

ЭКСПЕРИМЕНТ СИНХОННОГО ПРОФИЛЬНОГО МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЯ ЛАДОЖСКОЙ АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ: НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА О СТРУКТУРЕ КОРЫ ЮГО-ВОСТОКА БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

Соколова Е. Ю.^{1,2} и рабочая группа ЛАДОГА

¹Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

SYNCHRONIUS MT/MV SOUNDING EXPERIMENT ACROSS LAKE LADOGA CONDUCTIVITY ANOMALY: NEW EVIDENCES ON THE SOUTH-EASTERN BALTIC SHIELD CRUSTAL STRUCTURE

Sokolova E. Yu.^{1,2}, LADOGA WG

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

²Tyumen State University, Tyumen, Russia

Abstract

The paper presents the results of prospecting and long-period synchronous magnetotelluric and magnetovariational soundings of 2013–2016 y.y. along Vyborg-Suoyarvi profile across Lake Ladoga conductivity anomaly (LA) – one of the strongest anomalies on EEC, which is already known about forty years but still hasn't obtained single-valued interpretation of its nature.

Technological and methodical aspects of new experiment as well as noise-suppressing data processing, analyses and interpretation procedures, based on the achievements of MT method's intensive development in the XXI century, are described. The progress in the resolution of the conductivity cross-section of LA permits to carry out its informative geotectonic interpretation. The original variant of such interpretation is proposed.

Введение

Знания о строении мобильных поясов, окружающих стабильные архейские ядра древних кратонов, значительно углубляет понимание докембрийской эволюции планеты. Для их изучения эффективно используется широкий комплекс геофизических методов, в котором все более заметную роль играют электромагнитные зондирования, в их современной постановке способные дать надежную информацию о корово-мантийных структурах и веществе.

Ладожская аномалия электропроводности, расположенная в зоне сочленения архейского (Карельского) и протерозойского (Свекофенского) блоков на юго-востоке Балтийского щита, была открыта в 70–80-х годах XX века в

результате пионерских исследований методом магнитовариационного (МВ) зондирования [8]. С помощью магнитотеллурических (МТ) зондирований, проводимых, главным образом, ленинградскими учеными, представления о характере широкого распространения пород низкого (до единиц Ом·м) сопротивления в разрезе верхней-средней коры северного Приладожья были существенно развиты, что позволило построить первые модели разреза электропроводности ЛА в квази-двумерном приближении [4, 5]. Однако, их разрешение было недостаточным для проведения содержательной геолого-тектонической интерпретации: открытыми оставались вопросы ее природы (флюиды/электронные проводники) и соотношения тектонических режимов при ее образовании (растяжения, рифтинга, и коллизионной тектоники), требовавшие продолжения исследований [5].

В 2013 г. геоэлектрики из Москвы и Санкт-Петербурга: **А. А. Ковтун, С. А. Вагин, И. Л. Варданыц, М. Ю. Смирнов, Н. И. Успенский (СПбГУ); Н. С. Голубцова, В. А. Куликов, И. Н. Лозовский П. Ю. Пушкарев, Я. В. Таран, А. Г. Яковлев (МГУ, ООО «Северо-Запад»); Е. Ю. Соколова (ИФЗ РАН); И. И. Рокитянский (ИГ НАНУ)** – и присоединившиеся позднее **П. Ю. Рязанцев и М. Ю. Нилов (ГИ КНЦ РАН, Петрозаводск)** создали **рабочую группу ЛАДОГА** для постановки нового эксперимента по изучению структуры Ладожской аномалии. Его главной задачей стало осуществление в современной методической постановке синхронного профильного МТ/МВ зондирования по линии секущей аномалию по линии Выборг–Суоярви (В–С) (рис. 1). Целью проекта являлось построение новых геоэлектрических моделей области ЛА, в первую очередь – детального разреза сопротивлений вдоль профиля В–С, и обеспечение надежных глубинных геоэлектрических маркеров для прояснения природы и структурной приуроченности одной из самых крупных аномалий электропроводности на ВЕП, важного репера для эволюционных и металлогенических построений по ЮВ Балтийского щита [9].

Методы и результаты

Пятикомпонентные однодневные наблюдения в рядовых пунктах профиля велись станциями Phoenix MTU-5 в попарно-синхронном режиме и сопровождалась одновременными записями третьей аналогичной станцией в базовых пунктах: в 2013 г. – на геомагнитной стационарной базе СПб филиала ИЗМИРАН в п. Красное (п. 2013), а в 2014 – на северном берегу Ладожского озера (п. 2014) (рис. 1). Станции LEMI-417 осуществляли опор-

ные трехдневные зондирования в 9 опорных пунктах. В качестве дополнительных удаленных баз для длиннопериодных наблюдений использовались две ближайшие геомагнитных обсерватории Финляндии, Нурмиярви и Меккриярви, с непрерывной режимной 1-секундной регистрации.

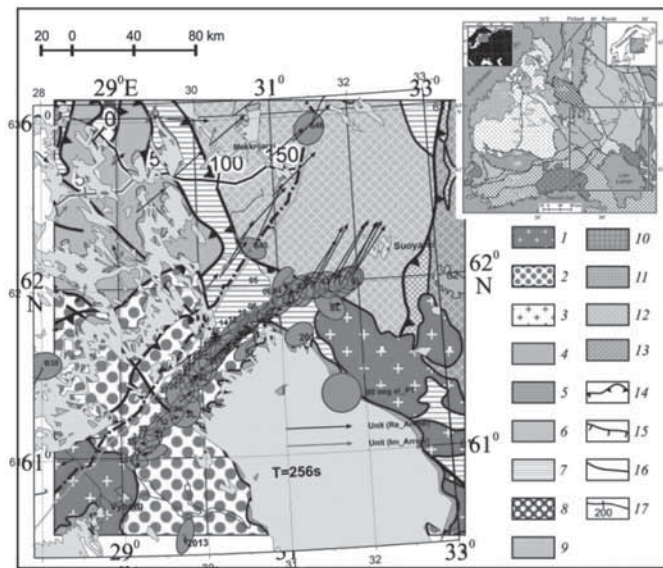


Рис. 1. Профиль синхронных МТ/МВ зондирований Выборг–Суоярви: положение 44-х разведочных зондирований Phoenix (названия пунктов даны цифрами) и 9 глубинных зондирований LEMI (названия с буквой L) дано на схематической геологической карте ЮВ Балтийского щита [2] (расшифровку легенду см. там же). Для периода $T=256$ в соответствии с приведенными масштабами на профиле проекта вынесены эллипсы фазового тензора и индукционные вектора (черные – действительные, согласно конвенции Визе направленные «от проводника», серые – мнимые), а также индукционные вектора на финской территории по данным [12].

Fig. 1. The synchronous MT/MV sounding profile Vyborg–Suoyarvi: 44 prospecting Phoenix soundings (numbers) and 9 deep LEMI soundings (L) on the background of schematic geological map of SE Baltic Shield ([2] and legend herein). According to the shown scales phase tensors ellipses and induction vectors (black – real, in Wiese convention, grey – imaginary) are presented on the profile and on the Finnish territory (only vectors, according to [12]) at 256 s period.

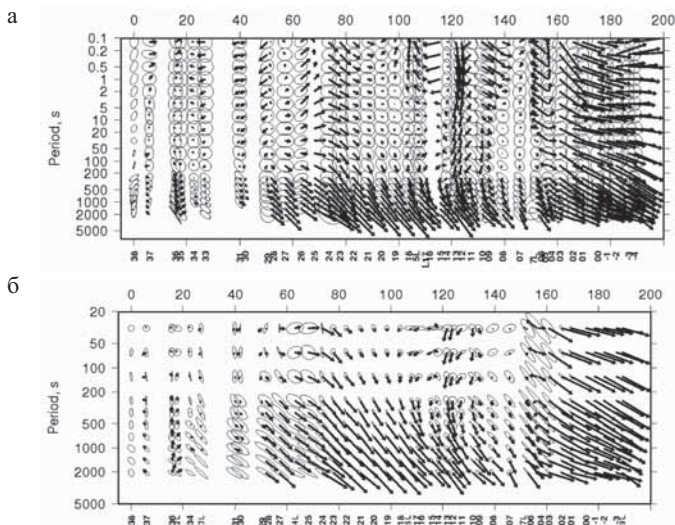


Рис. 2. Инвариантный анализ МТ/МВ передаточных функций по данным профиля Выборг–Суоярви: профильно-частотные распределения действительных векторов индукции (Визе конвенция) и фазовых тензоров импеданса (а) или экстремальных эллипсов аномального горизонтального тензора (в нормировке на крайнюю СВ точку профиля 9L/-4) (б)

Fig. 2. The invariant analyses of MT/MV transfer functions on the Viborg–Suoyarvi profile data: profile–period distribution of real induction vectors (Wiese convention) and phase tensor ellipses (a) or extremal ellipses of anomalous horizontal magnetic tensor M (referenced to North–Easternmost site of the profile 9L/-4) (б)

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, была принципиальной особенностью методики эксперимента, позволяющей применить современные приемы шумоподавляющей обработки по схеме multi-remote-reference (mRR). Штатный код аппаратуры Phoenix (SSMT2000, Phoenix Geophysics Ltd) и адаптивная сплайн-аппроксимация его результатов («Corrector», ООО «Северо-Запад») дополнялись применением процедур mRR [2] и RRMC (контроль планарности внешних магнитных полей в удаленных пунктах) [12] для стабилизации длиннопериодных оценок и «синхронизации» данных различных полевых кампаний.

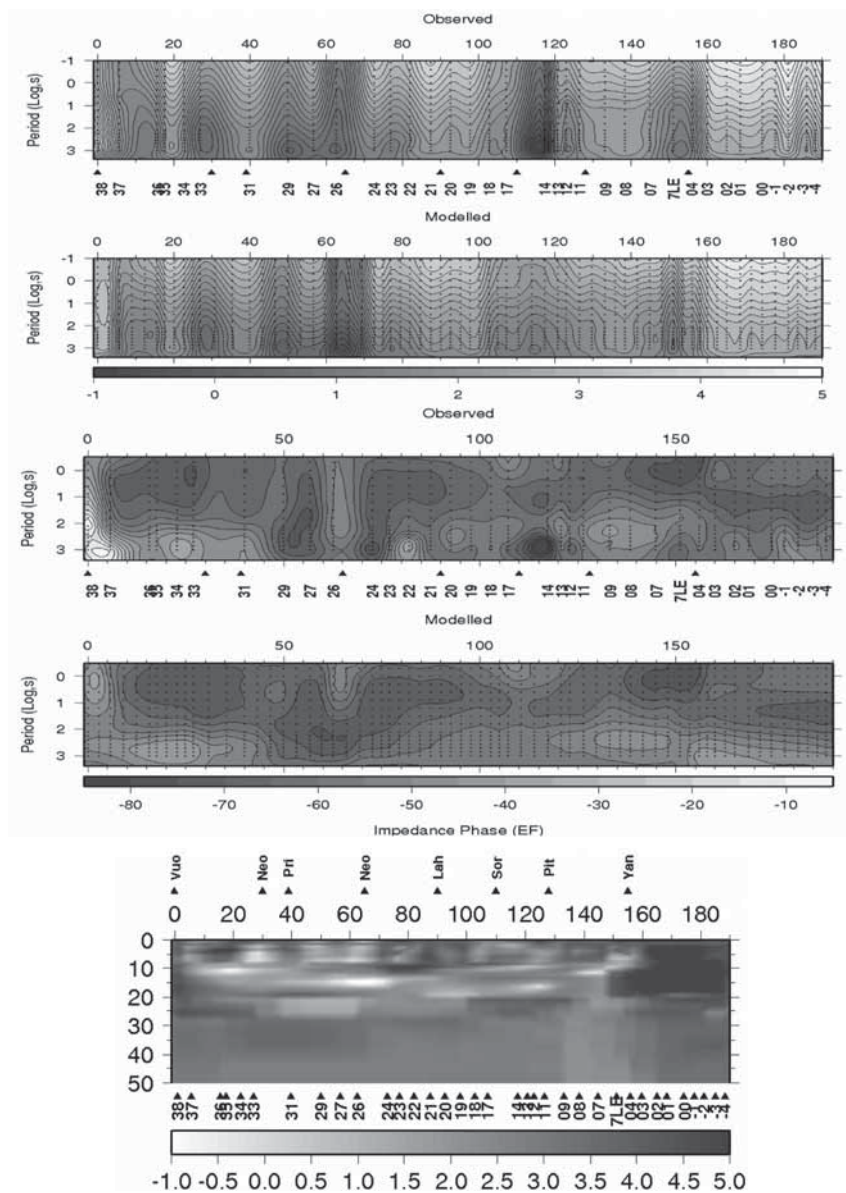


Рис. 3. Разрез сопротивлений (в lg Ом·м, в соответствии со шкалой) по линии Выборг–Суоярви, полученный в результате инверсии эффективного сопротивления (верхние панели) и фазы эффективного импеданса (нижние панели) по данным Phoenix и LEMI 2013–2014 гг. и псевдоразрезы соответствующих наблюдаемых и модельных данных (MF Ro_eff=0.3; MF ArgZ_eff=7.1°; WRMS=1.2). Точки зондирования и положения крупных разломов (Вуоксинский, Приозерский, Лахденпохский, Сортавальский, Питкярантский, Янисярвинский и два неотектонических разлома по [10]) отмечены под и над псевдоразломами, соответственно

Fig. 3. The resistivity cross-section (in lg Ом·м according to the scale bar) along V–S line obtained as a result of determinant inversion of Phoenix and LEMI data of 2013–2014y.y. with corresponding observed and modelled data (MF Ro_eff=0.3; MF ArgZ_eff=7.1°; WRMS=1.2) and marked faults (Vuoksinskiy, Priozerskiy, Lahdenpohskiy, Sortavalskiy, Pitkiarantskiy, Yanisjarvinskiy and two neotectonic ones according to [10]) and sites locations

Результирующие ансамбли локальных (импеданс Z , типпер Wz) и двухточечных (оценки горизонтального магнитного тензора M , пересчитанного в итоге на крайнюю СВ точку профиля) были составлены для большинства точек в широкополосном диапазоне 0.003–2048 (4096)с и для 9 точек – в расширенном до длинных периодов, 0.003–8000 с [9].

Инвариантный анализ полученных передаточных функций (рис. 1, 2) главное направление простирания геоэлектрических структур (45–50°NE) и квази-двумерность их МТ/МВ откликов (2D с локальными 3D искажениями), что определило возможность двумерного подхода к интерпретации. Частотно-профильное поведение инвариантов горизонтального магнитного тензора M наиболее отчетливо выявило существование двух областей концентрации теллурических токов: средне-верхнекоровую на СВ участке и средне-нижнекоровую на ЮЗ (рис. 2, правая панель) а также [9].

Для построения модели глубинной электропроводности ЛА вдоль профиля Выборг–Суоярви была предпринята серия 2D инверсий как полного ансамбля полученных МТ/МВ передаточных функций, так и его подмножеств. Применялись различные подходы, начиная от сглаженных частичных инверсий, до многокомпонентной с учетом локальных 3D искажения и кусочно-непрерывной аппроксимацией среды по программе [11]), давшей наибольшее разрешение (более детально об обширном опыте 2D и первых постановках 3D инверсий). Серия, полого погружающихся к ЮЗ неоднородно-проводящих горизонтов в верхней и средней коре, выходящих на поверхность в виде известных разломов, явилась наиболее яркой и устойчивой общей чертой всех получаемых решений, хорошо коррелирующей с характерными особенностями разреза плотности [7].

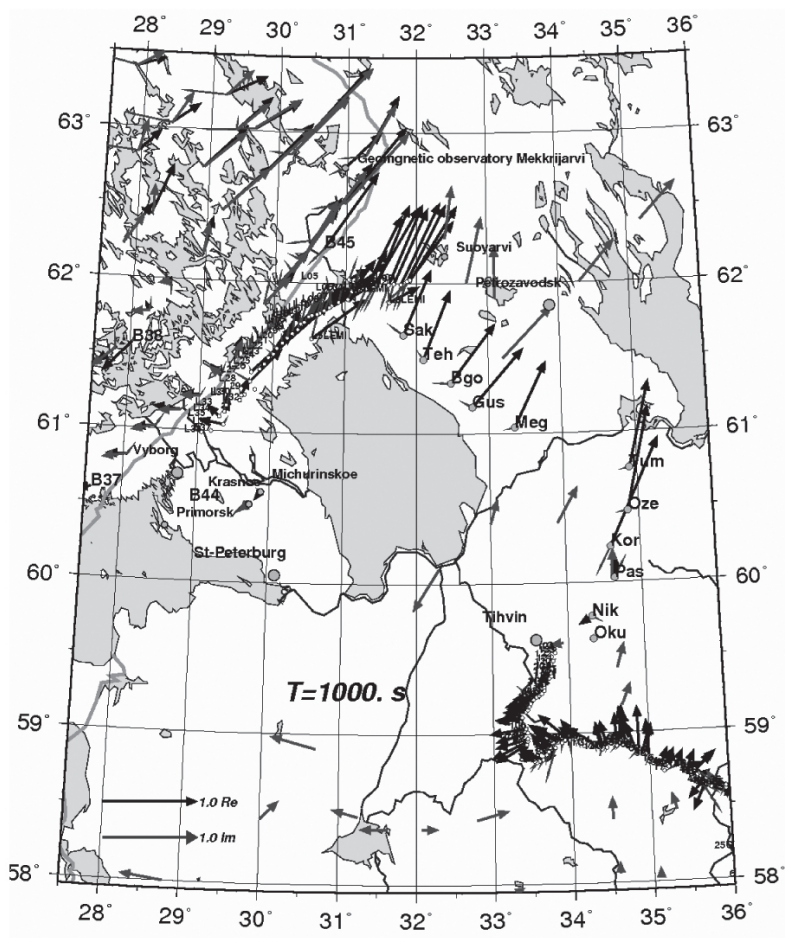


Рис. 4. Пространственное распределение действительных (черные) и мнимых (серые) векторов индукции (конвенция Визе) по области Ладожской аномалии электропроводности для $T \sim 1000$ с (данные проектов BEAR, 1-ЕВ, ЛАДОГА за 2013–2016 гг.) и для $T=1000$ с (коллекция [13]) и ~ 1800 с (коллекция [1]).

Fig. 4. Spatial distribution of real (black) and imaginary (grey) induction vectors (Wiese convention) over the Lake Ladoga conductivity anomaly area for $T \sim 1000$ с (the data of BEAR, 1-EU, LADOGA, 2013–2016 y.y.) and for $T=1000$ с [13]; $T \sim 1800$ с [1].

Пример результата детерминантной инверсии приведен на рис. 3, другие варианты моделей приведены в [7]. Большее разрешение верхней коры, представленное в результатах инверсий W_z и $H\rho$ -импедансных данных, позволило выявить на СВ половине профиля чашеобразные проводящие структуры, уверенно соотносимые с аналогичным структурным рисунком в распределении эффективной магнитной восприимчивости, которые дала инверсия материалов магнитной съемки 1:200000 по программе KOSKAD. Первые попытки проведения 3D инверсии по данным профиля В–С дали результаты хоть и недостаточно разрешенные, но, в целом, разумно соотносящиеся с двумерными.

Разрешение структуры разреза сопротивлений по профилю В–С в совокупности со сведениями о характере пространственного поведения МВ откликов по всей области Ладожской аномалии электропроводности из [13, 1] и результатами МТ работ на геотраверсе 1ЕВ [6, 3] позволили в рамках проекта ЛАДОГА продвинуться в понимании расположения аномально проводящих «ветвей» ЛА в Приладожье в целом. В построенной впервые прогнозной объемной модели ее коровой электропроводности предположена гипотеза пространственного поведения двух «эффективных» проводников ЛА (СВ верхнее-средне-коровый, условно «метаосадочный», и ЮЗ средне-коровый, условно «гранулитовый» [7]), неплохо подтверждавшаяся новейшими результатами зондирования 2016 г. (рис. 4). Показано, что с увеличением периода влияние СВ проводника ослабевает, и уже на периоде ~ 1000 с вся аномальная зона проявляется как один мощный ЮЗ проводник – именно он и был выявлен длиннопериодными магнитовариационными зондированиями [1].

Выводы

Новые зондирования ЛА, осуществленные МГУ, ИФЗ РАН и СПбГУ в партнерстве с ООО «Северо-Запад» и ГИ КарНЦ РАН позволили преодолеть ограничения предшествующих этапов ее исследования и достичь существенно большего разрешения структуры коровой электропроводности в сечении по линии Выборг–Суоярви, в области ее существенной двумерности, позволяющего вести геологическую и тектоническую интерпретацию [7]. Полученная геоэлектрическая модель показывает, что ЛА – не единый компактный объект, а совокупность проводников различного вещественного состава и тектонической приуроченности. На средне-нижне-коровых уровнях эти структуры представляют собой неоднородно-проводящие наклонные слои с единым ЮЗ положим

падением (подтверждаемым соответствующим плотностным распределением [7]) и, по-видимому, являвшиеся надвиговыми зонами, развившимися вдоль позволяющих облегченное проскальзывание графит-содержащих раннепротерозойских формаций при их аккреции/надвиге к краю Карельского кратона в свекофенское время и позднее. На более высоких уровнях их падение становится круче и они сливаются с крупными древними разломными зонами, распознаваемыми на поверхности (включая реактивированные неотектоническими процессами вдоль границ Ладожско-Ботической зоны [10]), где возможно присутствие и минерализованной меторной воды. В верхней коре (5–7 км) СВ части профиля выявляются чашеобразные проводящие структуры, находящиеся в уверенной корреляции с картиной распределения относительной аномальной магнитной восприимчивости. Их совокупность характеризует верхнекоровую структуру Раахе-Ладожской зоны в крест ее более чем 50-ти км ширины.

В ЮЗ области разреза на глубинах 20–25 км наблюдается существенное «раздувание» проводящих слоев, которое, по-видимому, и составляет ту самую, интенсивную и низкочастотную, Ладожскую аномалию, обнаруженную первыми длиннопериодными МВ зондированиями в регионе Приладожья [8]. Мы полагаем [7], что оно образовано глубоко-метаморфизованными комплексами Южно-Финляндского гранулитогнейсового пояса, включающими кристаллический графит экстремально высокой электропроводности (известны месторождения) и сходными с обнаженными/разбуренными формациями Лапландского гранулитового пояса ($\rho < 0.001$ Ом·м). Однако на СВ, в перикратонной (Раахе-Ладожской) зоне, повышенная электропроводность верхнекоровых формаций, скорее всего, связана с графит\сульфид-содержащими низко метаморфизованными супракрастальными и вулканическими породами.

Особенности тектонических структур, выявленные в разрезе Выборг–Суоярви хорошо сопрягаются со структурами ЮВ Балтийского щита, реконструированными по геологическим и сейсмическим (проект FIRE) материалам [7]. Современные синхронные МТ/МВ зондирования вполне эффективно восполнили отсутствие в северном Приладожье данных активной сейсмики. Следующий раунд уточняющей тектонической интерпретации будет предпринят по окончании 2–3D ограниченных МТ/МВ инверсий и 3D моделирования с учетом данных новых зондирований в Ладожском регионе 2016 г. (рис. 4).

Благодарности

- д.г.-м.н. Н. В. Шарову, д.г.-м.н. А. А. Жамалетдинову, д.ф.-м.н. Ю. А. Копытенко и их коллегам из ИГ Кар НЦ, ИГ Кол НЦ РАН и СПбФ ИЗМРАН – за неизменный интерес к исследованиями ЛА, полезные обсуждения результатов и неоценимую помощь в организации полевых работ;
- финским, польским и российским коллегам из геомагнитных обсерваторий Нурмиярви, Меккроярви, Сувалки и Красное, а также из ИГ ПАН (Варшава) за любезное предоставление своих геомагнитных наблюдений для проведения нами помехоподавляющей обработки данных;
- всем разработчикам используемых высокоэффективных программ обработки, анализа и инверсии МТ/МВ данных.
- Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, инициативные гранты 13-05-00786, 15-05-01214, 16-05-00543, экспедиционного гранта 14-05-10042, а также ООО «Северо-Запад».

Список литературы

1. 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. 2002. Москва, ГЕОН. 1 с.
2. Варенцов И. 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.
3. Голубцова Н. С., Соколова Е. Ю., рабочая группа ЛАДОГА. Построение трехмерной геоэлектрической модели района Ладожской аномалии электропроводности. Труды всероссийской конференции с международным участием «Глубинное строение и геодинамика Приладожья». 22–24 мая. 2017. ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск.
4. Ковтун А. А., Вагин С. А., Варданыц И. Л. Строение коры и мантии по профилю Суоярви–Выборг по магнитотеллурическим данным // Вестник СПбГУ. 1998. Сер. 4. Вып. 4. С. 25–34.
5. Ковтун А. А., Варданыц И. Л., Успенский Н. И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны. Вопросы геофизики. СПб., 2011, Вып. 44. С. 124–133.
6. Минц М. В. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннекембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М: Роснедра. РАН. Центр ГЕОКАРТ. 2010.
7. Минц М. В., Соколова Е. Ю., Глазнев В. Н., рабочая группа ЛАДОГА. Объемная модель глубинного строения Свеклофеннского аккреционного ороге-