

КОМПЛЕКС РАЗВЕДОЧНЫХ И ГЛУБИННЫХ МТЗ КАК ОСНОВА СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ: ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ЛАДОГО-БОТНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА

Соколова Е.Ю.<sup>1,2</sup>, Варданянц И. Л.<sup>3</sup>, Голубцова Н.С.<sup>4</sup>, Куликов В.А.<sup>4,5</sup>, Минц М.В.<sup>6</sup>, Пушкарев П.Ю.<sup>4</sup>, Смирнов М.Ю.<sup>3,7</sup>, Успенский Н.И.<sup>3</sup>, Яковлев А.Г.<sup>4,5</sup>

1- Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, Москва; 2 – Тюменский Государственный Университет, Тюмень; 3- Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург; 4 - Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва; 5 - ООО «Северо-Запад», Москва; 6 - Геологический институт РАН, Москва; 7 - Luleå University of Technology, Sweden

*Аннотация*

Протерозойские мобильные пояса, окружающих архейские ядра древних кратонов, служат важнейшим источником информации об эволюционных и металлогенических процессах докембрия. В комплексе геофизических методов их изучения все большую роль играют электромагнитные зондирования, в своей современной постановке обеспечивающие надежные сведения о коромантийных структурах и веществе.

В докладе представлена методика и результаты изучения глубинного строения Ладого-Ботнической зоны Балтийского щита с помощью синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований. Приоритет выбранного метода определялся яркой геофизической особенностью области исследования – наличием коровых аномалий электропроводности, маркирующих сочленение Карельского кратона и Свеккофенского коллизионного орогена, (включая Ладожскую – одну из крупнейших аномалий ВЕП).

Геоэлектрические данные по центральному участку ЛБЗ (ороген Саво) позволили верифицировать недавно построенную по геологическим и сейсмическим материалам (профиля «FIRE») тектоническую модель ЮВ Балтийского щита.

Развитие этой модели в область Приладожья опиралось на глубинный геоэлектрический разрез Ладожской аномалии по линии Выборг-Суоярви, полученный в результате 2D инверсии сводного ансамбля МТ/МВ передаточных функций, оцененных с помощью шумоподавляющих технологий по записям синхронных наблюдений в разведочном и глубинном диапазонах (станции Phoenix MTU5 и LEMI-417M). Структурно-тектонические особенности, выявленные в новом разрезе ЛА, закономерно сопрягаются со структурами ЛБЗ в ее СЗ продолжении, а также хорошо согласуются с результатами анализа региональных потенциальных полей. При выполнении тектонических построений материалы МТ\МВ зондирований эффективно восполнили отсутствие в северном Приладожье данных МОГТ.

PROSPECTING AND DEEP MTS AS A BACKGROUND FOR TECTONIC STRUCTURE STUDIES: EXPERIENCE FORM THE LADOGA-BOTHNIAN ZONE OF THE BALTIC SHIELD

Sokolova E.Yu.<sup>1,2</sup>, Vardaniantz I.L.<sup>3</sup>, Golubtsova N.S.<sup>4</sup>, Kulikov V.A.<sup>4,5</sup>, Mints M.V.<sup>6</sup>, Pushkarev P.Yu.<sup>4</sup>, Smirnov M. Yu.<sup>3,7</sup>, Uspenskiy N.I.<sup>3</sup>, Yakovlev A.G.<sup>4,5</sup>

1- Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow; 2 - Tyumen State University, Tyumen; 3 - St. Petersburg State University, St. Petersburg; 4 - Moscow State University, Moscow; 5 - Nord-West Ltd, Moscow; 6- Geological Institute RAS, Moscow; 7- Luleå University of Technology, Sweden

*Summary*

Proterozoic mobile belts, neighbouring stable Archaean cores of ancient Cratons, are important source of information on Precambrian evolution and metallogeny. Within the geophysical toolkit used for their studies modern magnetotelluric soundings become more and more valued instrument as they are capable of providing solid constraints on the structure and material properties of the Earth crust and upper mantle.

The paper presents methods and results of Ladoga-Bothnian zone investigations at the Baltic Shield which were held with a help of synchronous MT/MV soundings. The priority of this approach is determined by abundance of high contrast conductivity anomalies in LBZ, the borderline between Karelian Craton and Svecofennian Orogen. Primarily we show how geoelectric data at the central, Finnish, part of LBZ verify modern geotectonic model of Fennoscandia constructed on the data of active seismic experiment FIRE. Then we concentrate on new Viborg-Suoyarvi profile of broadband (Phoenix-MTU5) and deep (LEMI-417M) soundings of MSU, SPbGU, IPE RAS and Nord-West Ltd across prominent Lake Ladoga anomaly, and demonstrate how resistivity cross-section constructed by high resolution 2D MT/MV inversion helps to constrain and extend this geotectonic model into Ladoga area even in the absence of reflection seismic data.

### Цель, методы и результаты исследования

Изучение протерозойских мобильных поясов, окружающих стабильные архейские ядра древних кратонов, существенно расширяет знания о докембрийской эволюции и металлогении последних [Mints et al., 2016 и др.]. В подобных исследованиях все большую роль играют электромагнитные зондирования, в их современной постановке способные дать надежные сведения о корово-мантийных структурах и веществе [Weckmann, 2012; Yin et al., 2014 и др.]. На Балтийском щите это в полной мере относится к изучению Ладого-Ботнической зоны (ЛБЗ) долгоживущих глубинных разломов, маркирующей сочленение Карельского кратона и Свекофенского коллизионного орогена [Жамалетдинов, Кулик, 2013; Vaittinen et al., 2013]. В последней работе для области центральной части ЛБЗ (пояс Саво) с помощью МТЗ разведочного диапазона выявлены характерные чашеобразные структуры AR-PR сутуры. На российской территории большое внимание исследователей привлекает Ладожская аномалия электропроводности (ЛА) - одна из крупнейших (до 10000 См) коровых аномалий Восточно-Европейского кратона (ВЕК), впервые открытая методом магнитовариационного профилирования [Рокитянский и др., 1981] и далее многие годы изучаемая с помощью МТЗ группой геоэлектриков СПбГУ под руководством А.А. Ковтун [Ковтун и др., 1998; др.]. Однако, предметами дебатов до сих пор остаются ее природа, структурная приуроченность и тектонические режимы, сформировавшие аномалии ЛБЗ. Проекты группы LADOGA [Соколова и др., 2016], объединившей московских и Санкт-Петербургских геоэлектриков, имеют целью прояснить эти вопросы, обеспечив более высокое разрешения структуры электропроводности ЛА по материалам современных профильных МТ/МВ зондирований на Карельском перешейке (в области ее существенной двумерности). Наблюдения на линии Выборг-Суоярви (ВС), проведенные в ООО «Северо-Запад», МГУ, ИФЗ и КарНЦ РАН в рамках этих проектов, имели результатом 50 широкополосных и 20 длиннопериодных синхронных 5-ти компонентных зондирований с удаленными базами (рис. 1.)

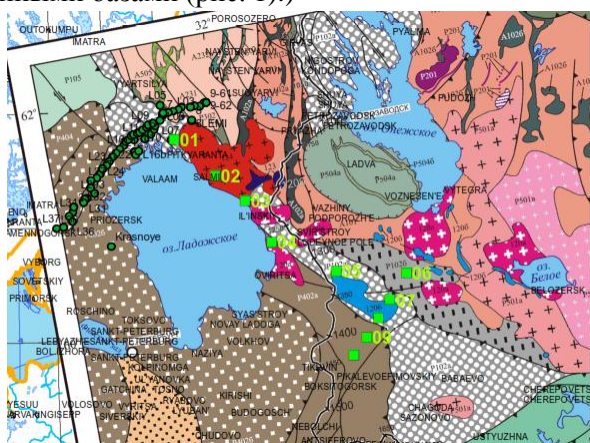
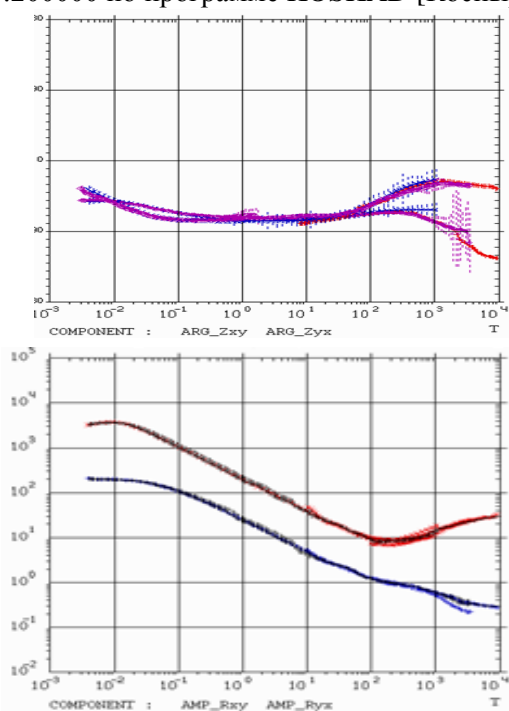


Рис. 1. Положение пунктов синхронных МТ/МВ зондирований на профиле Выборг-Суоярви, выполненных в 2013-2014г.г. (темно-зеленые кружки), и зондирований LEM1\_2016г. на ЮВ продолжении ЛБЗ (ЛА?), наложенное на геолого-тектоническую карту 1:2500000 ранне-докембрийского фундамента Восточно-Европейского кратона [Mints et al., 2016]. Черная линия – геотраверс 1-ЕВ.

Помехоподавляющая обработка по робастным программам (SSMT2000, «Phoenix Ltd», Corrector и Remote N+E, ООО «Северо-Запад», PRC-MT-MV, ЦГЭМИ ИФЗ РАН) в схемах RR и RRMC (с контролем планарности внешних магнитных полей в удаленных пунктах) [Варенцов и др., 2003; Varentsov, Sokolova, 2005; Epishkin, 2014]) обеспечила для большинства пунктов оценки локальных (импеданс Z, типпер Wz) и двухточечных (магнитный тензор M) передаточных функций в МТ (0.003-2048, 4096с) или сводном МТ-ГМТ (0.003-8000, 10000с) диапазонах (рис. 2). Для стабилизации длиннопериодных оценок по схеме multi-RR и «синхронизации» данных различных полевых кампаний использовались записи геомагнитных обсерваторий (Nurmijarvi, Mekrijarvi, Suwalki и Красное). Инвариантный анализ полного ансамбля данных выявил главное направление простирания геоэлектрических структур (45-50°NE) и их размерность (квази-2D с локальными 3D искажениями) и, следовательно, возможность 2D интерпретации [Соколова и др., 2016].

Для построения модели глубинного разреза электропроводности ЛА была предпринята 1D- и серия 2D-инверсий по различным программам, начиная от сглаженных частичных инверсий [Siripunvaratorn, Egbert, 2002], до многокомпонентной, с учетом локальных 3D искажения [Varentsov, 2007], давшей наибольшее разрешение. Серия полого погружающихся к ЮЗ неоднородных проводящих горизонтов в средней коре, выходящих на поверхность в виде известных разломов, явилась наиболее яркой и устойчивой общей чертой большинства получаемых решений (рис. 3), хорошо согласующейся с элементами плотностной модели ЮВ Балтийского щита [Glaznev et al., 2015]. Большее разрешение верхней коры в результатах частичных инверсий Wz и Нр-импедансных данных позволило выявить чашеобразные проводящие структуры, коррелирующиеся с результатами

[Vaittinen et al., 2013] для СЗ ЛБЗ и аналогичными структурами в распределении эффективной магнитной восприимчивости вдоль линии ВС, которые дала инверсия материалов магнитной съемки 1:200000 по программе KOSKAD [Коснырева М.В., персональные коммуникации].



а

б

Рис. 2. Методика обработки МТ-ГМТ зондирований (по результатам наблюдений в т. L05). (а) - оценки фаз (ARG\_Z, град.) главных компонент импеданса: по данным LEMI-417 (красная кривая - робастное осреднение локальных одноточечных, *Single Site*, SS, оценок и оценок, полученных по методу удаленной базы, *Remote Reference*, RR, с привлечением наблюдений в 3 удаленных пунктах, по программе обработки PRC-MTMV); и по данным «Phoenix MTU5» (сплайн, проведенный программой Corrector по RR оценкам SSMT2000 с использованием наблюдений на базе 2014г., синяя кривая), а также по программе PRC-MTMV (сиреневая кривая); (б) – оценки  $R_{ox, yx}$  (Омм), соответствующие оценкам (а), и итоговая широкодиапазонная частотная зависимость (черная кривая), полученная с помощью их робастного би-координатного осреднения.

ЮВ Балтийского щита пересечен профилями сейсмических зондирований МОГТ проектов FIRE и 1-ЕВ. Эти данные вместе с геологическими материалами составили основу для построения региональной геотектонической модели в [Mints et al., 2016] (рис. 3). Привлечение материалов геоэлектрических исследований [Korja et al., 2002; Vaittinen et al., 2013] верифицировало эту модель и помогло обогатить «сейсмо-геологический» скелет вещественным наполнением в глубинной области. Благодаря высокоразрешающим новым МТ/МВ зондированиям профиля Выборг-Суоярви развитие геотектонической модели в ЮВ направлении (в область ЛА в северном Приладожье) стало возможным даже в отсутствии адекватных сейсмических материалов (рис. 3).

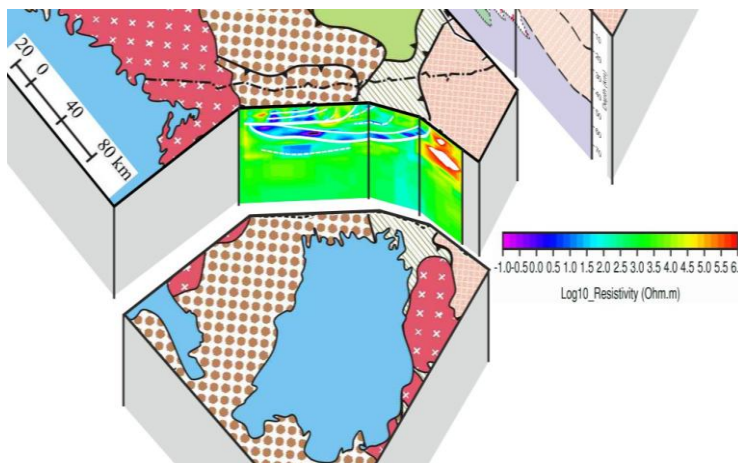


Рис. 3. Фрагмент объемной геолого-тектонической модели ЮВ Балтийского щита [Mints et al., 2016] и инкорпорированный разрез сопротивлений (согласно цветовой шкале,  $\log_{10} \Omega \cdot \text{м}$ ) по линии Выборг-Суоярви (результат 2D инверсии детерминанта импеданса) со структурно-тектоническими линиями, отвечающими принятой геотектонической концепции надвига Свекофенского аккреционного орогена на перикратонную область Карельского блока.

### Выводы

Новые зондирования Ладожской аномалии электропроводности, осуществленные МГУ, СПбГУ и ИФЗ РАН в партнерстве с ООО «Северо-Запад», КарНЦ и КолНЦ РАН, позволили преодолеть ограничения предшествующих МТ работ (отсутствие тензорных данных, редкая сеть наблюдений) и достигли большего разрешения проводящих структур коры в сечении по линии Выборг-Суоярви.

Интерпретация в тектонических терминах имеющихся и вновь полученных геоэлектрических образов коры Ладого-Ботнической зоны верифицировала построенную ранее по геологическим и сейсмическим материалам объемную региональную геотектоническую модель ЮВ Балтийского щита, а также послужила основой дальнейшего развития последней в область северного Приладожья, восполнив отсутствие здесь данных МОГТ.

### *Благодарности*

Авторы искренне благодарны всем сотрудникам ООО «Северо-Запад» и МГУ, а также студентам и магистрантам, принимавшим активное участие в полевых наблюдениях и их обработке. Мы признательны сотрудникам КарНЦ РАН Шарову Н.В., Рязанцеву П.А. и Нилову М.Ю., а также сотрудникам КолНЦ РАН Жамалетдинову А.А., Шевцову А.Н. и Скороходову А.А. за помощь в организации и проведении полевых работ с аппаратурой ЛЕМ-417М, директору СПбФ ИЗМИРАН Копытенко Ю.А. и его сотруднику Сафонову В.А. за помощь в организации базового пункта в п. Красное. Благодарим сотрудников Московского и Воронежского государственных университетов, М.В. Косныреву, Л.А. Золотую и В.Н. Глазнева за верификацию новых геоэлектрических моделей результатами анализа потенциальных полей по области исследования.

Особая благодарность - пионеру изучения Ладожской аномалии, профессору И.И. Рокитянскому, за интерес к работе и ценные обсуждения ее методики и результатов.

Замысел и успешная реализация проекта были бы невозможны без опоры на опыт, накопленный багаж знаний о Ладожской аномалии, всемерную поддержку и энтузиазм профессоров СПбГУ А.А. Ковтун и С.А. Вагина, к глубокому прискорбию недавно ушедших.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (инициативные гранты 13-05-00786, 15-05-01214, 16-05-00543, экспедиционный грант 14-05-10042), а также ООО «Северо-Запад».

### *Литература*

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.

Жамалетдинов А.А. и С.Н. Кулик. Крупнейшие аномалии электропроводности мира. // 2012. *Геофизический журнал* № 4, Т. 34. Киев, Наукова Думка. С. 22-39.

Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданянц 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.

Соколова Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Пушкарев П.Ю., Рокитянский И.И., Таран Я.В., Яковлев А.Г. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности. *Геофизика*, 2016, № 1, с. 48-61.

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

Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M., Raevsky A.B., Osipenko L.G. Complex geological-geophysical 3D model of the crust in the southeastern Fennoscandian Shield: Nature of density layering of the crust and the crust-mantle boundary // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2015. V. 6. № 2. P. 133–170.

Mints M.V., Dokukina K.A., Konilov A.N. et al. East European Craton: Early Precambrian history and 3D model s of deep cr ust al str ucture. *Geol. Soc. Of Amer., Special Paper*. 2015. V. 510. 433 p.

Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data. *Geophysics*, 2000, 65, 3, p. 791-803.

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.

Varentsov Iv.M. Joint robust inversion of magnetotelluric and magnetovariational data // *Electromagnetic s ounding of the Earth's interior (Methods in geochemis try and geophys ics , 40, Ed. V.V. Spichak)*. Elsevier. 2007. P. 189-222

Weckmann U. Making and Breaking of a Continent: Following the Scent of Geodynamic Imprints on the African Continent Using Electromagnetics // *Surv Geophys.* 2012. 33:107–134.

Yin Y., M. Unsworth, M. Liddell, D. Pana, J. Craven. Electrical resistivity structure of the Great Slave Lake shear zone, northwest Canada: implications for tectonic history. *Geophys. J. Int.* (2014) **199**, 178–199.