

КОМПЛЕКС ГЛУБИННЫХ И РАЗВЕДОЧНЫХ СИНХРОННЫХ МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЙ НА ПРОФИЛЕ «ВЫБОРГ-СУОЯРВИ» ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАЗРЕЗА ЛАДОЖСКОЙ КОРОВОЙ АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Голубцова Н.С.¹, Епишкин Д.В.^{1,2}, Ковтун А.А.³, Мизинов Л. Г.^{1,2}, Пушкарев П.Ю.¹, Смирнов М.Ю.^{3,4}, Соколова Е.Ю.⁵, Таран Я.В.¹, Яковлев А.Г.^{1,2}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² ООО «Северо-Запад», Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет Оулу, Оулу, Финляндия

⁵ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

Аннотация

Представляется методика и актуальные результаты эксперимента МТ/МВ зондирования по линии «Выборг-Суоярви», воссоздающего глубинный разрез Ладожской аномалии электропроводности на основе использования современных возможностей магнитотеллурического метода. Построение сводных широкодиапазонных частотных зависимостей локальных и двухточечных передаточных функций по материалам синхронных наблюдений на платформах «Phoenix» и «LEMI» ведется с помощью признанных передовых технологий обработки данных зондирования, а также их новейших аналогов. Анализируются приемы и возможности шумоподавления при оценивании МТ и МВ откликов на фоне промышленных помех, изобилующих в Приладожье. В полученных псевдоразрезах передаточных функций выявляются субвертикальные зоны крупных разломов, а также яркий образ корового проводника на большей части профиля. Демонстрируются первые результаты 2D МТ инверсии по материалам разведочных зондирования «Phoenix» и обсуждаются подходы к построению итогового глубинного геоэлектрического разреза с его верификацией данными комплекса геофизических методов.

Summary

We present the methods and actual results of new “Vyborg-Suojarvi” profile MT/MV sounding, which is implemented for reliable reconstruction of deep cross-section of Lake Ladoga conductivity anomaly in the South-East Baltic Shield. The experiment is based on the extended potential of modern magnetotelluric method. The data of synchronous observations with «Phoenix MTU-5» and «LEMI-417M» equipment are used to construct joint “extra-broadband” (MT+LMT) frequency dependences of local and inter-stations transfer functions with a help of several modern processing codes. Sophisticated schemes of RR (“magnetic” or “magnetic + electric” remotes) and multi-RR estimations (basing on the data of permanent bases and geomagnetic observatories), which are applied to suppress abundant industrial noises, are comparatively considered. In the resulted pseudo sections of MT/MV responses the images of sub-vertical fault zones and the bright mid-crustal conductor are recognized. First results of 2D inversions of MT data of “Phoenix” soundings are presented. Approaches to the construction of resulting deep geoelectrical cross section and its verification by other geophysical data are discussed.

Методы и результаты

Магнитотеллурические (МТ) исследования основаны на использовании естественного переменного электромагнитного поля Земли и дают информацию о распределении электропроводности в её недрах. В современной постановке они включают в себя как классическую оценку тензора импеданса $[Z]$ по горизонтальным компонентам электрического и магнитного полей наблюдаемых в точке зондирования, так и оценки матрицы Визе-Паркинсона $[W]$ с использованием измерений локального вертикального магнитного поля и магнитного тензора $[M]$ по синхронным записям горизонтальных магнитных полей в рядовой и удалённой базовой точках.

Для интерпретации такого расширенного набора данных в последние годы применяются программы решения 2D и 3D обратных задач. Современные возможности робастных регуляризованных методов МТ/МВ инверсии позволяют строить надёжные и детальные геоэлектрические модели, несущие важную информацию о составе и строении, флюидном, термальном и реологическом режимах недр.

Аномалии повышенной электропроводности в консолидированной земной коре уже на протяжении нескольких десятилетий являются одним из основных объектов глубинных геоэлектрических исследований. Вклад в электропроводность вносят два механизма: электронная

а

проводимость, обусловленная наличием в горных породах графита или сульфидов, и ионная проводимость, связанная с присутствием в порах минерализованной воды или с частичным плавлением вещества. Коровые аномалии широко развиты в тектонически активных регионах, но нередко встречаются и на древних платформах. Многие из них маркируют глубинные ослабленные зоны, в том числе развитые по границам древних блоков земной коры, и характеризуются повышенным тепломассопереносом, обуславливающим формирование месторождений полезных ископаемых и геотермальных ресурсов.

Ладожская коровая аномалия электропроводности была выявлена магнитовариационными съемками 1970-х – 1980-х годов [Рокитянский и др., 1981] в юго-восточной части Балтийского щита, в районе Ладожского озера. Первые модели ее разреза были построены по МТ данным, накопленным уже в следующем десятилетии [Ковтун и др. 1998] на 200-км профиле «Выборг-Суоярви», проходящем через Северо-Западное Приладожье из Ленинградской области в Республику Карелия. Он оказался наиболее удобным для исследования, т.к. сечет аномалию в области ее существенной двумерности и пролегает вдали от электрифицированных железных дорог. Однако, по материалам 90-х годов надежное разрешение этой важной для построения эволюционных и металлогенических моделей Балтийского щита геоэлектрической структуры достигнуто не было.

Возрождение интереса к дальнейшему изучению Ладожской аномалии стало естественным в наши дни, когда магнитотеллурический метод достиг большого прогресса, как в технологиях зондирования, так и в методах анализа их данных. В 2013 и 2014 годах объединенными усилиями ООО «Северо-Запад», МГУ, СПбГУ и ИФЗ РАН на профиле «Выборг-Суоярви» удалось выполнить серию МТ зондирований [Golubtsova et al., 2014] в их современной постановке. Опорные трёхсуточные наблюдения были проведены в 8 пунктах с шагом около 25 км при помощи аппаратуры «LEMI-417M» (Львовский центр Института космических исследований НАНУ и НКАУ, Украина), при этом вариации магнитного поля измерялись с помощью феррозондовых магнитометров. Рядовые суточные наблюдения выполнены в 43 точках профиля (с шагом 3-5 км) аппаратурой MTU-5 (компания «Phoenix Geophysics», Канада); магнитные вариации регистрировались с использованием индукционных датчиков (катушек с ферромагнитными сердечниками). В 12 из этих пунктов проведены также и опытные однодневные зондирования «LEMI-417M». Наблюдения велись в попарно-синхронном режиме и сопровождалась одновременными записями в удаленных базовых пунктах BASE_2013, BASE_2014 (рис 1).

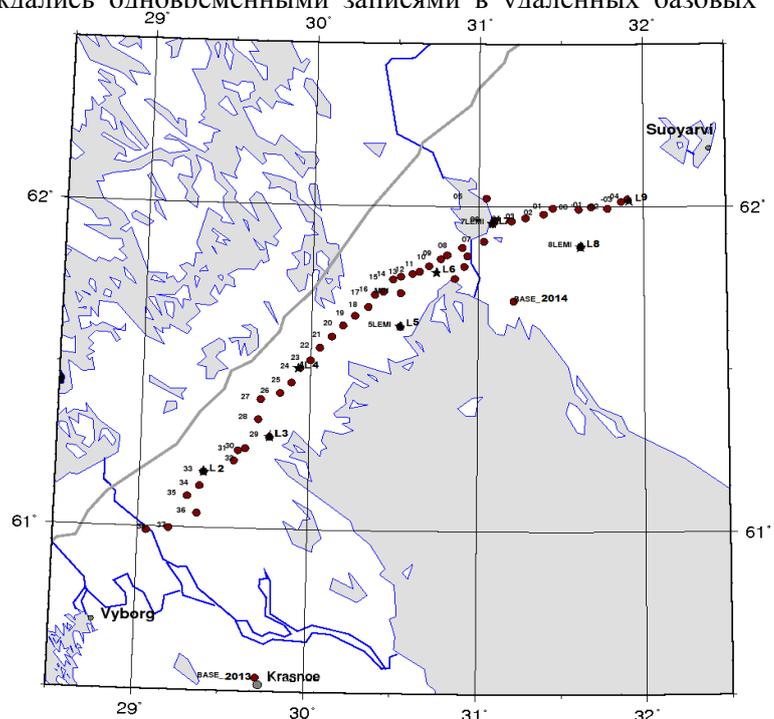


Рис. 1. Положение пунктов синхронных МТ/МВ зондирований на профиле Выборг-Суоярви, выполненных в 2013-2014г.г.: красные кружки – однодневные зондирования «Phoenix» (в п.05-17 выполнялись 1-3-х-дневные зондирования «Phoenix»+«LEMI»); черные звезды L2-L9– трехдневные зондирования «LEMI». Базовые пункты: BASE_2013г. (п. Красное) и BASE_2014г. Финские геомагнитные обсерватории Меккриярви, Нурмиярви (за пределами планшета, на расстоянии ~150 и 300км от профиля) использовались как дополнительные удаленные синхронные базы.

а

Стандартный граф обработки данных зондирований включал использование программного обеспечения SSMT2000 компании «Phoenix Geophysics» и MT-Corrector компании «Северо-Запад», а также программы PRC-MTMV [Варенцов и др., 2003; Varentsov, Sokolova, 2005]. Для подавления некоррелируемых помех от локальных промышленных источников привлекались синхронные магнитные записи в удаленных базовых пунктах (в том числе ближайших финских геомагнитных обсерваторий). В опорных МТ-ГМТ пунктах строились сводные частотные зависимости передаточных функций в диапазоне (0.003, 8000-10000)с. Для ряда зашумленных пунктов проводилось сопоставление МТ/МВ откликов с оценками, полученными по программе [Smirnov, 2003], а также с использованием новой разработки ООО «Северо-Запад» - алгоритма «Remote H+E», использующего как магнитные, так и электрические поля удаленных базовых пунктов [Epishkin, 2014].

Анализ полученных данных включал: построение частотных разрезов инвариантных параметров, полярных диаграмм импеданса и экстремальных эллипсов фазового и горизонтального магнитного тензоров, индукционных стрелок и т.д. (рис. 2). Он позволил оценить уровень приповерхностных искажений и применимость 1D и 2D приближений на разных частотах и участках профиля, а также сформировать ансамбли данных для последующего решения 1D, 2D и 3D обратных задач. По ансамблю квази-двумерных МТ данных в разведочном диапазоне проведена первая профильная инверсия.

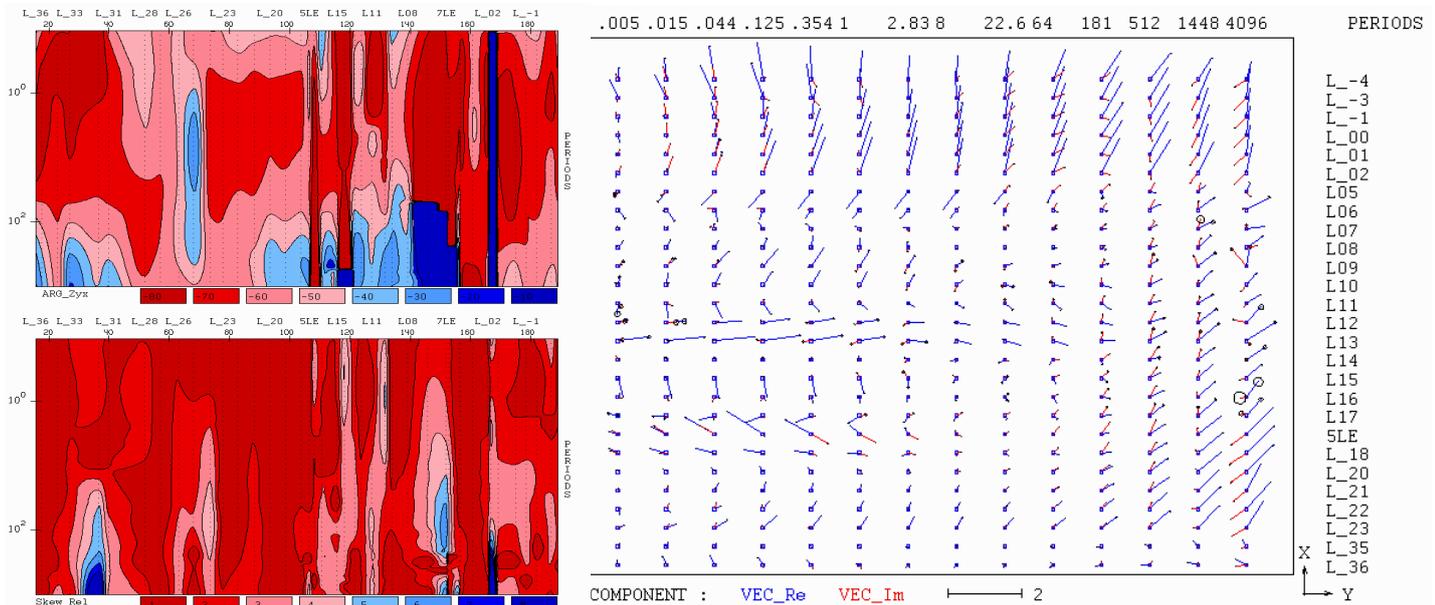


Рис. 2. Оценки МТ/МВ передаточных функций для профиля «Выборг-Суоярви», построенные по результатам обработки данных зондирований «Phoenix» и «LEMU». Левая колонка: псевдоразрезы Arg_Z_yx (EP) и Skew_CBV (по [Caldwell et al., 2004]). Справа – частотно-профильное распределение реальных и мнимых индукционных векторов (в конвенции Wiese).

Заключение

Предварительные результаты инверсии МТ данных «Phoenix» на профиле «Выборг-Суоярви» показывают сложную структуру Ладожской коровой аномалии электропроводности. Её дальнейшая детализация будет вестись в процессе совместных многокомпонентных МТ/МВ инверсий в широком диапазоне периодов в рамках 2D и 3D подходов, а также с помощью 3D электромагнитного моделирования. Истолкование итоговых результатов в комплексе с имеющимися по региону исследования сейсмическими и гравимагнитными данными, а также геоэлектрическими моделями других участков Ar-Pt шовных зон [Алексанова и др., 2013; Vaitinen et al., 2012] расширят существующие представления о глубинном строении и эволюции Балтийского щита и Восточно-Европейского Кратона в целом.

Авторы искренне благодарны Алексановой Е.Д. (ООО «Северо-Запад»), Куликову В.А. и Шустову Н.Л. (МГУ и ООО «Северо-Запад»), Лозовскому И.Н. (ИФЗ РАН) за активное участие в организации работ с аппаратурой MTU-5 и обработке полученных данных. Успешная реализация проекта была бы невозможна без поддержки со стороны сотрудников СПбГУ Вагина С.А., Варданянц И.Л. и Успенского Н.И. Также мы признательны сотрудникам КарНЦ РАН Шарову Н.В., Рязанцеву

П.А. и Нилову М.Ю. за неоценимую помощь при организации и проведении работ с аппаратурой ЛЕМ-417М, директору СПбФ ИЗМИРАН Копытенко Ю.А. и Сергушину П.А. за помощь в организации базового пункта в п. Красное. Особая благодарность - пионеру изучения Ладожской аномалии, Рокитянскому И.И., за интерес к работе и ценные обсуждения ее методики и результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, инициативный грант 13-05-00786 и экспедиционный грант 14-05-10042.

Литература

Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Логвинов И.М., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Соколова Е.Ю., Тарасов В.Н., Шустов Н.Л., Яковлев А.Г. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. №2. С. 32-38.

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 30-61.

Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданыц И.Л., Легенькова Н.П., Моисеев О.П., Смирнов М.Ю., Успенский Н.И. Строение коры и мантии по профилю Суоярви-Выборг по магнитотеллурическим данным. Вестник СПбГУ, серия 4, 1998, выпуск 4, № 25, с. 25-34.

Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности. Геофизический журнал, Украинская академия наук, 1981, № 3, с. 97-99.

Caldwell G.T., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. 158. 457-469.

Epishkin D. "Advances in remote references data processing: using remote electric channels". Abstracts of the 22nd EM Induction Workshop, Germany, Weimar, 2014.

Golubtsova N.S., Kovtun A.A., Kulikov V.A., Lozovsky I.N, Pushkarev P.Yu., Smirnov M.Yu., Sokolova E.Yu., Shustov N.L., Taran Ya.V., Vardanyants I.L., Yakovlev A.G. Lake Ladoga conductivity anomaly: pioneer and modern stage MT/MV studies across the Ar-Pt suture of the Baltic shield. Abstracts of the 22nd EM Induction Workshop, Germany, Weimar, 2014.

Smirnov, M.Yu. Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point // Geophys. J. Int. 2003. 152. P. 1-7.

Vahtinen, K., Korja, T., Kaikkonen, P., Lahti, I., Smirnov, M. Yu, 2012. High-resolution magnetotelluric studies of the Archaean-Proterozoic border zone in the Fennoscandian Shield, Finland. Geophys. J. Int. 188, 908-924.

Varentsov Iv.M., Sokolova E.Yu., EMTESZ WG. The magnetic control approach for the reliable estimation of transfer functions in the EMTESZ-Pomerania project // Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. 2005. C-95(386). P. 68-79.