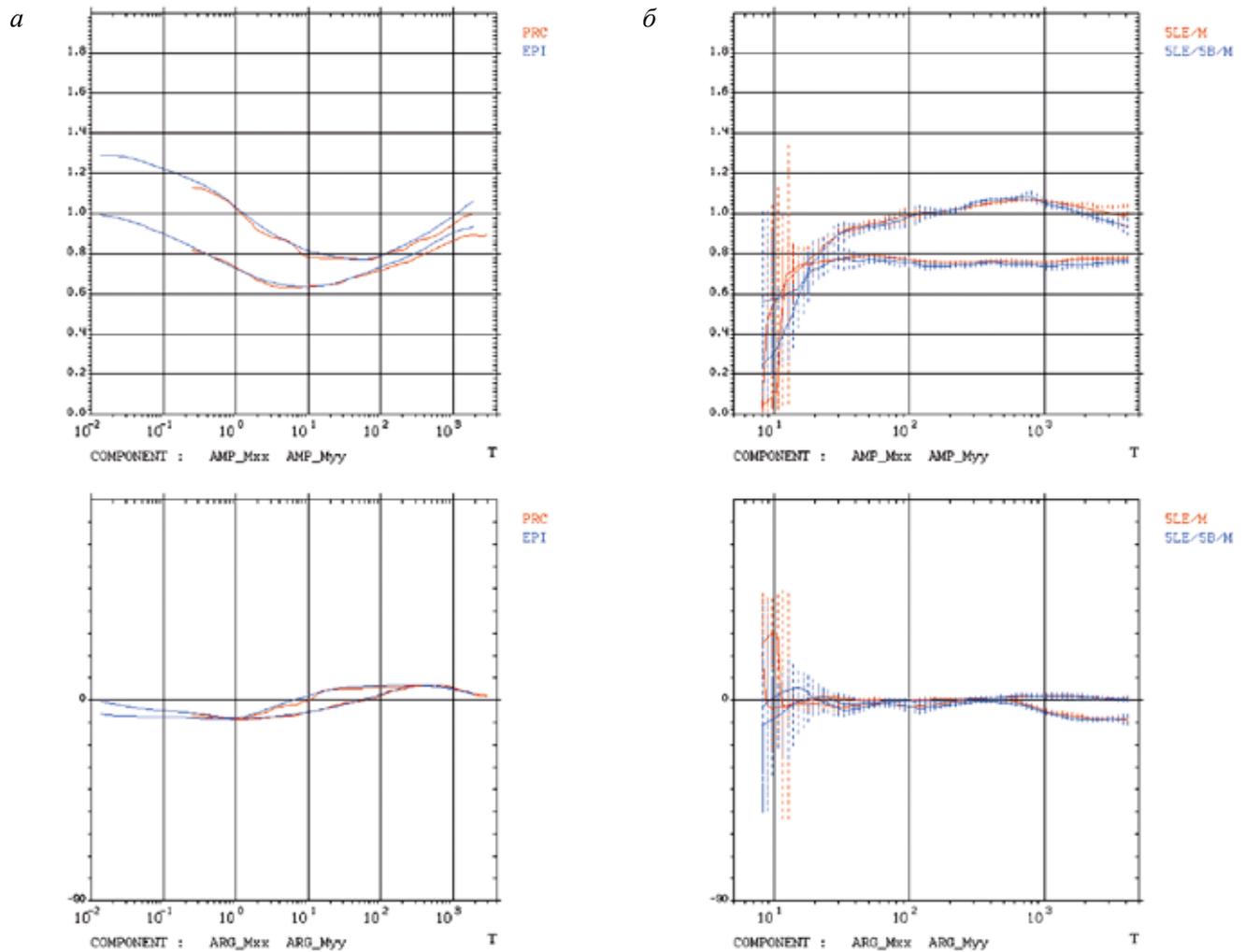


Рис. 6.

a – сопоставление частотных зависимостей амплитуд и фаз главных компонент полного горизонтального магнитного тензора [M] для т. 5LEMI, рассчитанного по отношению к базовой точке 2014 с помощью программы Remote (H+E) (EPI) во всех диапазонах наблюдений Phoenix и PRC-MTMV (PRC) – для диапазона 15 Гц;
б – сопоставление прямой (5LE/M) и транзитивной (5LE/BASE_2014/M) оценок амплитуд (вверху) и фаз (внизу) главных компонент тензора [M] для т. 5LEMI, рассчитанных по отношению к магнитному полю в обсерватории Mekrijarvi (MEK) по программе PRC-MTMV

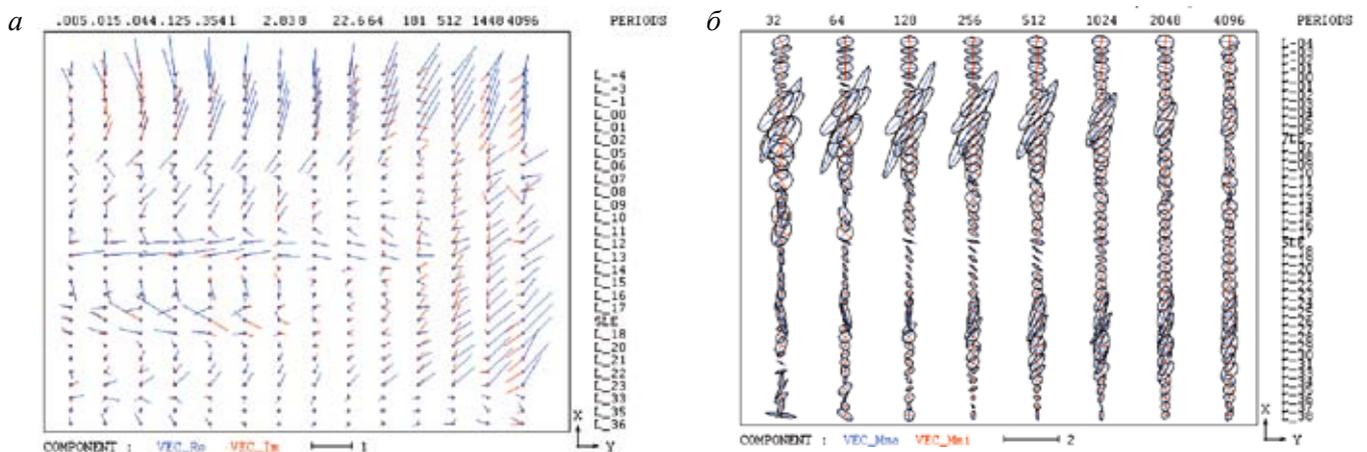


Рис. 7.

Частотно-профильные распределения реальных и мнимых индукционных векторов (*a*) и экстремальных эллипсов аномального горизонтального магнитного тензора [Ma], рассчитанного по отношению к полям в обсерватории Меккрярви (MEK), для 44 точек Phoenix (*б*) (по материалам наблюдений Phoenix 2013–2015 гг.). Масштаб длин векторов и главных осей эллипсов задан соответствующими отрезками. Ось X – направление на геомагнитный север, ось Y – на восток

не откликов (рис. 7, б), а также псевдоразрез Mxx (рис. 8) ярко фокусируют информацию о концентрации теллурических токов в двух центрах, что подтверждается также поведением векторов индукции (рис. 7, а). В ЮЗ части профиля находится более глубокое (нижнекоровое?) ядро, а на СВ – среднекоровое (экстермумы Mxx на периодах 1000 с и 250 с соответственно), соединенные падающей на ЮЗ областью повышенной проводимости. На периодах >1000 с профильное распределение Mxx сохраняет лишь один экстремум, что вполне соответствует результатам [15] (рис. 2).

Опираясь главным образом на устойчивые к гальваническим эффектам данные о параметре асимметрии импеданса Skew_CBВ (рис. 10), пове-

дение индукционных векторов (рис. 7, а, 9) и экстремальных эллипсов горизонтального магнитного (рис. 7, б) и фазового тензоров, МТ/МВ-отклики для большинства точек зондирования профиля ВС-2, можно признать квазидвумерными при наличии 3D-искажений в отдельных пунктах.

Предварительные результаты интерпретации

Интерпретация данных новых зондирований области Ладожской аномалии электропроводности на сегодня ограничивается выводами по результатам инвариантного анализа распределений передаточных функций по профилю «Выборг–Суоярви-2» в их сопоставлении с результатами предшествую-

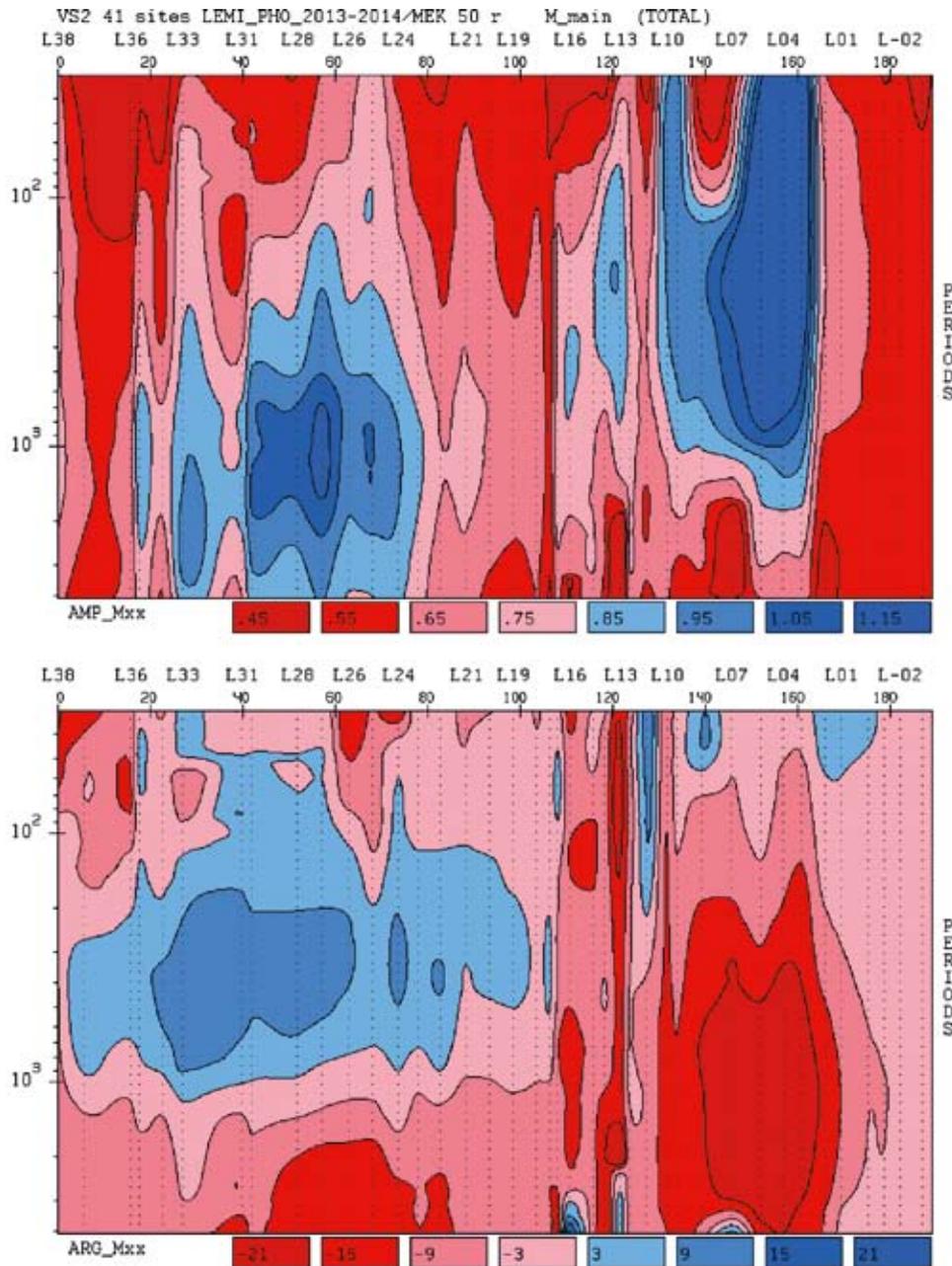


Рис. 8.

Псевдоразрезы амплитуды (Amr_Mxx) и фазы (Arg_Mxx) северной компоненты полного горизонтального магнитного тензора [M] по материалам наблюдений в рядовых точках зондирования профиля «Выборг–Суоярви-2» и записей магнитного поля в удаленной базе (финская обсерватория Меккриярви)

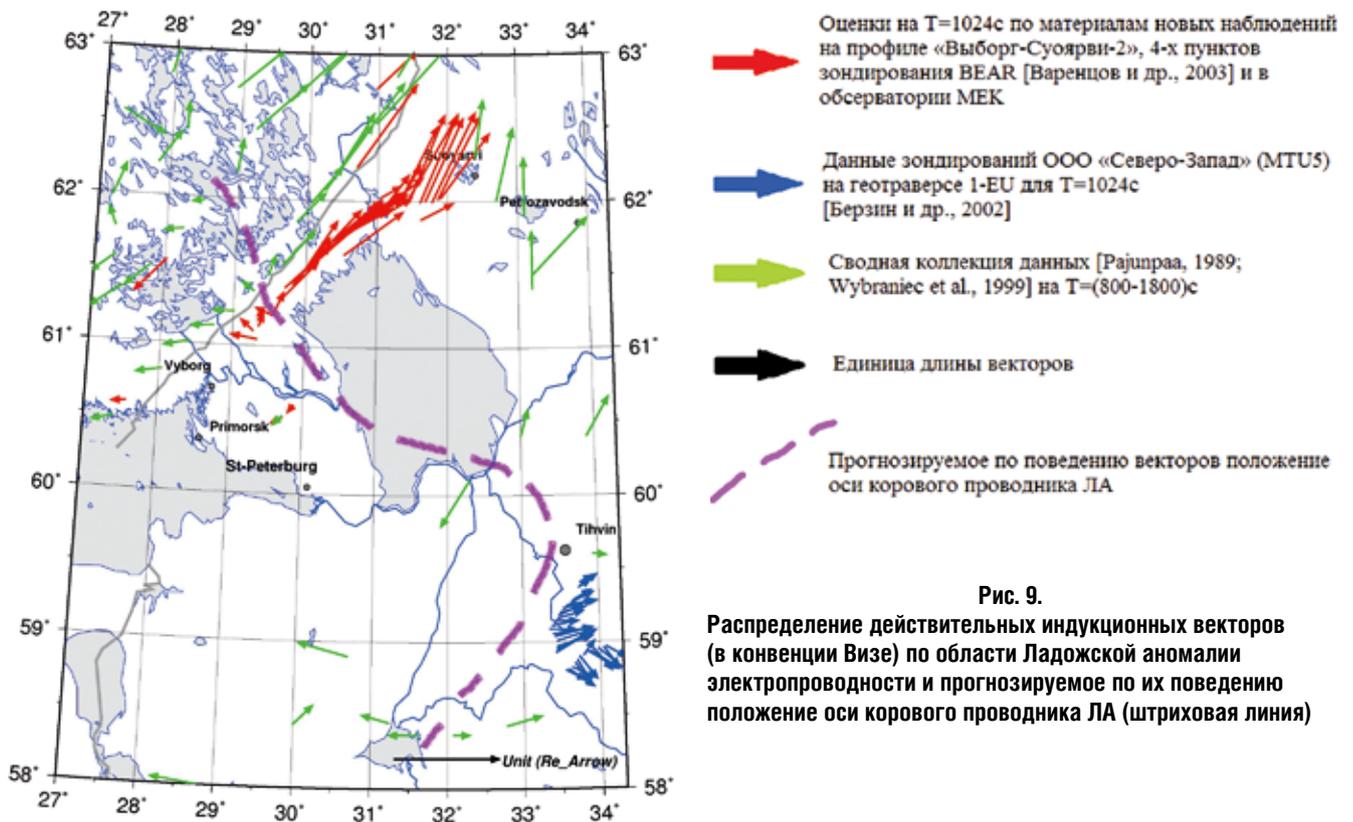


Рис. 9.
Распределение действительных индукционных векторов (в конвенции Визе) по области Ладожской аномалии электропроводности и прогнозируемое по их поведению положение оси корового проводника ЛА (штриховая линия)

щих МТ/МВ-работ, а также первыми количественными оценками, полученными с помощью 1D амплитудно-фазовой инверсии эффективного импеданса по данным разведочных зондирований Phoenix и опыта моделирования откликов априорной объемной модели распределения глубинной электропроводности области ЛА.

Поляризация длиннопериодных МТ/МВ-откликов по области ЛА отчетливо выявляет простирание глубинных проводящих структур в направлении 135–140° СЗ–ЮВ в районе Карельского перешейка и их разворот к югу в области Ладожской моноклинали (рис. 7, 9), что отвечает простиранию Ладожско-Ботнической зоны и смене простирания ее продолжения – структур парагнейсового пояса Лапландско-Среднерусского коллизийного орогена [13] (рис. 1).

Расширенный частотно-профильный набор векторов индукции на профиле ВС-2, а также впервые полученные оценки тензора [М] (рис. 7–9) ярко высвечивают области концентрации токов, т.е. «ядра» аномалии с максимальной электропроводностью, намеченные в [11]. Возможно, первая из них связана с глубинными корнями Вуоксинского разлома, а вторая – с интенсивной проработкой проводящим материалом верхних частей межмегаблокового Янисъярвинского разлома. Наиболее вероятна связь аномалий электропроводности с присутствием сульфидизированных и графитизитрованных метасадков, изобилующих в коре Балтийского щита [19, 22] и обильно проявленных обнажениями на всей центральной части профиля ВС-2 (карты ВСЕ-ГЕИ). Принимая во внимание как морфологию псевдоразреза Мхх, так и особенности фазовых импедансных откликов (рис. 7, 10), нельзя исклю-

чить присутствия проводящей зоны, протягивающейся в коре на участке от L04-L05 (северный берег оз. Янисъярви) до L36-L37 (Бородинское) и имеющей тенденцию погружения на ЮЗ. Отметим, что аналогичный образ в аномальных горизонтальных магнитных полях имеет зона Тессейра-Торнквиста (трансрегиональный шов вдоль западной границы Восточно-Европейского кратона), изучаемая в международном проекте EMTESZ [17], что может свидетельствовать о подобию геотектонических процессов, охвативших границы Аг микроконтинентов северо-востока ВЕК на финальной стадии его консолидации.

Предварительные результаты сглаживающей 1D-инверсии эффективного импеданса по данным Phoenix рисуют под всей центральной частью профиля чашеобразную область повышенной электропроводности с более длинным северо-восточным крылом и юго-западным, отмечаемым экстремально низкими сопротивлениями вплоть до глубин верхней мантии, а также отчетливо выявляет непроводящий блок Аг коры Карельского микроконтинента (рис. 10).

Не противореча в целом модели [11], построенный разрез демонстрирует важные новые черты, например гораздо более глубокие корни ЮЗ ядра аномалии, что вполне согласуется с длиннопериодным поведением индукционных векторов (рис. 7, 9). Однако использованный на начальном этапе интерпретации 1D-подход существенно ограничивает возможности перехода к более определенным выводам. Существенно большее разрешение дадут готовящиеся многокомпонентные бимодальные 2D-инверсии с учетом трехмерных искажений в ряде пунктов (розовые и голубые участки псевдоразреза Skew_CVB со значениями, превышающими 0,2, рис. 10).

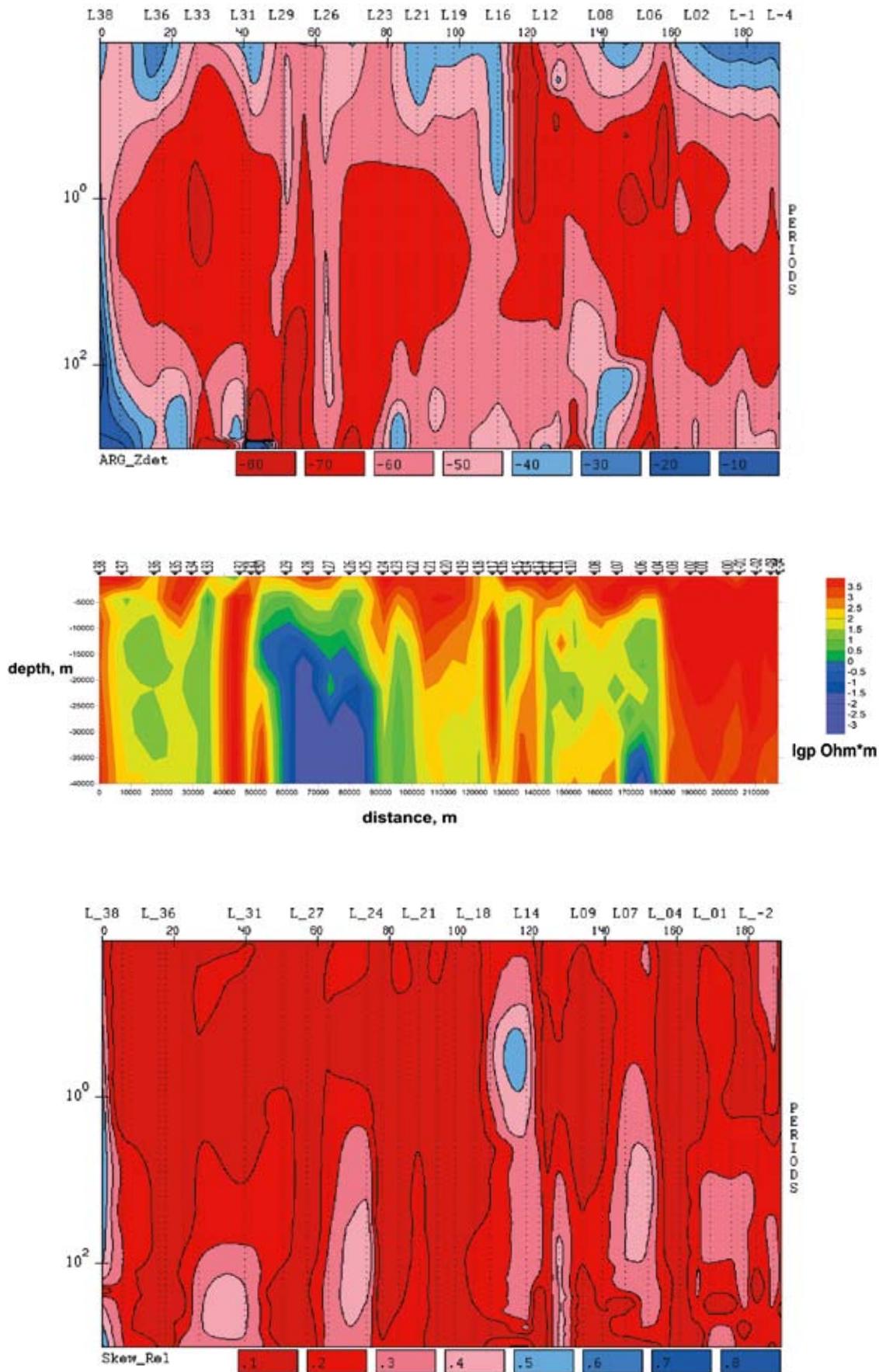


Рис. 10.

Псевдоразрезы оценок Arg_Z_{eff} вдоль профиля «Выборг-Суоярви-2» по данным широкополосных зондирований и разрез сопротивлений, построенный по результатам амплитудно-фазовой инверсии Z_{eff} (вертикальная и горизонтальная оси – глубина и расстояние по профилю в метрах. Нижняя панель: псевдоразрез $Skew_CBV$, оценки параметра асимметрии тензора $[Z]$ по схеме CBV [Бердичевский, Дмитриев, 2010])

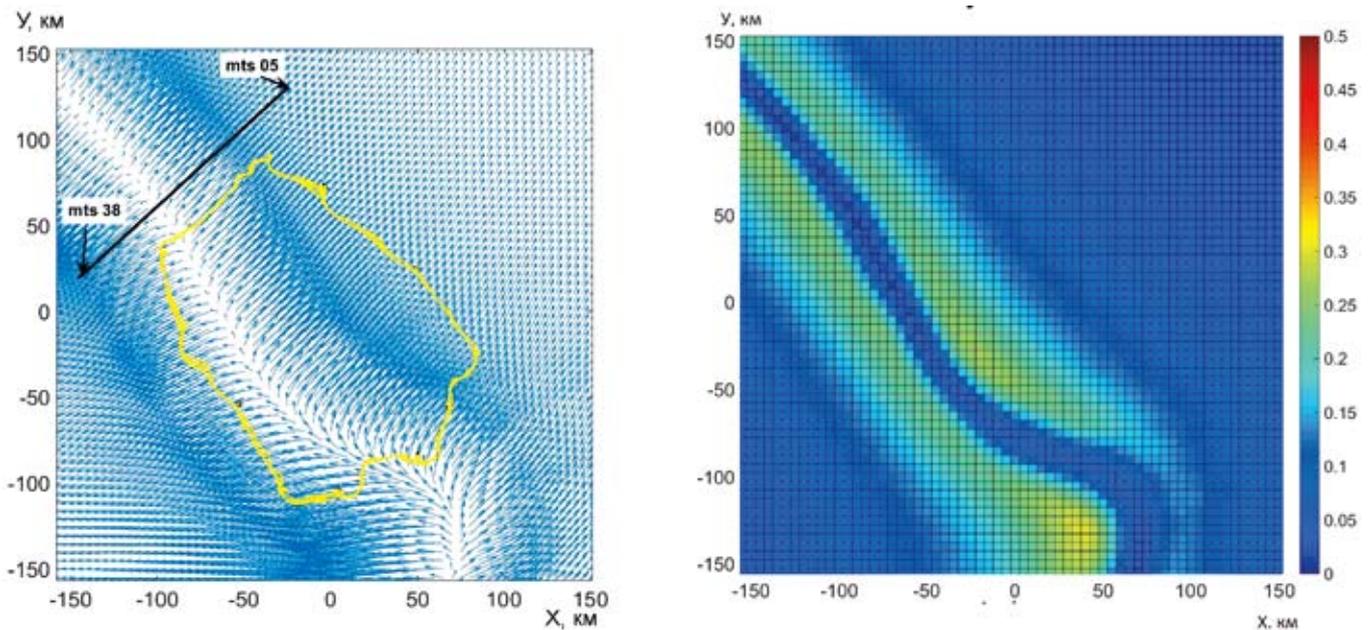


Рис. 11.

Результаты 3D-моделирования геоэлектрической структуры коры области Ладожской аномалии электропроводности по программе [Mackie et al., 1994]:

слева – индукционные вектора (черная прямая соответствует положению профиля ВС-2, желтым условно показан контур Ладожского озера);

справа – магнитуда типпера на периоде 1024 с. Цифры на осях – размеры участка области моделирования в км

Наконец, рис. 11 демонстрирует первые результаты расчетов региональных МВ-откликов с помощью 3D-моделирования ЭМ-полей для априорной прогнозной модели электропроводности области ЛА. В основе ее концепции лежат представления об электропроводности нормальной и аномальной коры, полученные на предшествующих этапах исследований и откорректированные по результатам анализа региональных наборов векторов индукции, а также данных 1-EU и ВС-2 (рис.1, 7, 9).

Анализ поведения полученных МВ-откликов, качественно соответствующих наблюдаемым данным, определяет следующие шаги совершенствования прогнозной модели: увеличение интегральной проводимости поперечного сечения ЮЗ ядра аномалии (при сохранении в целом конфигурации этой ветви ЛА) и включение второго корового линейного проводника, соответствующего СВ ядру аномалии в разрезе ВС-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В статье представлены предварительные итоги нового этапа экспериментальных исследований Ладожской аномалии электропроводности – профильного синхронного МТ/МВ-зондирования по линии Выборг – Суоярви. Они приводят к следующим выводам.

1. Комплекс зондирований ЛА с использованием аппаратуры Phoenix MTU5 и LEMI-417M в совокупности с выбранными методами и подходами к обработке их данных способен обеспечить получение локальных и двухточечных МТ/МВ передаточных функций в диапазоне периодов 0,003–2000/10000 с, пригодных для надежного разрешения аномальной структуры разреза до глубин 50–150 км.

2. Первые результаты анализа и интерпретации полученного материала в значительной степени

уточняют и проясняют выводы предшествующих исследований ЛА. Так, благодаря значительно большей детальности и точности данных зондирования, а также возможности анализировать расширенные наборы синхронных передаточных функций ЭМ-поля уже на этапе качественной интерпретации и первых количественных оценок получены соответствующие современным тектоническим представлениям свидетельства погружения проводящих структур разреза в юго-западном направлении, а не в северо-восточном, как предполагалось ранее.

3. Построенная стартовая модель объемного распределения электропроводности области ЛА является эффективным инструментом для совершенствования представлений о глубинной геоэлектрической структуре региона.

Ближайшими задачами Рабочей группы LADOGA являются: верификация и продление в область более длинных периодов стандартных оценок [Z] и [W] по данным Phoenix, а также пересчет к единой базе на Карельском (СВ) участке профиля полученных низкочастотных оценок [M]; проведение серии сглаживающих и детальных 2D-инверсий ансамбля передаточных операторов [Z], [W] со стабилизацией данными [M].

В перспективе предстоит: многокомпонентная 3D-инверсия по МТ/МВ-данным для блока Карельского перешейка и развитие прогнозной 3D-модели электропроводности области ЛА с опорой на результаты 2–3D-инверсий, а также в режиме проверки гипотез.

Результаты изучения геоэлектрического строения области Ладожской аномалии электропроводности, подкрепленные сейсмическими и гравимагнитными материалами, будут важны для обобщения представлений о строении Ar-Pt-шовных зон кратонов,

а также смогут помочь идентификации в пределах Фенноскандинавии элементов тектоники плюмов и тектоники плит, пространственно-временные соотношения которых в раннедокембрийскую эпоху являются предметом дискуссии геологов [13].

Благодарности

Мы искренне благодарны всем участникам Рабочей группы LADOGA, полный состав которой включает помимо авторов статьи: Александрову Е.Д., Варданянц И.Л., Епишкина Д.В., Мишинова Л.Г., Смирнова М.Ю., Успенского Н.И., Шустова Н.Л., принимавших активное участие в полевой съемке или обработке и анализе данных зондирований. Глубоко сожалеем о безвременном уходе члена Рабочей группы Вагина С.Ю., внесшего большой

вклад в исследования Ладожской аномалии. Для проведения эксперимента была важна поддержка со стороны директора СПбФ ИЗМИРАН Копытенко Ю.А. и Сергушина П.А., а также сотрудников КарНЦ РАН: Шарова Н.В., Рязанцева П.А. и Нилова М.Ю. Благодарим коллег из Института геофизики ПАН, Варшава, Университета Оулу, а также обсерваторий Финляндии и Польши, любезно предоставивших данные геомагнитных обсерваторий. Ценим весомый вклад в успех наших исследований Варенцова Ив. М., как лидера разработки используемых методов и программ оценивания и анализа МТ/МВ откликов, а также Алексева Д.А., автора системы визуализации материалов 3D ЭМ-моделирования.

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-05-00786 и Программой развития МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е.Д., Варенцов Ив. М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. №2. С. 32–38.
2. Баглаенко Н.В., Варенцов Ив. М. и др. Геоэлектрическая модель Кировоградской аномалии по геомагнитным данным // Физика Земли. 1996. №4. С. 87–98.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2010. 680 с.
4. Бердичевский М.Н., Соколова Е.Ю., Варенцов Ив. М. и др. Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: анализ магнитотеллурических и магнитовариационных откликов вдоль геотраверса НАРЫН // Физика Земли. 2010. №8. С. 36–53.
5. 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.
6. Васин Н.Д. Геоэлектрическая характеристика разреза юго-западной Карелии // Записки Горного института. 1988. Т. 113. С. 57–63.
7. 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.
8. Варенцов Ив. М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Рабочая группа KIROVOGRAD. Синхронные магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. №4. Киев: Наукова думка.
9. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / Под ред. Н.В. Шарова. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2004. 352 с.
10. Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. №4. Киев: Наукова думка. С. 22–39.
11. Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданянц И.Л. Строение коры и мантии по профилю Суоярви–Выборг по магнитотеллурическим данным // Вестник СПбГУ. 1998. Сер. 4. Вып. 4. С. 25–34.
12. Ковтун А.А., Варданянц И.Л., Успенский Н.И. Составление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны // Вопросы геофизики. СПб., 2011. Вып. 44. С. 124–133.
13. Минц М.В. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М.: Роснедра. РАН. Центр ГЕОКАРТ, 2010.
14. Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев: Наукова думка, 1981. 296 с.
15. Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности // Геофиз. журнал. Украинская академия наук. 1981. №3. С. 97–99.
16. Epishkin D. Advances in remote references data processing: using remote electric channels / Abstracts of the 22nd EM Induction Workshop. Germany. Weimar. 2014.
17. Habibian B.D., Brasse H., Ernst T., Oskooi B., Sokolova E.Yu., Varentsov Iv.M. The conductivity structure across the Trans-European Suture Zone from MT and MV data modeling // Phys. Earth Planet. Int. 2010. doi:10.1016/j.pepi.2010.08.005.
18. Jozwiak W. Large scale conductivity pattern in Central Europe and its correlation to deep tectonic structures // Pure Appl. Geophys. 2012. Vol. 169. Pp. 1737–1747.
19. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardanianis I.L. & the BEAR Working Group. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planets Space. 2002. Vol. 54. Pp. 535–558.
20. Pajunpää K. Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland // Geophys. J. R. astr. Soc. 1987. Vol. 91. Pp. 657–666.
21. Sokolova E.Yu., Varentsov Iv.M., BEAR WG. Deep array electromagnetic sounding on the Baltic Shield: external excitation model and implications for upper mantle conductivity studies // Tectonophysics. 2007. Vol. 445. Pp. 3–25.
22. Vaittinen K., Korja T., Kaikkonen P., Lahti I., Smirnov M.Yu. High-resolution magnetotelluric studies of the Archaean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland // Geophys. J. Int. 2012. Vol. 188. Pp. 908–924.
23. Varentsov Iv.M., 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.
24. Weckmann U. Making and Breaking of a Continent: Following the Scent of Geodynamic Imprints on the African Continent Using Electromagnetics // Surv Geophys. 2012. Vol. 33. Pp.107–134.
25. Wybranec S., Jankovski J., Ernst T., Pecova J. and Phfoc O. A new method for presentation of induction vector distribution in Europe // Geophys. Polonica. 1999. Vol. XLVII(3). Pp. 323–334.

РЕЦЕНЗЕНТ – доктор технических наук И.А. Безрук

ОБ АВТОРАХ**СОКОЛОВА**

Елена Юрьевна

Ведущий научный сотрудник ИФЗ РАН, кандидат физико-математических наук, выпускница кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, 1979 г. Научные интересы – геоэлектрика, геоэлектродинамика, геодинамика.

**ГОЛУБЦОВА**

Нина Сергеевна

Окончила геологический факультет МГУ в 1971 г. Научный сотрудник кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, кандидат геолого-минералогических наук. Научные интересы – моделирование и интерпретация данных магнитотеллурических зондирований.

интерпретация данных магнитотеллурических зондирований.

**ПУШКАРЕВ**

Павел Юрьевич

Окончил геологический факультет МГУ в 1998 г. Доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ, кандидат физико-математических наук. Научные интересы – электромагнитные зондирования земли с использованием естественных и искусственных источников.

земли с использованием естественных и искусственных источников.

**КОВТУН**

Аида Андреевна

Окончила физический факультет ЛГУ в 1953 г. Профессор физического факультета СПбГУ, доктор физико-математических наук. Крупнейший специалист в области глубинной электропроводности коры и мантии Земли.

**РОКИТЯНСКИЙ**

Игорь Иванович

Окончил физический факультет ЛГУ в 1953 г. Старший научный сотрудник Института геофизики НАН Украины, профессор геофизики, доктор физико-математических наук, лауреат Госпремии 2005 г. Крупнейший специалист в области развития методов изучения глубинной электропроводности земной коры и мантии.

методов изучения глубинной электропроводности земной коры и мантии.

**КУЛИКОВ**

Виктор Александрович

Окончил геологический факультет МГУ в 1991 г. Доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова, кандидат физико-математических наук. Научные интересы – совершенствование аппарата анализа данных низкочастотных электромагнитных зондирований, интерпретация комплексных геофизических исследований при решении рудных задач.

аппарата анализа данных низкочастотных электромагнитных зондирований, интерпретация комплексных геофизических исследований при решении рудных задач.

**ТАРАН**

Яна Валентиновна

Магистрант кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ.

**ЛОЗОВСКИЙ**

Илья Николаевич

Выпускник кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова. Аспирант ИФЗ РАН. Научные интересы – обработка и интерпретация данных ЭМ-зондирований.

**ЯКОВЛЕВ**

Андрей Георгиевич

Окончил геологический факультет МГУ в 1981 г. Доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ имени Ломоносова, кандидат физико-математических наук. Научные интересы – совершенствование аппарата интерпретации и обработки низкочастотных электромагнитных зондирований.

аппарата интерпретации и обработки низкочастотных электромагнитных зондирований.