

## *Глубинное геоэлектрическое строение юго-восточного Приладожья по результатам анализа обобщенного ансамбля данных многолетних МТ/МВ исследований*

**Соколова Елена Юрьевна<sup>1,2</sup>, Голубцова Нина Сергеевна<sup>3</sup>, Ионичева Анна Павловна<sup>3</sup>, Зайцев Сергей Владимирович<sup>3</sup>, Ковачикова Светлана<sup>4</sup>, Куликов Виктор Александрович<sup>3</sup>, Минц Михаил Вениаминович<sup>5</sup>, Нилов Михаил Юрьевич<sup>6</sup>, Пушкарев Павел Юрьевич<sup>3</sup>, Рокитянский Игорь Иванович<sup>7</sup>, Фельдман Игорь Сергеевич<sup>8</sup>, Яковлев Андрей Георгиевич<sup>9</sup>, Рабочая группа LADOGA**

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва*

<sup>2</sup> *Отделение «ВНИИГеосистем» ФГБУ «ВНИГНИ», Москва*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

<sup>4</sup> *Geophysical Institute CAS, Прага*

<sup>5</sup> *Геологический институт РАН, Москва*

<sup>6</sup> *Геологический институт Карельского НЦ РАН, Петрозаводск*

<sup>7</sup> *Институт геофизики им. С.И.Субботина, НАНУ, Киев*

<sup>8</sup> *ООО «ЕМГЕО», Москва*

<sup>9</sup> *ООО «Северо-Запад», Москва*

### **Введение**

Теоретический и практический интерес к изучению геоэлектрического строения подвижных поясов древних кратонов связан с тем, что электронно-проводящие объекты, характерные для их глубинной архитектуры, могут служить яркими маркерами структур докембрийской тектоники и, как правило, приурочены к важным минерагеническим зонам. Благодаря первым магнитовариационным исследованиям конца 70-х в пределах юго-восточного сегмента Ладого-Ботнической подвижной зоны (ЛБЗ), сочленяющей Карельский (архейский) и Свекофенский (палеопротерозойский) геоблоки Фенноскандинавского щита, была открыта одна из самых крупных на ВЕП, Ладожская аномалия электропроводности (ЛА) [Рокитянский и др, 1981; Глубинное строение..., 2004].

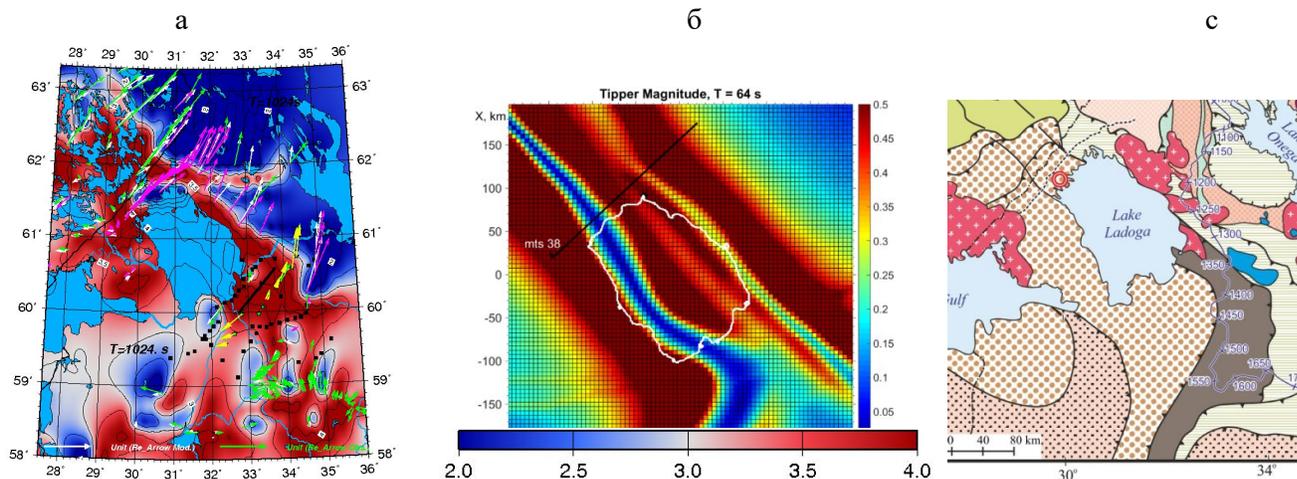
Представления о структуре электропроводности ЛА неуклонно совершенствовались, главным образом, благодаря геоэлектрикам Ленинградской школы [2011]. Однако, к началу второго десятилетия нашего века они оставались недостаточно определенными для проведения содержательной геологической интерпретации. Новые экспериментальные исследования на основе современных технологических и методических подходов были предприняты Рабочей группой LADOGA, объединившей геоэлектриков ряда исследовательских центров с целью построения более разрешенных моделей глубинной электропроводности области ЛА. В период 2013-2015г.г. при поддержке РФФИ и ООО «Север-Запад» были осуществлены синхронные профильные магнитотеллурические и магнитовариационные (МТ\МВ) зондирования в Северном Приладожье [Соколова и др., 2016], Геологическая интерпретация полученного геоэлектрического разреза по линии Выборг-Суоярви, в области существенной двумерности ЛА, представлена в [Минц, Соколова, Рабочая группа LADOGA, 2018].

В то же время, как было известное еще по итогам предшествующих работ (1978-2001г.г.), структура ЛА в Южном Приладожье является более сложной. Для ее уточнение потребовались новые зондирования на северо- и юго-востоке от озера, в областях уже перекрытых платформенным чехлом [Соколова, Рабочая группа Ладога, 2017; Куликов и др., 2019]. Материалы обработки зондирований 2018г. по профилю «Кириши-Подпорожье» вместе с первыми результатами их двумерной инверсии анализируются в последней работе.

В настоящем докладе делается акцент на интеграцию данных синхронных МТ-ГМТ зондирований проекта LADOGA с данными, полученными по площади ЮВ Приладожья в течении всего длительного периода его изучения: от пионерских работ 70-х методом МВП до МТЗ/МВП зондирований Министерства геологии РФ начала двухтысячных на опорном геотравесе 1ЕВ и профилях программы «Московская синеклиза».

#### Используемые данные и методы их анализа

В сводный ансамбль помимо материалов группы LADOGA 2013-2018г. вошли результаты следующих работ (рис. 1а): осредненные по периодам 1000-1800с вектора индукции по [Рокитянский и др., 1981] и данные [Rajunpää, 1987] на периодах 10, 100, 1000с; МТ/МВ данные зондирований «Phoenix» и ЦЕС-М сегмента геотравеса 1ЕВ [Берзин и др., 2002] и МТ данные ЦЕС-М с профилей программы «Московская синеклиза» [Фельдман, Эринчек, 2009] на участке Ладожской моноклинали в диапазоне (0.01-4096)с. Критериями отбора служили удовлетворительные оценки погрешностей МТ и МВ передаточных функций, выполнение дисперсионных соотношений и пространственная согласованность характера их частотных зависимостей.



**Рис. 1. Актуальные представления о пространственном распределении аномальной коровой электропроводности в регионе Приладожья:**

(а) - распределение интегральной электропроводности в тонком слое на глубине 15 км (по цветовой шкале в  $\lg(S, \text{См})$ ) как результат пленочной 3D инверсии по программе [Kováčiková et al., 2005] и действительные вектора индукции: наблюдаемые (зеленые – на российской территории [Рокитянский и др., 1981] и прилегающей финской [Rajunpää, 1987] для  $T=1000-1800$ с, а также на сегменте «Петля» геотравеса 1ЕВ [Берзин и др., 2002] для  $T=1024$ с; розовые – результаты проекта LADOGA 2013-2017г.г. [Соколова, Рабочая группа ЛАДОГА, 2017].) и подобранные (белые) в конвенции Визе (в направлении «от проводника»). Желтыми стрелками изображены локальные оценки индукционных векторов в пунктах зондирований, добавленных в 2018г. [Куликов и др., 2019]. Масштаб длин всех векторов

задан показанными единичными стрелками. Большими черными квадратами показаны пункты предшествующих МТ/АМТ зондирований, включенные в сводный МТ-АМТ ансамбль по [Фельдман, Эринчек, 2009] (большие значки). Мелкие значки – АМТ профиль СПбГУ [Stepanov et al., 2016].

(б) – распределение амплитуд действительного типпера  $W_z$  для  $T=64c$ , полученное с помощью 3D ЭМ моделирования по программе [Mackie et al., 1998] для объемной прогнозной модели электропроводности области ЛА [Golubtsova et al., 2017];

(в) - фрагмент геологической карты докембрийского фундамента ВЕК из [Мици, Соколова, Рабочая группа LADOGA, 2018], согласно легенде которой коричневым и тонами желтого с крапами показаны гранулитогнейсовый пояс Лапландско-Среднерусского коллизионного орогена; тонами фиштаккового – вулканогенно-осадочные, супракристалльные породы, синим – тела габбро, пироксенитов, анортозитов, выделенные по геофизическим данным; красными и розовыми оттенками граниты-рапакиви и гранитизированные AR комплексы, соответственно).

Анализируются карты инвариантных МТ/МВ параметров (индукционных векторов, фазовых тензоров), отражающие пространственно-частотный характер ЭМ откликов аномальнопроводящих структур земной коры и позволяющие получать начальные представления об их пространственном поведении. Разработанные ранее глубинные геоэлектрические модели проходят верификацию и совершенствуются благодаря применению новых приемов количественной интерпретации: начиная от многокомпонентных 2D инверсий по различным программам и квази-3D МВ инверсий (в пленочном варианте, по [Kováčiková et al., 2005]), до первых расчетов по программе объемной 3D МТ/МВ инверсии с использованием кода [Kelbert, et al., 2014].

### **Предварительные результаты**

Этап инвариантного анализа МВ (векторов индукции, представленных на рис. 1а) и МТ (фазовых тензоров) данных по ЮВ Приладожью позволил наметить крупную проводящую коровую структуру с простиранием ( $50^\circ$ СВ). С учетом результатов интерпретации данных зондирований на профиле Выборг-Суоярви [Соколова, Рабочая группа Ладога. 2017] было сделано предположение о ее связи со структурами ЛА, известными в Северном Приладожье.

Продвижение в понимании расположения аномально проводящих «ветвей» ЛА в Южном Приладожье дала пленочная 3D инверсия МВ данных сводного ансамбля по всей площади аномалии (по статусу 2017г.). Она подтвердила наличие двух ветвей коровых проводников, разделенных относительно изолирующей областью, на профиле В-С-2 и менее разрешенных (возможно, из-за недостаточного количества используемых данных) на ЮВ берегу (рис. 1а) [Golubtsova et al., 2017]. Эти сведения были использованы при построении первой прогнозной объемной модели коровой электропроводности области ЛА, включающей два «эффективных» проводника: СВ верхнее-средне-коровый, условно «метаосадочный», и ЮЗ средне-коровый, условно «гранулитовый» (их отклики на  $T=64c$  представлены на рис. 1б). Моделирование показало, что для такой модели с увеличением периода влияние СВ проводника ослабевает, и уже на для  $\sim 1000c$  вся аномальная зона проявляется как один мощный ЮЗ проводник - именно он и был выявлен длиннопериодными МВ зондированиями [Рокитянский и др., 1981]. Сравнение рис. 1б и 1с демонстрирует пространственную корреляцию проводников с конфигурацией гранулитового пояса и простиранием Раахе-Ладожской зоны.

Следует отметить, что приведенные в [Куликов и др. 2019] предварительные результаты 2D инверсии эффективного импеданса и типпера, выполненной с использованием программы ZONDMT2D, пока не позволили различить северный и южный проводники ЛА на Ладожской моноклизе. Большее разрешение мы надеемся получить с помощью дополнительных профильных 2D инверсии МТ/МВ материалов по части сегмента «Петля» геотраверса 1ЕВ и его СВ продолжения на профиле 2016г. проекта LADODA, а также – в ходе ведущейся полной 3D инверсии всех компонент сводного ансамбля по ЮВ Приладожья.

Исследования проведены в рамках работ по гранту РФФИ 16-05-00543А.

### 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. Тезисы. 1с.
2. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления / под ред. Н. В. Шарова. Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН. 2004. 352с.
3. Ковтун А.А., Варданянц И.Л., Успенский Н.И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны. Вопросы геофизики. СПб., 2011, Вып. 44 С. 124-133.
4. Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Десятов Д.О., Ионичева А.П., Пушкарев П.Ю., Сумарокова Е. С. Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю «Кириши-Подпорожье» 2018г. Материалы конференции «Гоевразия-2019».
5. М. В. Минц, Е. Ю. Соколова, Рабочая группа LADOGA. Объемная модель глубинного строения Свекофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования. // Труды Карельского научного центра РАН № 2. 2018. С. 34–61.
6. Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности // Геофиз. журнал. Украинская академия наук. 1981. Том 3. №2. С. 97–99.
7. Соколова Е.Ю., Н.С. Голубцова, А.А. Ковтун и др. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. — 2016. — № 1. — С. 48–61.
8. Соколова Е.Ю. и рабочая группа ЛАДОГА. Эксперимент синхронного МТ/МВ зондирования Ладожской аномалии электропроводности: новые свидетельства о структуре коры юго-востока Балтийского щита. В кн.: Глубинное строение и геодинамика Приладожья. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск. 2017. С. 205-214.
9. Фельдман И.С., Эринчек Ю.М. Геоэлектрическая модель земной коры вдоль профиля I-ЕВ (Балтийский щит – Прикаспийская синеклиза). Материалы Всероссийской школы-семинара по электромагнитным исследованиям Земли. г. Москва, 2009.

10. *Golubsova N.S., Kováčiková, S., Sokolova e.Yu., LADOGA WG.* (2017). Study of the deep conductivity structure of Lake Ladoga region: quasi-3D and 3D models. In: Deep structure and geodynamics of Lake Ladoga region. Petrozavodsk, Inst. of Geology of the KRC RAS. P.287-291.
11. *Kelbert A., N. Meqbel, G. D. Egbert, K. Tandon.* ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers & Geosciences* 66 (2014) 40–53.
12. *Kováčiková, S., Červ, V. and Praus, O.,* (2005). Modelling of the conductance distribution at the eastern margin of the European Hercynides, *Studia geophys. geod.*, 49, 403-421
13. *Pajunpää, K.,* 1987. Conductivity anomalies in the Baltic Shield in Finland. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 91, 657-666.
14. *K. Stepanov, K. Antashchuk, A. Saraev.* Clarification of Pasha Rift Structure in Pasha-Ladoga Basin Based on AMT and Gravity Data // *Geophysica*, 2016, 51(1), 51–67.

**Deep geoelectric structure of the southeastern Ladoga region inferred from the analyses of MT/MV data ensemble integrating the results of long standing investigations**

**Golubtsova N.S. (MSU), Ionicheva A.P. (MSU), Zaytsev S.V. (MSU), Kovacikova S. (GI CAS), Kulikov V.A. (MSU, Nord-West Ltd), Mints M.V. (GI RAS), Nilov M.Yu. (Kar. RC RAS), Pushkarev P.Yu. (MSU), Rokytianski I.I. (IG NANU), Sokolova E.Yu. (VNIGNI, IPE RAS), Feldman I.S. («EMGEO» Ltd), Yakovlev A.G. (MSU, Nord-West Ltd )**

We analyze an ensemble of magnetotelluric and magnetovariational (MT/MV) transfer functions over the area on the South-Eastern shores of Lake Ladoga/ The ensemble integrates the good quality data collected during the whole period of the geoelectrical investigations of this region: from the pioneering magnetovariational sounding of 70-80<sup>th</sup> and RF Ministry of Geology MTS/MVP works of 00<sup>th</sup> (transect 1-EU and profiles of “Moscow syncline” project) – to the broadband and long-period synchronous soundings in the frames of academician “Ladoga” project, 2016-2018.

The maps of the MT\MV transfer function invariants reveal the spatial-frequency character of the EM responses of the anomalously conductive structures, which are present here at different crustal levels. The geoelectric models developed earlier are verified and improved due to application of the adequate approaches of modern quantitative (multi-component 2D and 3D) interpretation.

Considering the results of MT/MV data inversions together with final regional volume EM modeling as well as potential fields’ behavior and modern geological knowledge on the deep structure of the Baltic shield and Moscow syncline junction area we discuss the hypotheses on the Lake Ladoga conductivity anomaly nature and the continuation of its structures under the platform sedimentary cover.

The studies were carried out within the framework of the RFBR grant 16-05-00543A.