

## Результаты площадных работ методом МТЗ в Южном Приладожье

В.А. Куликов<sup>1</sup>, А.П. Ионичева<sup>1</sup>, П.Ю. Пушкарев<sup>1</sup>, Е.Ю. Соколова<sup>2</sup>, А.Г. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, [vic@nw-geo.ru](mailto:vic@nw-geo.ru), [yaroslavtseva.anna@gmail.com](mailto:yaroslavtseva.anna@gmail.com),  
[pavel\\_pushkarev@list.ru](mailto:pavel_pushkarev@list.ru), [mail@nw-geo.ru](mailto:mail@nw-geo.ru)

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, [sokol\\_l@mail.ru](mailto:sokol_l@mail.ru)

---

### АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты магнитотеллурических работ, выполненных за последние 3 года сотрудниками кафедры геофизики МГУ им. М.В. Ломоносова в Южном Приладожье. Ладожская аномалия электропроводности была открыта около 50 лет назад и является одной из наиболее изученных электроразведочными методами коровых аномалий на территории России. Основной объем работ методом МТЗ в 70-90 годы прошлого столетия был сконцентрирован в Северном Приладожье, тогда как южная часть Ладожской аномалии изучалась в меньшей степени. Это связано, с одной стороны, с высоким уровнем промышленных помех в Южном Приладожье от электрифицированных железных дорог г. Санкт-Петербург – г. Мурманск и г. Санкт-Петербург – г. Вологда, а, с другой стороны, с увеличением мощности проводящих осадков, выполняющих роль экрана при изучении коровых структур. Работы последних лет позволили собрать в Южном Приладожье набор площадных данных МТЗ высокого качества и провести 3D инверсию. В геоэлектрической модели выделяются две зоны коровой аномальной электропроводности юго-восточного и северо-восточного направлений. Первая является продолжением известной Ладожской аномалии. Вторая зона была выявлена в начале 80-х годов прошлого столетия по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных Игорем Ивановичем Рокитянским, она маркирует границу между Новгородским массивом и Валдайским поясом.

**Ключевые слова:** Ладожская аномалия, магнитотеллурическое зондирование, коровые проводники, Восточно-Европейский кратон.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В 2013 году была образована Рабочая группа ЛАДОГА, в которую вошли сотрудники кафедры геофизики Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, ИФЗ РАН, Института геологии КарНЦ РАН и компании ООО «Северо-Запад». Основная цель группы ЛАДОГА - дальнейшее и более детальное изучение глубинной электропроводности в районе Ладого-Ботнической шовной зоны. В период с 2013 по 2018 г. основные работы группы ЛАДОГА были сосредоточены в Северном и Северо-Восточном Приладожье (Соколова и др., 2016; Куликов и др., 2019). Начиная с 2018 года, основной объем работ был перенесен в Южное Приладожье, где за три года было организовано 5 экспедиций, снято более 100 точек МТЗ. Полученные данные были проанализированы на качественном уровне - построены карты и разрезы параметров тензора импеданса и фазового тензора, полярные диаграммы, определены основные направления. По отдельным профилям была проведена 1D и 2D инверсии. Проведен первый вариант трехмерной инверсии МТ-данных Южного Приладожья.

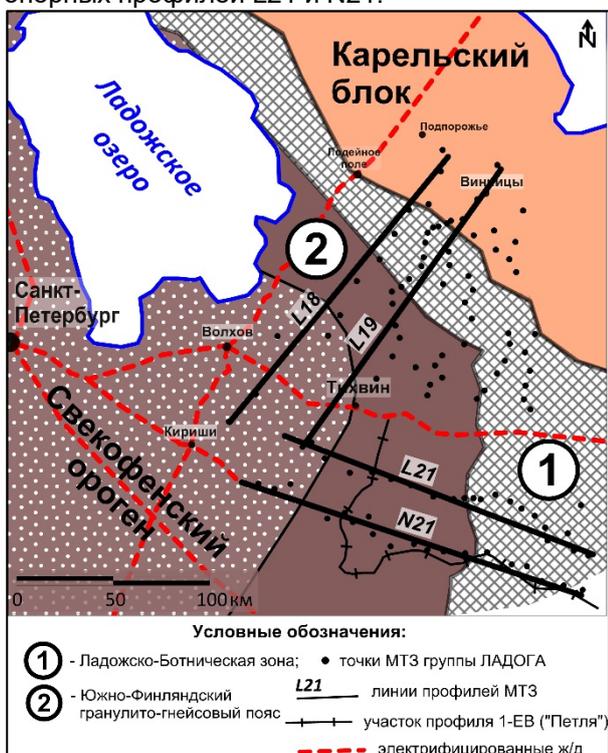
### МЕТОДИКА

При проведении магнитотеллурических измерений использовалось два вида аппаратуры: низкочастотные станции LEMI-417M (ЛЦ ИКИ, Украина) и магнитотеллурические станции «МЭРИ-ПРО», разработанные в компании ООО "Северо-Запад" (г. Москва), с датчиками магнитного поля IMS-010 (ООО «Вега», г. Санкт-Петербург). Станции LEMI-417M использовались только на начальной стадии работ в Южном Приладожье, а основной объем измерений был выполнен со станциями «МЭРИ-ПРО». Регистрировались пять компонент МТ-поля.

Общий объем измерений методом МТЗ в Южном Приладожье с 2018 по 2021 г. составил более 100 ф.т. (физических точек). В 2018, 2019 и 2021 годах работы выполнялись (рисунок 1) в профильном варианте по линиям Кириши-Подпорожье (профиль L18), Тихвин-Винницы (профиль L19), Струнино-Долоцкое (профиль L21), Будогощь-Климовщина (профиль N21). По этим профилям была проведена двумерная интерпретация и построены глубинные модели удельного электрического сопротивления (УЭС) (Kulikov et al, 2020).

Для качественного площадного анализа данных и трехмерной инверсии к материалам,

полученным группой ЛАДОГА в 2018-21 гг., были добавлены результаты магнитотеллурических работ на профиле 1-ЕВ (рисунок 1). Для того, чтобы согласовать результаты работ группы ЛАДОГА со старыми данными профиля 1-ЕВ, зимой и летом 2021 года были проведены повторные измерения на отдельных точках опорных профилей L21 и N21.



**Рисунок 1.** Положение точек МТЗ в Южном Приладожье.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе качественного анализа МТ-данных можно выделить два основных направления проводящих структур в земной коре. В северной части площади работ главное направление северо-западное, отвечающее простиранию Ладожско-Ботнической зоны. На основании поведения индукционных векторов можно заключить, что при продвижении на юг направление проводника изменяется с СЗ на субмеридиональное. Общая ширина аномальной области составляет около 80 км, но максимальные проводимости прослеживаются по ее северо-восточному флангу. В южной части площади работ превалирует северо-восточное направление проводников, что отвечает азимуту простирания Южно-Финляндского гранулитового пояса (рисунок 2).

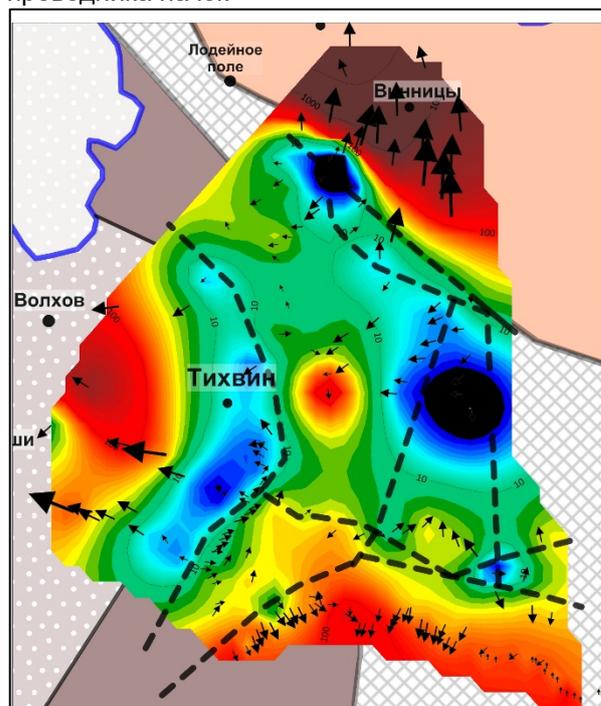
Трехмерная инверсия магнитотеллурических данных осуществлялась с помощью программы ModEM (Egbert and Kelbert, 2012; Kelbert et al., 2014).

В качестве стартовой модели использовалось

однородное полупространство сопротивлением 1000 Ом·м. По горизонтали модель была разбита на ячейки размером 3000\*3000 м, мощность первого слоя составила 50 м, размер ячеек вертикальной сетки увеличивался с глубиной.

Качество решения обратной задачи определяется расхождением между наблюдаемыми и модельными данными. В программе ModEM для оценки точности подбора используется параметр nRMS (среднеквадратичная невязка, нормированная на ошибку данных). Мы использовали в качестве критерия остановки вычислений условие  $RMS \leq 3$ .

Наиболее ярким результатом 3D инверсии является выделение Ладожского корового проводника, ось которого лежит примерно на линии продолжения северо-восточного берега Ладожского озера. На картах-срезах УЭС до 20 км мы можем увидеть загиб Ладожского проводника на юг.



**Рисунок 2.** Карта эффективной компоненты кажущегося сопротивления на периоде 100с. Черными стрелками обозначены действительные индукционные вектора (в конвенции Визе – «от проводника»), по результатам анализа амплитуд и азимутов которых намечены оси коровых проводников (пунктирные линии).

Вторая область низких УЭС находится на пересечении профилей 1-ЕВ и L21. Предположительно, этот проводник имеет северо-восточное направление и проходит дальше на север несколько восточнее г. Тихвин. К сожалению, в этой части площади работ

откартировать его положение затруднительно из-за пересечения электрифицированной железной дороги г. Санкт-Петербург – г. Вологда. Для уточнения глубинного строения коровых проводников и сравнения с предыдущими вариантами двумерной интерпретации, мы провели сопоставление глубинных разрезов УЭС, полученных по 3D и по 2D инверсиям по профилям L18, L19, L21 и N21.

Профили L18 и L19 имеют северо-восточное направление и пересекают практически в крест Ладожскую аномалию.

Основные черты проводящих зон земной коры ЮВ Приладожья, полученные по результатам 2D и 3D инверсий, близки (рисунок 3). Наиболее крупная проводящая структура Ладожской аномалии имеет наклон около  $40^\circ$  в юго-западном направлении, погружаясь под Южно-Финляндский пояс. Минимальные значения УЭС в ее пределах фиксируются в районе профиля L19 на глубинах 12-20 км. На северном профиле L18 присутствует еще одна проводящая субвертикальная зона, расположенная западнее (под т. 4, т. 5) и соединяющаяся на глубинах около 20 км с основной осью Ладожского проводника. Эта зона приурочена к известной палеорифтовой структуре - Ладожско-Пашскому грабену, который изучался ранее аудиоманнителлурическими методами (Stepanov et al, 2016).

Азимут профилей L21 и N21 близок к широтному. Профили закладывались, в первую очередь, для изучения глубинной структуры проводника северо-восточного направления, ортогонального Ладожской зоне. Геоэлектрические модели по профилям L21 и N21 по результатам 2D имеют много общих черт (рисунок 3). В западной части профилей наблюдается субвертикальная проводящая зона, уходящая на глубины более 50 км. Наклон проводника западный, угол наклона составляет  $75-80^\circ$ . Минимальные значения УЭС в пределах аномальной зоны фиксируются на глубинах от 8 до 25 км и составляют десятые доли Ом·м. По результатам 3D инверсии минимальный уровень сопротивлений значительно выше и составляет около 100 Ом·м. Восточная часть профиля, как это видно на картах кажущихся параметров и карт-срезов УЭС, проходит параллельно субширотным проводящим структурам, которые и проявляются за счет бокового влияния на геоэлектрических разрезах в виде ложного горизонтального проводника.

### Выводы

Качественный анализ МТ-данных показывает, что в Южном Приладожье мы имеем дело со сложным трехмерным геоэлектрическим строением земной коры, определяемым

суперпозицией ряда тектонических структур, включая палеорифтовые, имеющих различные простирания. Тектонические (и геоэлектрические) структуры, протягивающиеся в северо-западных румбах, соподчинены простиранию Ладожско-Ботнической зоны, а северо-восточные - отвечают изгибу Южно-Финляндского гранулитового пояса (Минц и др., 2010). Если для построения геоэлектрической модели севера Ладожской аномальной зоны можно было использовать в качестве основного инструмента интерпретации двумерную инверсию, то в сложных условиях Южного Приладожья единственным возможным инструментом интерпретации МТ-данных остается трехмерная инверсия, учитывающая влияние всех аномалиеобразующих объектов. Сложное геологическое строение изучаемого региона отражается и в потенциальных геофизических полях наложением аномалий разной ориентации.

Применение аппарата современной 3D инверсии позволило нам получить принципиально новый результат - построить объемную модель структуры Ладожской аномалии коровой электропроводности в Южном Приладожье. В рамках 3D инверсии мы объединили данные магнитотеллурических зондирований, полученных в разные годы и с разной аппаратурой, в частности, согласовали материалы группы ЛАДОГА и профиля 1-ЕВ.

Контрастная проводящая структура, выявленная в западной части профилей L21 и N21, имеет северо-восточное простирание и, возможно, маркирует северную границу широкого палеорифтового пояса, разделяющего Фенноскандию с одной стороны и Сарматия и Волго-Уралию с другой.

Существование данной проводящей структуры было предсказано Игорем Ивановичем Рокитянским в работе (Рокитянский и др., 1982) по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных в разных участках северо-востока Восточно-Европейской платформы в начале 80-х годов прошлого столетия.

### ЛИТЕРАТУРА

Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Десятов Д.О., Ионичева А.П., Пушкарев П.Ю., Сумарокова Е.С., 2019 Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю Кириши-Подпорожье 2018г. Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки "ГеоЕвразия-2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии". Москва, с 446–452

Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С.,

Белоусова Е.А., Блох Ю.И., Богина М.М., Буш В.А., Докукина К.А., Заможняя Н.Г., Злобин В.Л., Каулина Т.В., Конилов А.Н., Михайлов В.О., Натапов Л.М., Пийп В.Б., Ступак В.М., Тихоцкий С.А., Трусов А.А., Филиппова И.Б., Шур Д.Ю., 2010 Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М.: Геокарт; ГЕОС

электропроводности. Геофизика, № 1, с 48-61

Egbert, G.D., Kelbert, A., 2012 Computational recipes for electromagnetic inverse problems. Geophys. J. Int., № 189, pp 167–251

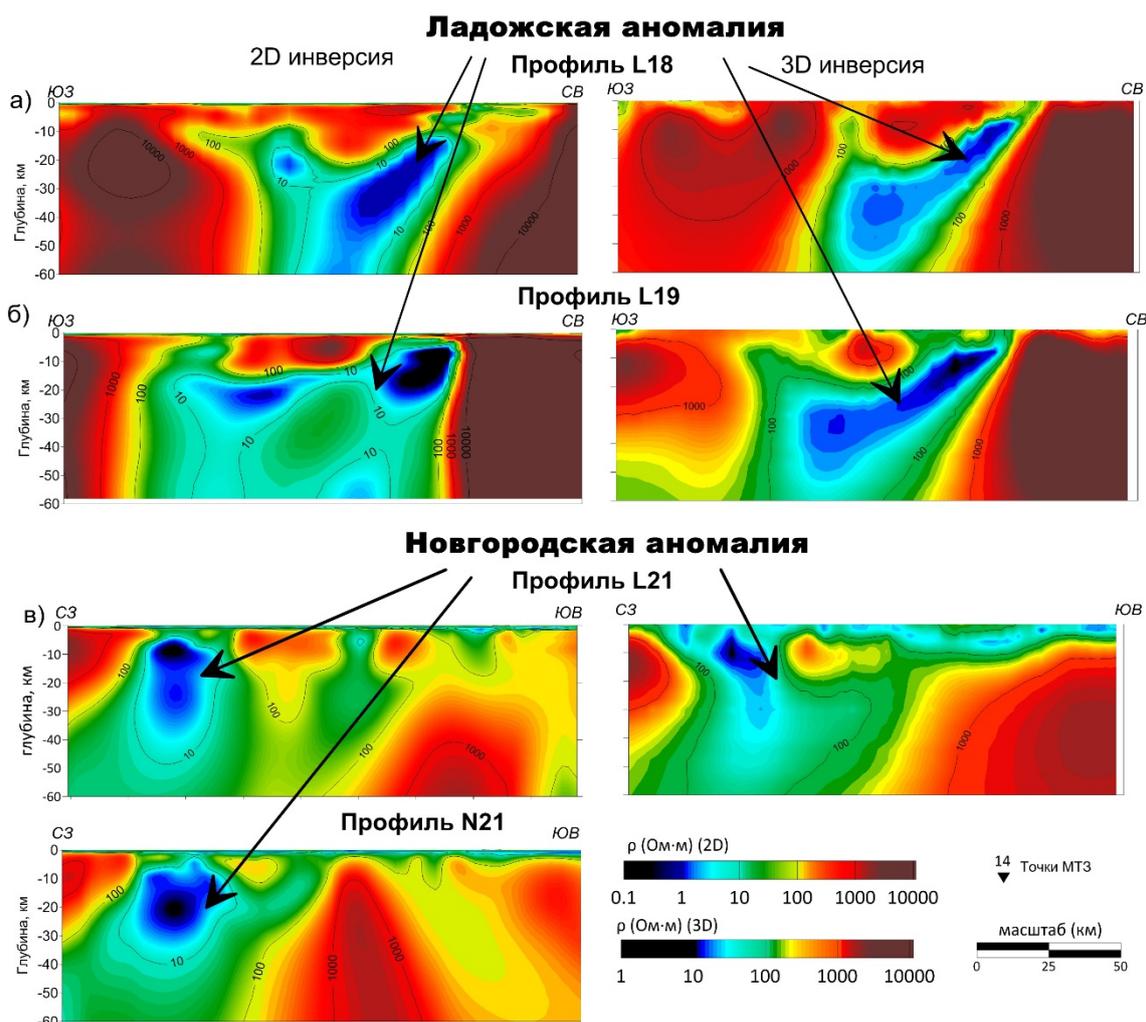
Kelbert, A., Meqbel N., Egbert G.D., and Tandon K., 2014 ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. Comput. Geosci. v. 66, pp 40–53

Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М., Рокитянская Д.А., 1982 Аномалии геомагнитных вариаций на СЗ европейской части СССР, Физика Земли, № 11, с 101–106

Kulikov V.A., Sokolova E.Yu, Ionicheva A.P., Pushkarev P.Yu, Yakovlev A.G., 2020 Electrical conductivity of the basement of east European platform in the southeastern Ladoga region from magnetotelluric data. Izvestiya. Physics of the Solid Earth, vol. 56, no. 6, pp 789–807

Сokolova Е.Ю., Голубцова Н.С., Ковтун А.А., Куликов В.А., Лозовский И.Н., Пушкарёв П.Ю., Рокитянский И.И., Таран Я.В., Яковлев А.Г., 2016 Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии

Stepanov K., Antashchuk K., Saraev A., 2016 Clarification of Pasha Rift Structure in Pasha-Ladoga Basin Based on AMT and Gravity Data, Geophysica, 51(1), pp 51-67



**Рисунок 3.** Сравнение результатов 2D и 3D инверсии по отдельным профилям в Южном Приладожье.