

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЮЖНОГО ПРИЛАДОЖЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 3D-ИНВЕРСИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

© 2022 г. В. А. Куликов<sup>1, \*</sup>, А. П. Ионичева<sup>1, \*\*</sup>, С. Ю. Колодяжный<sup>2, \*\*\*</sup>,  
Е. Ю. Соколова<sup>3, 4, \*\*\*\*</sup>, П. Ю. Пушкарёв<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, А. Г. Яковлев<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ), г. Москва, Россия

\*E-mail: vic@nw-geophysics.ru

\*\*E-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com

\*\*\*E-mail: kolod63@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: sokol\_l@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: pavel\_pushkarev@list.ru

\*\*\*\*\*E-mail: mail@nw-geo.ru

Поступила в редакцию 13.03.2022 г.

После доработки 18.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

В статье представлены результаты магнитотеллурических зондирований в Юго-восточном Приладожье, проведенных в 2018–2021 гг. с целью изучения глубинного геоэлектрического строения фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Площадь исследований охватывает область, расположенную к югу и юго-востоку от Ладожского озера до широты 58°45′ на юге и долготы 35°37′ на востоке. С запада территория ограничена электрифицированной железной дорогой Санкт-Петербург–Мурманск. На основании данных, полученных группой ЛАДОГА, с привлечением наиболее качественных материалов предыдущих исследований, была выполнена 3D-инверсия и построена трехмерная геоэлектрическая модель изучаемой территории. По отдельным профилям были получены более детальные модели удельного электрического сопротивления на основе двухмерной инверсии. Было прослежено продолжение южной ветви Ладожской аномалии электропроводности и уточнено ее глубинное строение. Также были получены принципиально новые зоны коровой аномальной электропроводности, которые, возможно, маркируют тектонические границы первого порядка между Южно-Прибалтийским поясом и Среднерусским орогеном.

*Ключевые слова:* магнитотеллурическое зондирование, геоэлектрическая модель, коровая аномальная электропроводность, двухмерная инверсия.

DOI: 10.31857/S0002333722050192

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при изучении тектоники фундамента древних платформ широко используются методы магнитотеллурического (МТ) зондирования, которые существенно дополняют имеющиеся геолого-геофизические реконструкции строения земной коры. В результате этих исследований на всех континентах и в пределах различных геоструктур оснований платформ были выявлены коровые проводники и линейно-вытянутые зоны высокой электропроводности. Отмечена пространственная и генетическая связь проводящих структур с глубинными зона-

ми нарушений и сутурными зонами, разделяющими крупные блоки континентальной коры [Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Коровые проводники являются важным объектом изучения глубинной геоэлектрики.

Факты существования коровых аномалий электропроводности имеют большое геологическое значение, так как на их основании решаются задачи геолого-тектонического районирования и изучения связей между поверхностными и глубинными структурами. Проводящие зоны в коре часто совмещены с крупными металлогенетическими поясами и месторождениями полезных ископаемых [Поспеева, 2021; Куликов и др., 2016;

Heinson et al., 2018; Sokolova et al., 2021], так как в этих зонах повышается проницаемость земной коры. В связи с этим всестороннее изучение аномалий коровой электропроводности имеет большой теоретический и практический интерес.

Аномалии электропроводности, связанные с раннедокембрийским фундаментом, широко распространены на территории Восточно-Европейской платформы (ВЕП). На Фенноскандинавском щите таким объектом является Ладого-Ботнический пояс (ЛБП), отмеченный серией долгоживущих региональных разломов СЗ–ЮВ простирания, составляющих Раахе–Ладожскую тектоническую зону [Морозов, 1999; 2002]. Благодаря своей ключевой геотектонической позиции и наличию ярких аномалий коровой электропроводности вдоль всего простирания, ЛБП стал объектом пристального изучения российскими и финскими геоэлектриками [Рокитянский и др., 1981; Kogja et al., 2002; Ковтун и др., 2011; Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Однако южная часть Ладожской аномалии изучалась в значительно меньшей степени из-за сильной зашумленности измеряемых магнитотеллурических полей помехами от электрифицированных железных дорог и усилением экранирования глубинных структур на фоне увеличения мощности и, соответственно, суммарной продольной проводимости ( $S$ ) осадочного чехла.

Большая часть магнитотеллурических исследований в Южном Приладожье до 2015 г. выполнялась сотрудниками Санкт-Петербургского горного института и Санкт-Петербургского университета [Васин, 1988; Ковтун, 1989]. В 2001 г. через Юго-Восточное Приладожье прошел опорный геофизический профиль 1-ЕВ, пересекающий ВЕП от Фенноскандинавского щита до центральной части Прикаспийской впадины [Берзин и др., 2002]. В 90-ые годы прошлого столетия в рамках программы “Московская синеклиза” проводились МТ зондирования с отечественной аппаратурой ЦЭС-2 в Северном и Южном Приладожье [Фельдман, Эринчек, 2009].

#### РАБОТЫ ГРУППЫ ЛАДОГА

В 2013 г. была сформирована группа ЛАДОГА, в состав которой вошли сотрудники Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Института Физики Земли РАН, Института геологии КарНЦ РАН и компании ООО “Северо-Запад”. В период с 2013 по 2017 гг., при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, группой ЛАДОГА были проведены магнитотеллурические и магнитовариационные измерения в Северном (профиль Выборг–Суоярви-2), Восточном (профиль Лоймола–Олонец), и в Юго-Восточном (Тумазы–Окулово) Приладожье [Сokolova и др., 2016].

С 2018 г. магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) работы группы ЛАДОГА были сосредоточены в Южном Приладожье с целью определения количественных параметров южной ветви Ладожской аномалии электропроводности. Положение точек и профилей МТ зондирования, выполненные группой ЛАДОГА за период с 2018 по 2021 гг., приведены на рис. 1.

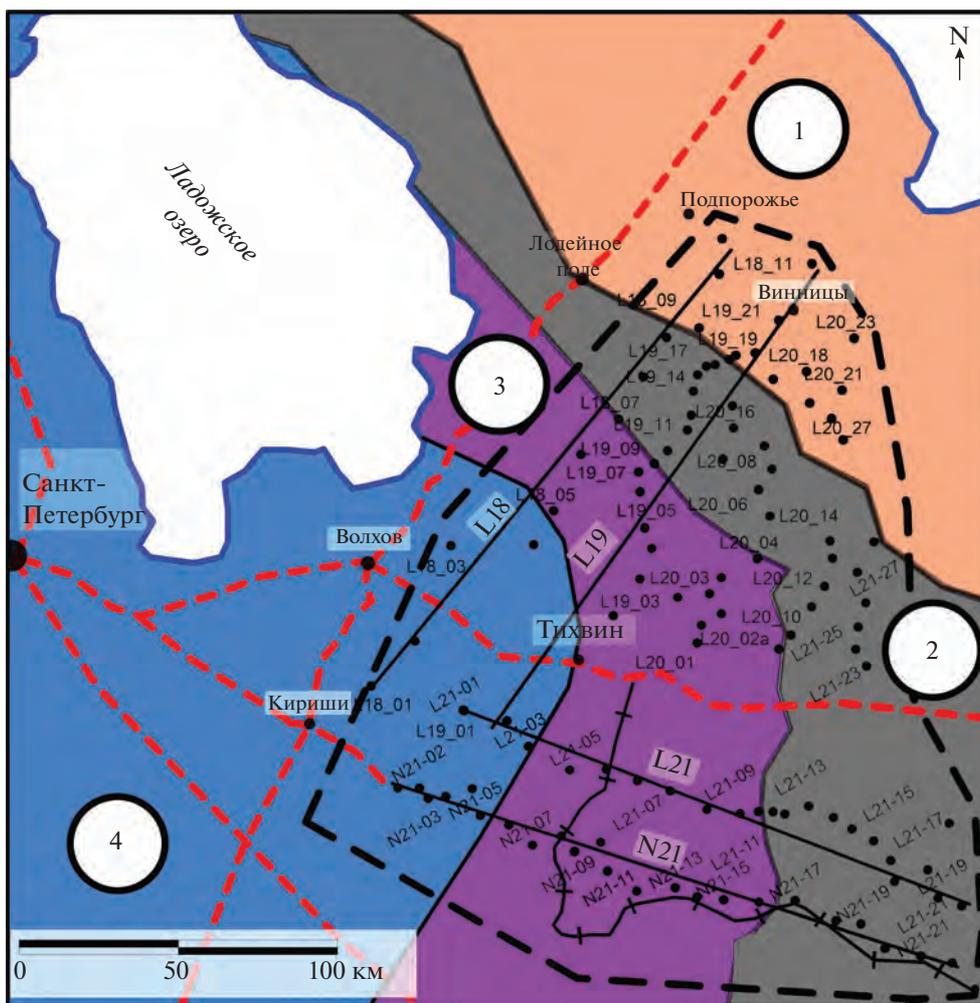
Общий объем измерений МТ/МВ зондирования в Южном Приладожье составил 109 наблюдений, часть из которых проводилась по 4 профилям – L18, L19, L21, N21, а часть была выполнена в площадном варианте. Неоднородность сети наблюдения связана с “обходом” электрифицированных ж/д, в первую очередь дороги г. Санкт-Петербург–г. Вологда, и с отсутствием в отдельных районах транспортной сети. Все измерения в Южном Приладожье были проведены с новыми широкополосными МТ-станциями “МЭРИ-ПРО”, разработанными в компании ООО “Северо-Запад” (г. Москва). На профиле L18 осуществлялась одновременная регистрация со станциями LEM1-417M (ЛЦ ИКИ, Украина), а совпадение части точек МТЗ на профиле N21 с точками регионального опорного профиля 1-ЕВ позволило сопоставить результаты, полученные со станциями “МЭРИ-ПРО” и MTU-5 “Phoenix Geophysics” [Куликов и др., 2021]. Приемные линии и индукционные датчики ориентировались на магнитные север (X) и восток (Y). Для основного объема наблюдений данные получены в диапазоне периодов от 0.001 до 3000 с.

#### КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

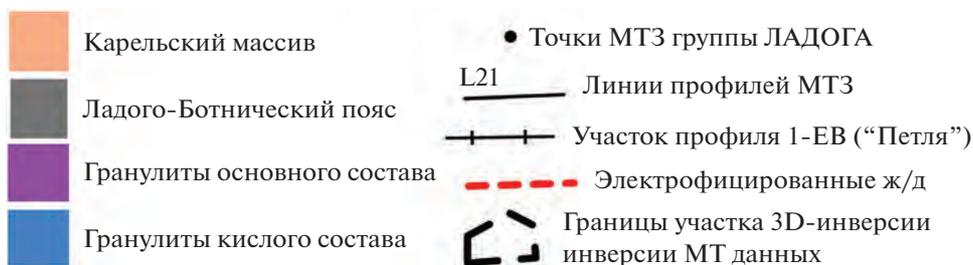
Качественный анализ данных включал в себя построение карт кажущихся сопротивлений, полученных по главным и эффективной ( $Z_{eff} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}$ ) компонентам тензора импеданса, фаз главных и эффективной компонент тензора импеданса, магнитовариационных параметров, расчет и построение компонент горизонтального магнитного тензора (ГМТ), фазового тензора, полярных диаграмм, параметров неоднородности. Все результаты качественного анализа, в той или иной степени показывают, что на изучаемой территории выделяются три основных направления повышенной проводимости в земной коре: северо-западное, северо-восточное и широтное (рис. 2а, 2б).

Зона повышенной проводимости, имеющая северо-западное направление, проявлена в наибольшей степени, и мы будем называть ее основной или главной ветвью Ладожской аномалии в Южном Приладожье.

Минимальные значения кажущихся сопротивлений, отвечающие главной оси проводника, фиксируются примерно по линии, соединяющей



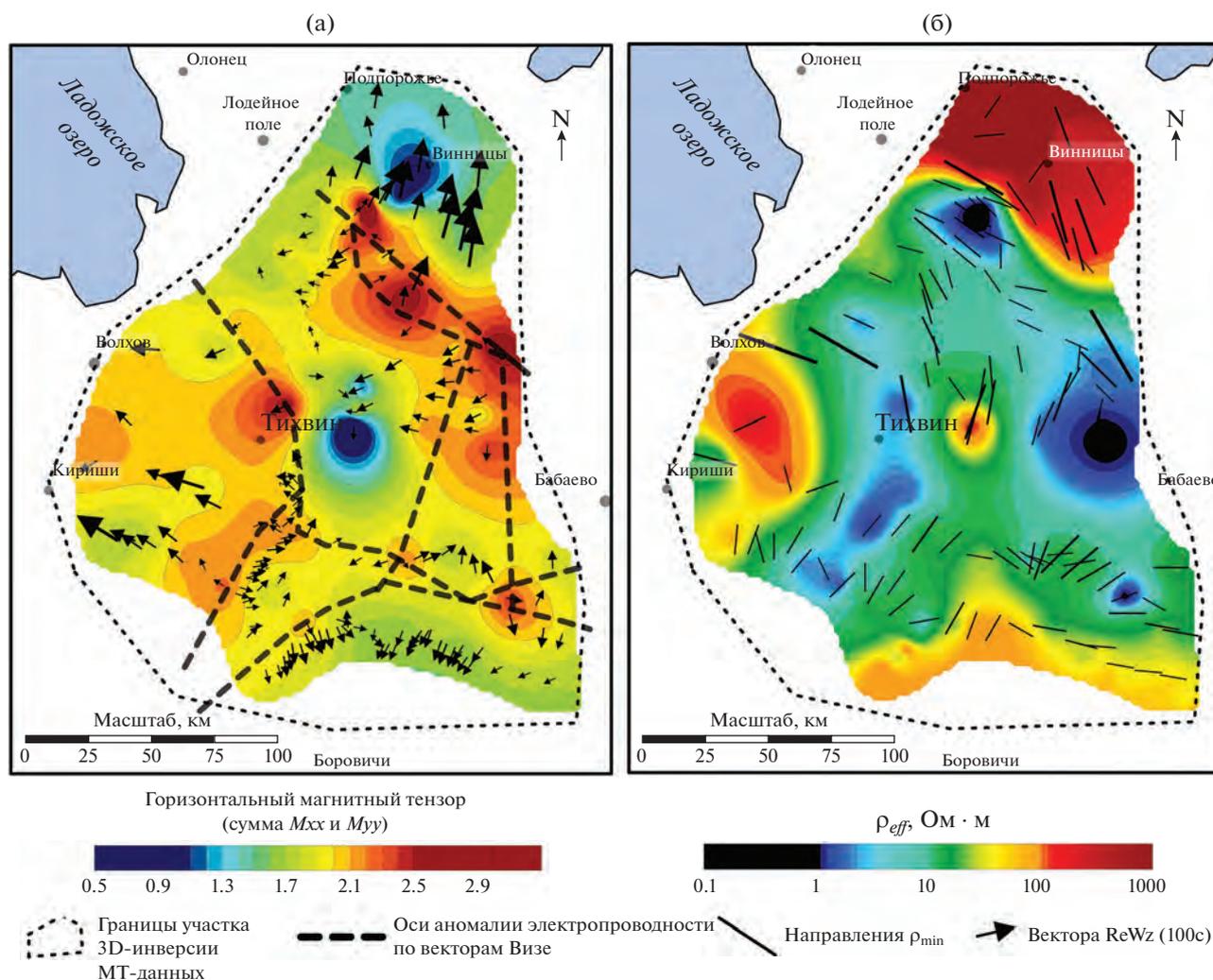
Условные обозначения:



**Рис. 1.** Расположение точек и профилей МТ/МВ зондирования, выполненных рабочей группой ЛАДОГА в период с 2018 по 2021 гг., на фоне геологической карты (по работе [Минц и др., 2010]): 1 – Карельский массив; 2 – Ладого-Ботнический пояс (метавулканы и метаосадки континентальной окраины Карельского массива); 3, 4 – Южно-Прибалтийский гранулитогнейсовый пояс (гранулитогнейсы преимущественно: 3 – основного состава, 4 – кислого состава).

г. Лодейное Поле–г. Бабаево, что подтверждается максимальными значениями  $GMT = 1.4–1.6$  и поведением индукционных векторов Визе (рис. 2а). Параллельно главной оси Ладожской аномалии, западнее, выделяется еще одна линейная область пониженных значений кажущихся сопротивлений СЗ простирания. К этой структуре приурочен известный Паша-Ладожский грабен [Stepanov et al., 2016].

Максимальное расхождение между ортогональными кривыми, полученными в центре Ладожской аномалии, фиксируется при построении кривых в направлениях  $305^\circ$  СЗ и  $55^\circ$  СВ соответственно (рис. 3а), что соответствует главным направлениям тензора импеданса, характерным для этой зоны. При этом глубина до проводника в центре Ладожской аномалии (точки МТЗ L19-11, L19-13) по асимптотам оценивается в 2200–2600 м.



**Рис. 2.** (а) – Карта горизонтального магнитного тензора на периоде 100 с. Черными стрелками показаны действительные индукционные векторы ( $ReWz$ , в конвенции Визе – “от проводника”), по результатам анализа амплитуд и азимутов которых намечены оси коровых проводников (пунктирные линии); (б) – карта эффективной компоненты кажущегося сопротивления – на периоде 500 с.

Проводник СВ направления выделен на двух южных профилях – L21 и N21. Его ось, сочленяясь с осью проводника Паша-Ладожского грабена, образует единую дугу (рис. 2а). Юго-западная экстраполяция этой проводящей зоны приводит к месту расположения Ильменской (или Новгородской) коровой аномалии электропроводности, ранее описанной в работах [Рокитянский, 1982; Ковтун, 1989; Рокитянский и др., 2018]. Далее мы будем называть этот проводник Ильменской ветвью или Ильменским проводником.

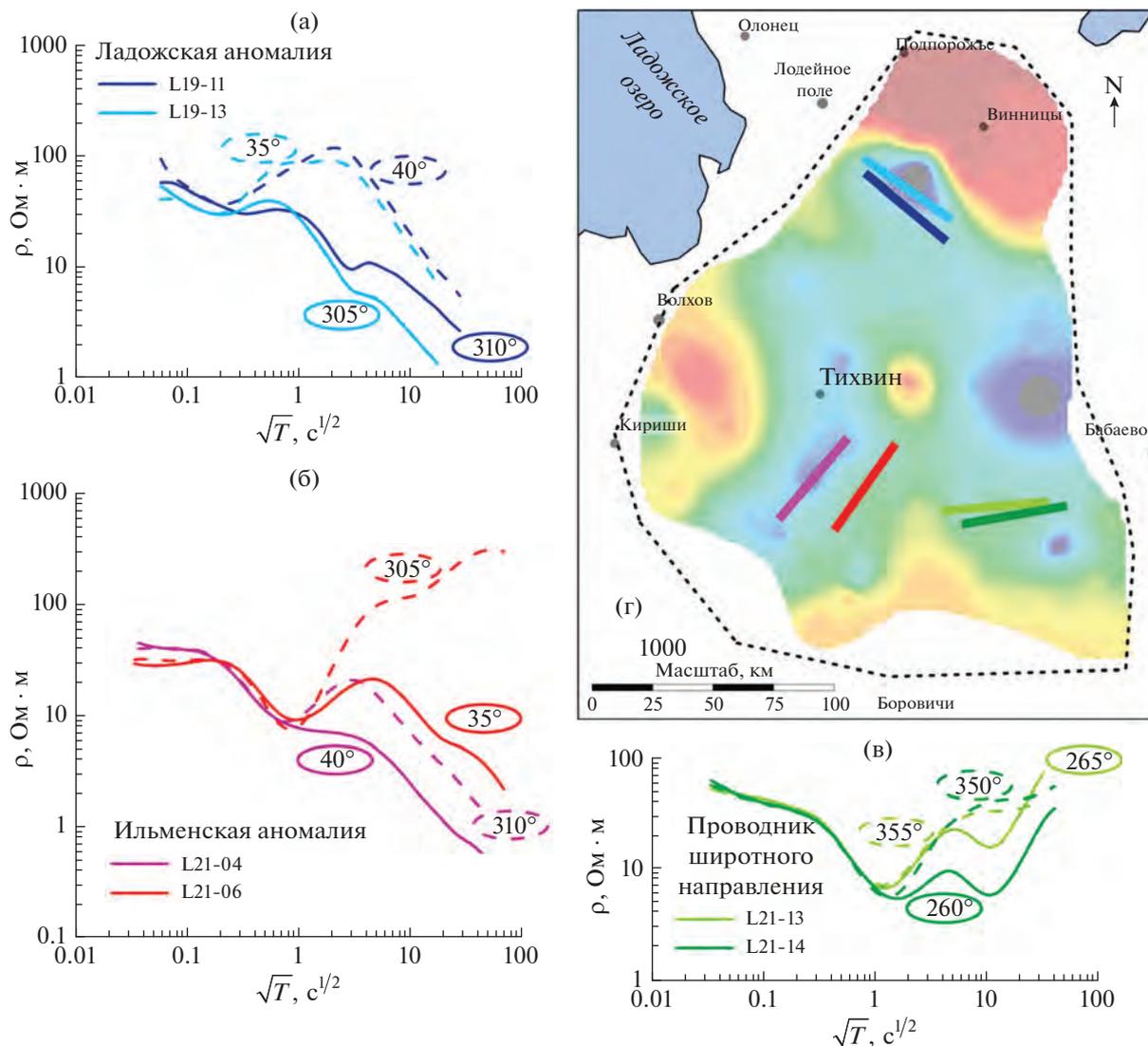
Типичные кривые, полученные в центре Ильменской аномалии на профилях L21 и N21, приведены на рис. 3б. Наиболее ярко коровый проводник проявляется на периодах 10–20 с на кривых рк с азимутом 40° СВ. На кривых L21-04 и N21-06 глубина до кровли проводника оценива-

ется по асимптотам к нисходящим ветвям кривых кажущегося сопротивления в 11 км.

Проводник широтного направления проявляется в ЮВ части профилей L21 и N21, например, на точках № L21-12–L21-15 на юге рассматриваемой территории (рис. 3в).

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МТ ДАННЫХ

Количественная интерпретация МТ данных проводилась как в рамках двумерной инверсии по отдельным профилям, так и в рамках 3D-инверсии по всему набору площадных данных. Для 2D-инверсии использовались программы ZONDMT2D (автор – Каминский А.Е.) и MT2DTools (ООО “Северо-Запад”, Москва), 3D-инверсия выполнялась в программе ModEM [Egbert, Kelbert, 2012; Kelbert



**Рис. 3.** Типичные кривые кажущегося сопротивления для аномальных зон, сплошная линия – компонента XY (продольная), пунктирная – YX (поперечная): (а) – Ладожская аномалия; (б) – Ильменская аномалия; (в) – проводник широтного направления; (г) – схема расположения точек на фоне карты эффективной компоненты кажущегося сопротивления – на периоде 500 с.

et al., 2014] на публичной облачной платформе Yandex.Cloud.

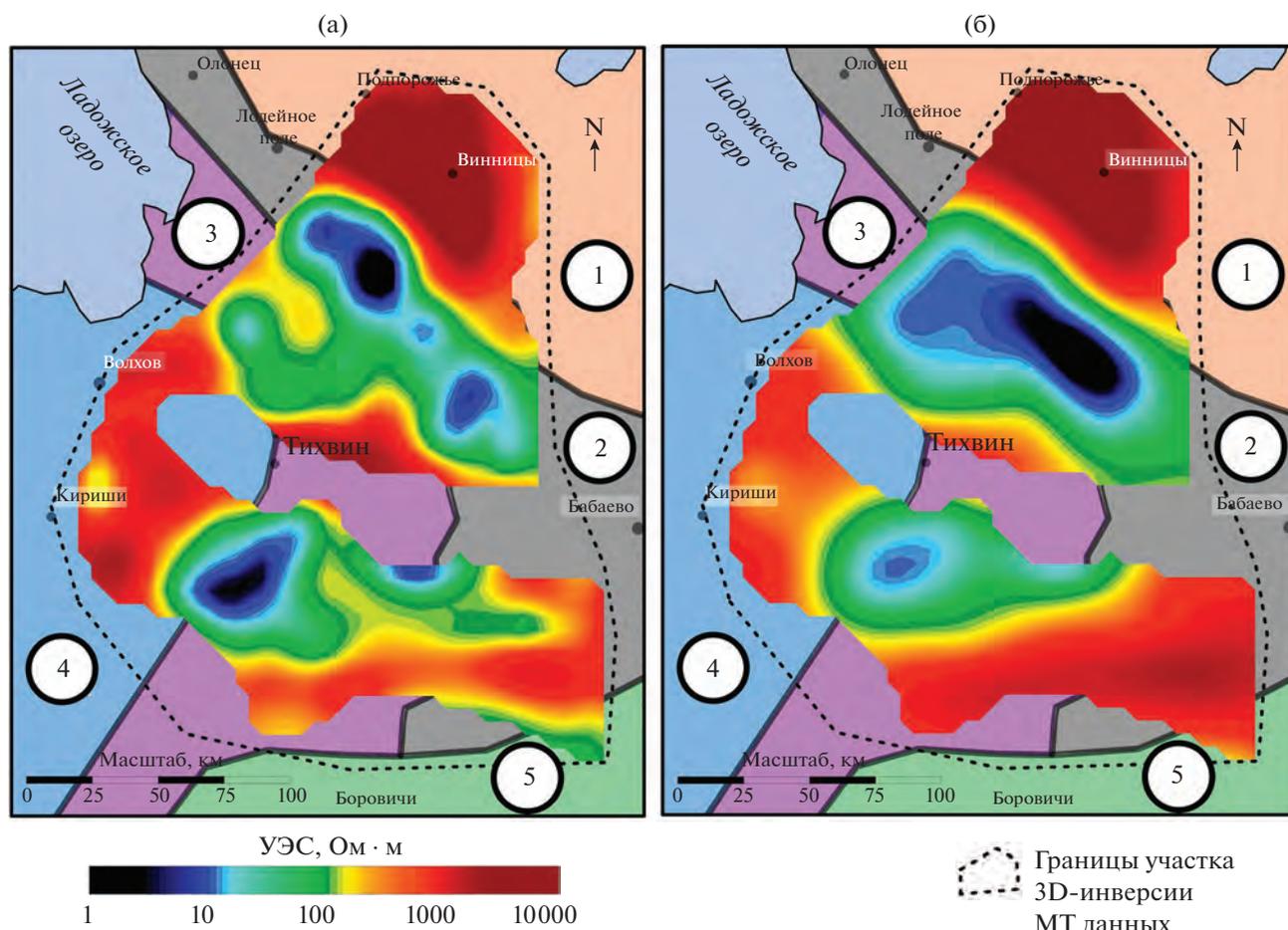
Некоторые результаты количественной интерпретации были опубликованы в наших предыдущих работах [Куликов и др., 2020; 2021].

Направление профилей МТЗ мы старались выбирать вкрест простирания коровых проводящих структур, поэтому двумерная инверсия проводилась в бимодальном варианте с предварительным поворотом данных в соответствии с азимутами главных направлений тензора импеданса. Для профилей L18 и L19, пересекающих Ладожскую аномалию, использовались кривые, построенные в направлениях с азимутом 35° СВ – в качестве поперечных и азимутом 125° ЮВ – в каче-

стве продольных. Для профилей L21 и N21, пересекающих Ильменскую аномалию, использовались кривые, построенные в следующих направлениях: азимут 40° СВ – в качестве продольных, азимут 130° ЮВ – в качестве поперечных.

Более подробно остановимся на описаниях результата 3D-инверсии, так как она больше подходит для изучаемой площади, где фиксируется сложное сочетание разнонаправленных неоднородностей в земной коре.

В качестве стартовой модели для 3D-инверсии использовалось однородное полупространство с удельным сопротивлением 1000 Ом·м. Размер горизонтальных ячеек – 5000 × 5000 м<sup>2</sup>, мощность первого слоя составила 50 м, мощность последу-



**Рис. 4.** Результаты 3D-инверсии МТ данных, удельное электрическое сопротивление на глубине: (а) 15 км; (б) 30 км. 1 – Карельский массив; 2 – Ладого-Ботнический пояс (метавулканыты и метаосадки континентальной окраины Карельского массива); 3, 4 – Южно-Прибалтийский гранулитогнейсовый пояс (гранулитогнейсы преимущественно: 3 – основного состава, 4 – кислого состава); 5 – Среднерусский пояс.

ющих ячеек по оси  $Z$  увеличивалась с глубиной. За пределами области интересов было добавлено по 10 ячеек с каждой стороны, их размер увеличивался с геометрическим коэффициентом 1.9. Радиусы сглаживания (параметр, отвечающий за плавность изменения сопротивления в соседних ячейках) по трем направлениям составили 0.3 ( $X$ ), 0.3 ( $Y$ ) и 0.4 ( $Z$ ). Общий размер модели для подбора составил  $98 \times 96 \times 50$  ячеек.

Для оценки точности подбора в программе ModEM используется параметр nRMS (среднеквадратичная невязка, нормированная на ошибку данных). Мы использовали в качестве критерия остановки вычислений условие  $nRMS \leq 3.5$ , которое было выполнено для 35-ой итерации.

Лучшим способом представления результатов 3D-инверсии являются карты-срезы удельного электрического сопротивления (УЭС) для разных глубин (рис. 4а, 4б). Их удобно сопоставлять с тектоническими и геологическими картами, картами гравитационного и магнитного полей.

В центре карт-срезов вырезана область с высоким уровнем помех по обе стороны от ж/д г. Санкт-Петербург–г. Вологда (участок Волхов–Тихвин–Бабаево).

Наиболее представительным результатом 3D-инверсии является выделение Ладожского ярко выраженного корового проводника, ось которого лежит примерно на линии продолжения северо-восточного берега Ладожского озера. Еще один проводник СЗ направления лежит на линии, проходящей через центр Ладожского озера. Основная ось Ладожской аномалии прослежена нами на расстояние более 100 км от точки № L18-08 до точки L21-25. Ширина главной зоны проводника на глубине 15 км составляет около 22 км. По мере увеличения глубины карт-срезов УЭС мы видим смещение основной оси проводника в ЮЗ направлении. От глубины 15 км (рис. 4а) до глубины 30 км (рис. 4б) это смещение составляет примерно 15 км, откуда можно оценить угол на-

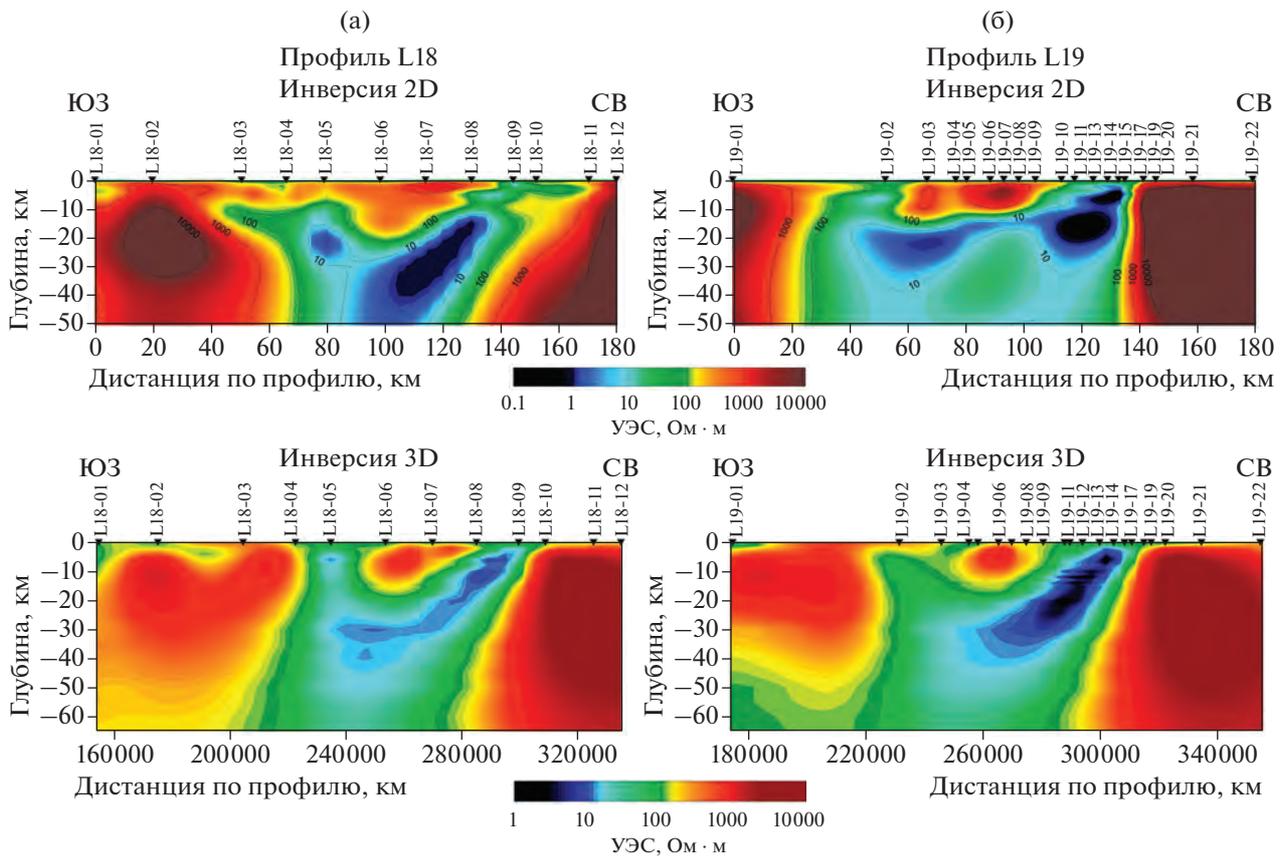


Рис. 5. Сравнение результатов 2D-(сверху) и 3D-(снизу) инверсий по линиям профилей: (а) L18; (б) L19.

клона основной оси проводящей структуры примерно в  $45^\circ$ .

Еще один менее контрастный проводник СЗ направления проходит через центральную часть Ладожского озера. Эта ветвь проводящей структуры Ладожской аномалии практически не смещается по мере увеличения глубины карт-срезов УЭС, т.е. характеризуется субвертикальным залеганием.

В северо-западной части профилей L21 и N21 на юго-западе изученного участка выявлена контрастная проводящая структура северо-восточного простирания (рис. 4) — названная нами Ильменской ветвью Ладожской аномалии в Южном Приладожье, т.к. наиболее вероятно, она сочленяется далее к юго-западу с известной Ильменской аномалией.

Влияние проводника субширотного направления, наиболее ярко проявившегося по результатам качественного анализа юго-восточных частей профилей L21 и N21 (южная часть участка работ), на результатах 2D-инверсии обнаруживается в виде увеличения мощности приповерхностного проводника, значительно превосходящего известные мощности осадков.

Второй вариант представления модели трехмерной инверсии — глубинные срезы УЭС по отдельным линиям разрезов. Для сравнения результатов 2D- и 3D-инверсий такие срезы были сделаны по всем линиям профилей МТЗ (рис. 5, рис. 6).

Ладожская структура представлена двумя ветвями проводника. Восточная, более контрастная (главная) ветвь максимально подходит к поверхности в районе точек МТЗ L18-09 и L19-14,15 (рис. 5). Эта ветвь характеризуется наклоном  $45^\circ$  в ЮЗ направлении, шириной около 10 км и низкими сопротивлениями: УЭС на глубинах 20 км составляет на профиле L18 — 10 Ом · м, на профиле L19 — 5 Ом · м. Вторая, менее контрастная ветвь Ладожского проводника характеризуется крутым погружением в западном направлении, что характерно для глубинных уровней разрезов, тогда как в приповерхностных срезах — отмечается заприкидывание контуров аномалий в обратном направлении (рис. 5, рис. 6). Удельные сопротивления в пределах второй ветви проводника составляют десятки (профиль L18) или первые сотни Ом · м (профиль L19). К поверхности этот проводник выходит в районе точек МТЗ L18-04,05 и L19-02. На глубинах 25–40 км эта второстепенная прово-

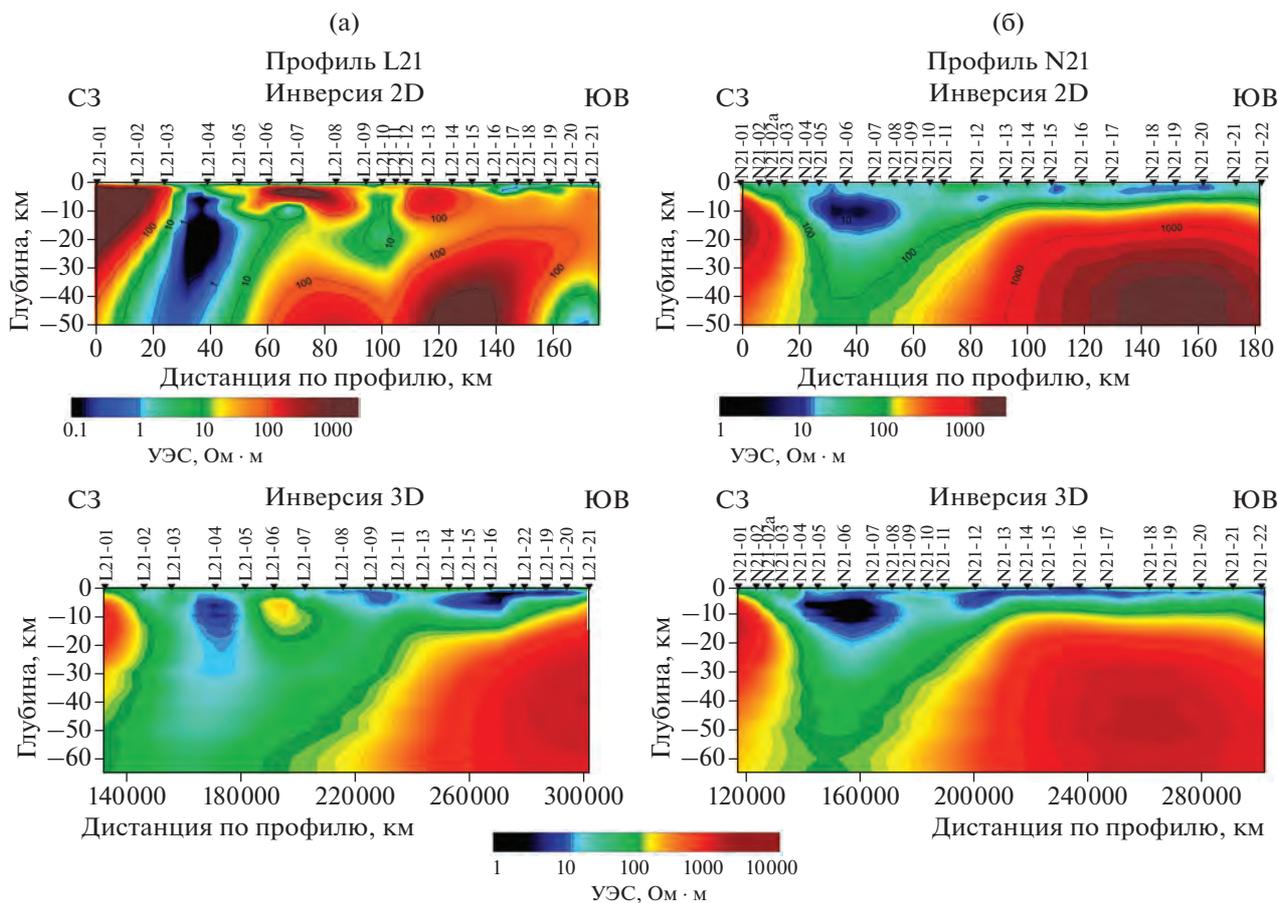


Рис. 6. Сравнение результатов 2D- (сверху) и 3D- (снизу) инверсий по линиям профилей: (а) L21; (б) N21.

дящая структура сливается с главной Ладожской аномалией электропроводности (рис. 5).

В одной из своих предыдущих работ [Куликов и др., 2019] мы показывали, что ось южной ветви Ладожской аномалии контролирует Паша-Ладожский рифейский грабен, который экспонирован на южной окраине Фенноскандинавского щита и является частью протяженной рифтовой системы, скрытой под осадочным чехлом Русской плиты. К похожему выводу на основе сейсмических, аудиомангнитотеллурических исследований и плотностного моделирования пришли геофизики Санкт-Петербургского университета [Stepanov et al., 2016].

О поведении Ладожской проводящей структуры в целом ниже глубины 50 км делать выводы сложно, так как на этих глубинах чувствительность МТЗ заметно снижается.

Структура Ильменского проводника по срезу вдоль профиля L21 имеет общие черты с Ладожской сдвоенной аномалией (рис. 6а). Мы имеем такое же сочетание двух проводящих ветвей – наклонной, выходящей под осадочный чехол в районе точек МТЗ № L21-09, 10 и вертикальной, с

центром в районе МТЗ L21-04. В отличие от Ладожской структуры, на глубинном разрезе УЭС по профилю L21 более ярко проявляется вертикальная ветвь проводника, менее отчетливо выражена наклонная.

На линии профиля N21 обе ветви проводника сливаются, образуя единую проводящую область треугольной формы с вершиной на глубинах около 40 км в районе МТЗ N21-06 (рис. 6б).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И УТОЧНЕНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Сложное строение фундамента Южного Приладожья, где происходит пересечение и наложение разнонаправленных тектонических элементов хорошо “читается” на картах потенциальных полей – гравитационного и магнитного и их трансформантах (рис. 7).

В поле  $\Delta G_a$  уверенно прослеживаются линейные положительные аномалии ЮВ–СЗ и ЮЗ–СВ направлений (рис. 7а). На территории Южного Приладожья происходит их пересечение, что

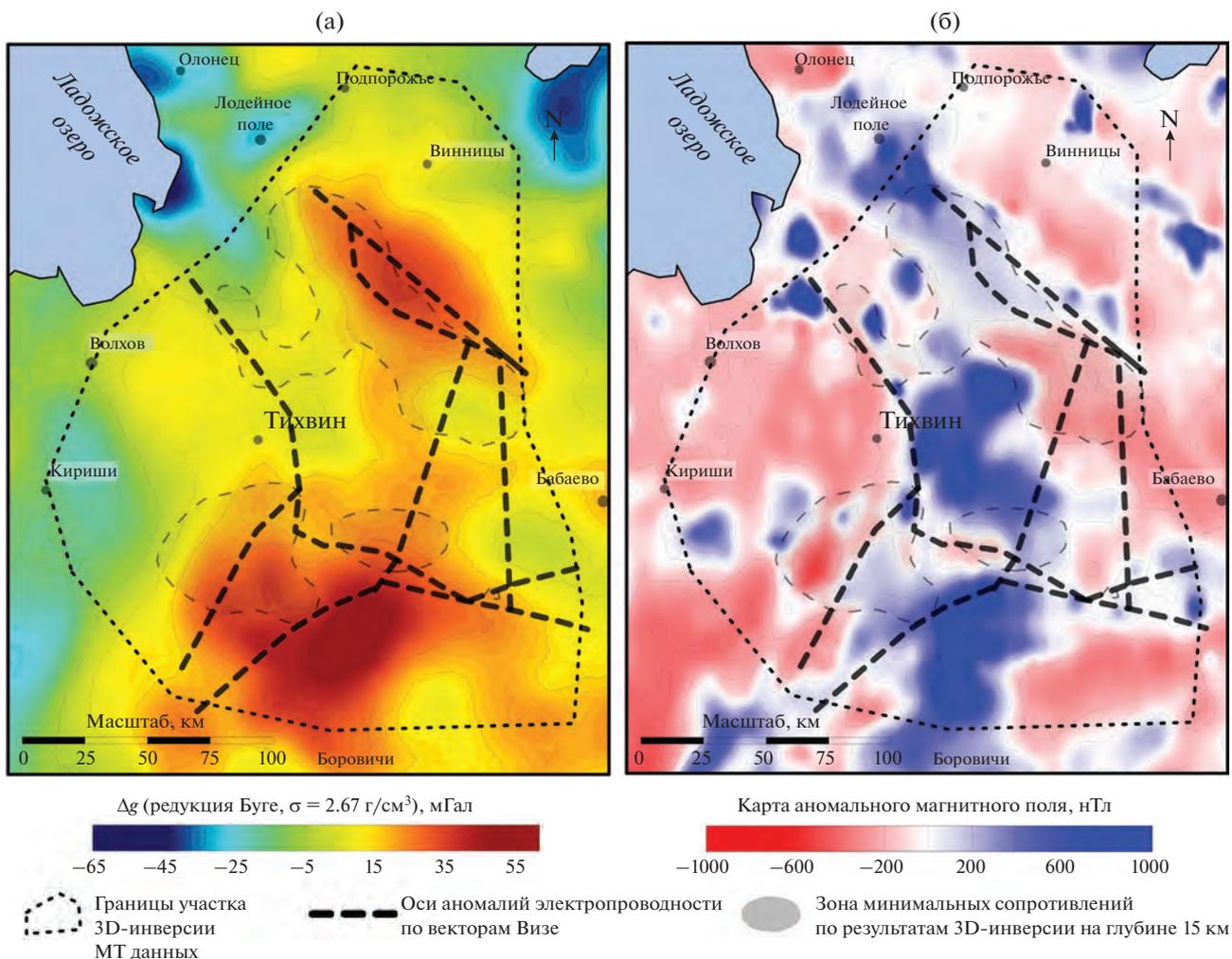


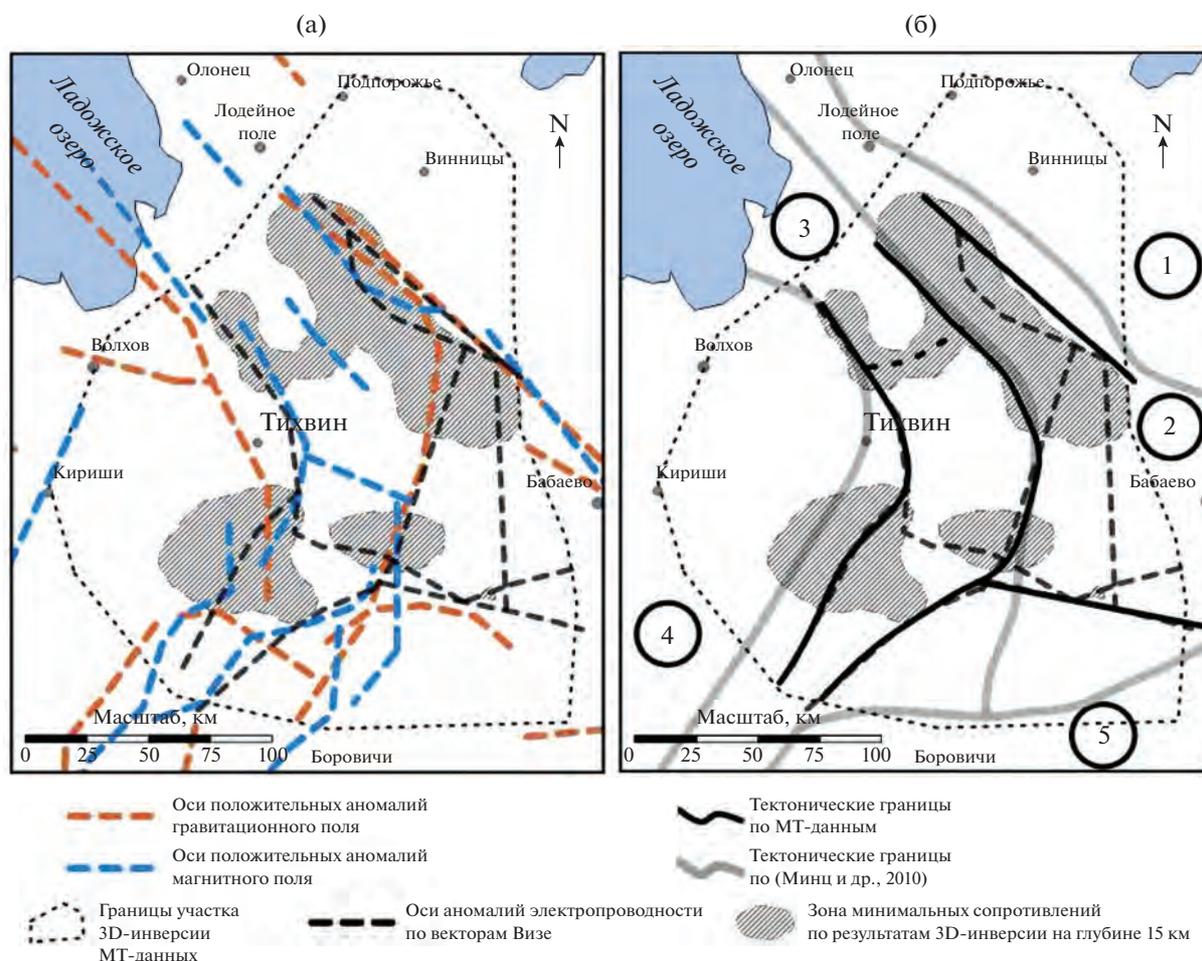
Рис. 7. Карты аномального гравитационного (а) и магнитного (б) полей [Литвинова и др., 2016а; 2016б].

приводит к появлению сложных по форме, изометричных аномалий интенсивностью до +55 МГл (в районе точки МТЗ N21-14) и накладывает определенные ограничения на двумерный подбор при плотностном моделировании.

Сравнивая оси проводников, построенные нами как по результатам качественного анализа данных МТЗ, так и по результатам 3D-инверсии, мы видим, что принципиальная “картина”, которую дает геоэлектрика, практически не отличается от структуры поля  $\Delta G_a$ . Основная ось Ладожского проводника практически совпадает с линией максимальных положительных значений  $\Delta G_a$ . Незначительное смещение оси проводника на ЮЗ связано с его наклоном в данном направлении. Параллельное смещение в западном направлении осей проводящих структур относительно максимумов поля силы тяжести фиксируется и для аномалий СВ направления в районе южных профилей L21 и N21 (рис. 7а).

Менее очевидно совпадение геоэлектрических аномалий с аномалиями магнитного поля, так как последние на изучаемой площади представлены цепочками локальных максимумов. Однако, если воспользоваться процедурой “выделение слабоконтрастных линейных аномалий” программы COSCAD3D (авторы – Петров В.А., Никитин А.А.), мы увидим практически полное совпадение высокоградиентных ограничений положительных аномалий  $\Delta T_a$  и, в меньшей степени, – их осей, с осями проводящих коровых структур (рис. 7б).

Несмотря на то, что принципиальные схемы пространственного распределения высоко градиентных ограничений и осей линейных аномалий, построенные по разным геофизическим методам, совпадают (рис. 8а), часто наблюдается их небольшое параллельное смещение. Это связано с тем, что аномальные физические свойства (электрические, плотностные, магнитные) отдельных тектонических блоков/пластин и ограничиваю-



**Рис. 8.** (а) – Оси линейных аномалий, построенные по разным геофизическим методам; (б) – положение тектонических границ по работе [Минц и др., 2010] и по МТ данным: 1 – Карельский массив; 2 – Ладого-Ботнический пояс (метавулканииты и метаосадки континентальной окраины Карельского массива); 3, 4 – Южно-Прибалтийский гранулитогнейсовый пояс (гранулитогнейсы преимущественно: 3 – основного состава, 4 – кислого состава); 5 – Среднерусский пояс.

щих их шовных зон, в общем случае, отвечают породам, локализованным на разных глубинах, что в итоге, учитывая определенный наклон этих структур, проявляется в виде смещений при проекции на дневную поверхность.

Результаты, полученные по данным магнитотеллурических зондирований, мы использовали для уточнения и верификации современных тектонических схем и моделей Южного Приладожья. В качестве основы были использованы карты, составленные М.В. Минцем с соавторами [Минц и др., 2010], и их модифицированные аналоги [Колодяжный, 2018] (рис. 1 и рис. 8б). Одним из главных отличий этих разработок от других тектонических схем (например, [Гарецкий, Каратаев, 2014; Bogdanova et al., 1996; 2015; Gorbatshev, Bogdanova, 1993]) является обоснование геодинамической позиции обширного Среднерусско-Южно-Прибалтийского коллизионно-

орогенного пояса, разделяющего главные сегменты фундамента ВЕП – Фенноскандию, Сарматию и Волго-Уралию. Предполагается, что коллизионное взаимодействие одноименных микроконтинентов в конце палеопротерозоя (1.9–1.75 млрд лет) привело к формированию протяженного (тысячи км) и широкого (сотни км) упомянутого выше складчато-надвигового палеорогена.

В строении Среднерусско-Южно-Прибалтийского пояса участвуют пластины гранулитогнейсов, гранито-гнейсов и амфиболитов, габбро-анортозитов и метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород преимущественно палеопротерозойского возраста. Данные образования испытали высокотемпературные метаморфические преобразования (гранулитовая и амфиболитовая фации) в условиях нижней – средней коры и были выжаты к поверхности в виде дивергентных надвиговых пластин –

экспонированных корневых частей палеоорогена [Минц, 2011; Минц и др., 2010]. В ряде работ данный коллизионный пояс рассматривается в составе Волго-Уралии (Среднерусский сегмент) и Свекофеннского аккреционного пояса (Южно-Прибалтийский сегмент) [Гарецкий, Каратаев, 2014; Bogdanova, et al., 1996; 2015; Gorbatshev, Bogdanova, 1993].

Изученная нами территория южного Приладожья охватывает область тройного сочленения крупных геоструктур. Раахе-Ладожская тектоническая зона развита вдоль окраины Карельского массива на СВ участка работ. Два структурно обособленных сегмента рассмотренного выше коллизионно-орогенного пояса – Среднерусский и Южно-Прибалтийский – обрамляют треугольную область взаимодействия геоструктур с юга и запада, соответственно (рис. 8б).

В южном Приладожье по геофизическим данным в составе Южно-Прибалтийского (в частности, Южно-Финско-Ладожского) пояса выделены две тектонические пластины: в строении нижней преобладают гранулитогнейсы “основного” состава (гиперстеновые гнейсы, эндрбиты и др.), а в составе верхней – “кислые” гранулитогнейсы и кондалиты (гранат-кордиерит-графитовые парагнейсы). Анализ сейсмопрофиля I-ЕВ (рис. 1) показывает, что системы дугообразных в плане тектонических пластин, образующих фронтальные части Южно-Прибалтийского аллохтона, надвинуты в восточном направлении на вулканогенно-осадочные комплексы Ладого-Ботнического пояса [Минц и др., 2010] (рис. 8б).

Ладого-Ботнический пояс (ЛБП) сложен палеопротерозойскими вулканогенно-осадочными комплексами пассивной окраины Карельского массива. В северном и южном Приладожье данные образования образуют параавтохтон Южно-Прибалтийских гранулитовых покровов, в основании которых в подстилающих толщах проявляется инвертированная метаморфическая зональность [Минц и др., 2018]. Окраинно-континентальные толщи ЛБП сильно дислоцированы и участвуют в строении Раахе-Ладожской тектонической зоны, которая на рассматриваемой территории почти сливается воедино с фронтальными надвигами Южно-Прибалтийского пояса. Однако севернее оз. Ладога данная зона четко обособлена, имеет морфологию дивергентно построенной транспрессионной структуры цветка, и прослеживается в СЗ направлении до Ботнического залива вдоль границы Карельского массива и Свекофеннского аккреционного орогена [Морозов, 1999; 2002]. В свою очередь, Южно-Прибалтийский (Южно-Финско-Ладожский) пояс в северном Приладожье резко меняет свое СЗ простирание и уходит в сторону от Раахе-Ладожской зоны на запад в пределы территории

южной Финляндии [Буртман, Колодяжный, 2020; Минц и др., 2010; 2018]. В строении Раахе-Ладожской зоны севернее оз. Ладога выявлены зоны полиметаллической и сульфидной минерализации, а также графитосодержащие породы – бластомилониты, мраморы, гнейсы и сланцы [Минц и др., 2010; 2018].

Главная ось Ладожской коровой аномалии электропроводности в Южном Приладожье совпадает с центром Раахе-Ладожской зоны, развитой в пределах окраинно-континентального Ладого-Ботнического пояса. Аномалия электропроводности в общих чертах повторяет очертания этого пояса, охватывая внешний контур фронтального надвига Южно-Прибалтийского аллохтона (рис. 8б). Судя по конфигурации аномалии электропроводности на разрезах, можно полагать, что насыщенные графитосодержащими метасадками и бластомилонитами окраинно-континентальные тектонизированные образования относительно полого ( $45^\circ$ ) погружаются до глубин порядка 40 км. Ниже по разрезу в пределах верхней мантии аномалия электропроводности расплывается в широкой полосе (рис. 5, профили 3D-инверсии L18 и L19). В целом данную проводящую структуру можно рассматривать в качестве сутурной зоны, связанной с закрытием крупного окраинно-континентального бассейна, на который позднее были надвинуты глубинные гранулитогнейсовые покровы Южно-Прибалтийского орогенного пояса.

На уровне нижней коры на глубинах 25–40 км рассматриваемая трансформационная аномалия сливается с менее контрастной низкоомной зоной, круто воздымающейся к поверхности (рис. 5). Эта более слабая, второстепенная аномалия и ее ось отчасти соответствуют контакту нижней (“мафитовые” гранулиты) и верхней (“кислые” гранулиты) пластин Южно-Прибалтийского аллохтона (рис. 8б). Установленное на глубинных уровнях слияние двух зон электропроводности согласуется с представлениями о чешуйчато-надвиговом строении Южно-Прибалтийского орогена, построенного системой листрических складчато-надвиговых пластин, которые по мере погружения выполаживаются и переходят в зону субгоризонтального detachment в тектонически расслоенной нижней коре [Аксаментова и др., 1994; Гарецкий, Каратаев, 2011; 2014; Минц и др., 2010].

В сечениях профилей L21 и N21 отображается во многом аналогичная ситуация, с той разницей, что электропроводящие зоны и их оси в большей мере соответствуют надвиговым зонам, ограничивающим пластины гранулитогнейсов Южно-Прибалтийского пояса (см. рис. 6). На разрезах 3D-инверсии покровы гранулитов разного состава различаются слабо и представлены проводящей клинообразной структурой, достигающей

верхних уровней мантии. Широкая субгоризонтальная приповерхностная зона электропроводности в ЮВ частях профилей L21 и N21 может быть связана с искажающими эффектами низкоомных осадков чехла ВЕП, или же с участками пологого залегания Южно-Прибалтийских покровов (рис. 6). На ЮВ окончании профилей намечается некоторое погружение этих зон электропроводности, что может характеризовать структуру надвиговых пластин, погружающихся в южных румбах под фронтальные надвиги Среднерусского пояса (см. рис. 6б).

На всех профилях 3D-инверсии в строении аномалий электропроводности в целом отмечаются элементы дивергенции (рис. 5, рис. 6). Наиболее ярко выражены погружения структур в западном направлении (восточная вергентность). Однако западные контуры аномалий часто образуют приповерхностные козырьковые структуры с обратным наклоном в восточных румбах (западная вергентность). Элементы такой тектоники можно рассматривать в связи с двумя тектонотипичными моделями: транспрессионными структурами цветка, либо системами тектонических покровов, осложненных второстепенными ретронадвигами.

Результаты выполненных МТ исследований показывают в целом хорошее пространственное соответствие выявленных аномалий электропроводности с установленными другими геолого-геофизическими методами контурами геологических тел на поверхности. В этом контексте следует отметить, прежде всего, высокий уровень конгруэнтности аномалий коровой электропроводности с картографическими и модельно-тектоническими разработками М.В. Минца с соавторами [Минц, 2011; Минц и др., 2010] (рис. 8б). Предлагаемое нами некоторое уточнение геологических контуров не столь существенно и, возможно, в большей степени связано с уровнями глубин анализируемых горизонтальных срезов полого падающих тектонических пластин Южно-Прибалтийского пояса.

Представленные МТ разрезы существенно уточняют представления о глубинном строении области тройного сочленения крупнейших коровых структур фундамента ВЕП. Показано, что главные сутурные зоны и тектонические нарушения рассматриваемой территории имеют трансформальный характер, проникают в нижнюю кору и, возможно, в мантию. Отмечаются полого залегающие и крутопадающие глубинные структуры. Электропроводящие тела имеют комплексную морфологию, отражая элементы тектоники подвиго-надвиговых, чешуйчато-надвиговых и листрических, транспрессионных и рифтогенных структурных ансамблей.

Крупные проводящие структуры, установленные нами по результатам 3D-инверсии МТ данных, можно, прежде всего, соотнести с сильно тектонизированными и метаморфизованными осадочными породами, первоначально насыщенными органическим и карбонатным веществом. Мощная призма осадков такого типа накопилась в палеопротерозое в пределах континентального склона Карельского массива. В процессе коллизии эти отложения испытали погружение на большие глубины в пределах поддвиго-надвиговых сутурных зон, оказавшись перекрытыми средне- и нижнекоровыми покровами гранулитогнейсов. В результате метаморфизма и развития зон бластомилонитов в метаосадках произошло выделение свободных фаз углерода и кристаллического графита, образующего скопления в зонах скучивания и многократного сдвигания мелких тектонических пластин. Подобные явления предполагаются в зонах субдукции, но в рассмотренном нами случае не обнаружено признаков существования океанической коры и ее погружения. Вероятнее всего, рассмотренные процессы были связаны с внутриконтинентальными безофиолитовыми сутурными зонами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, полученные в разные годы и с разной аппаратурой, в частности, согласовали материалы профиля 1 ЕВ и ранних (2016 г.) зондирований группы ЛАДОГА в Южном Приладожье.

Качественный анализ МТ данных показывает, что в Южном Приладожье мы имеем дело со сложным трехмерным геоэлектрическим строением земной коры, определяемым суперпозицией ряда тектонических структур различного простираения, включая палеопротерозойские безофиолитовые сутуры и зоны транспрессии, окраинно-континентальные, рифтогенные и коллизионные складчато-надвиговые пояса.

Рассмотренная территория охватывает область тройного сочленения крупных геоструктур: Раахе-Ладожской зоны транспрессии, развитой вдоль окраины Карельского массива, а также двух структурно обособленных сегментов Среднерусско-Южно-Прибалтийского коллизионно-орогенного пояса.

Тектонические (и геоэлектрические) структуры, протягивающиеся в северо-западных румбах, соподчинены простираению Раахе-Ладожской зоны

и вмещающего ее Ладого-Ботнического окраинно-континентального пояса. Проводящие структуры СВ простирания отвечают южному флангу планарной дуги фронтальных покровов Южно-Прибалтийского гранулитно-гнейсового пояса, составляющего часть крупного коллизийного орогена [Минц, 2011; Минц и др., 2010]. Субширотная аномалия на юге изученной территории, вероятно, характеризует надвиговые зоны, погружающиеся в южных румбах, под фронтальные надвиги Среднерусского пояса.

Контрастная проводящая структура, выявленная в западной части профиля L21, имеет северо-восточное простирание и, возможно, маркирует северную границу широкого палеорифтового пояса. Существование данной проводящей структуры было предсказано И.И. Рокитянским по результатам одиночных магнитовариационных зондирований, выполненных в разных участках северо-востока Восточно-Европейской платформы в начале 80-х годов прошлого столетия. Нельзя исключить версию, что данная аномалия соответствует сутурному шву, разделяющему Фенноскандию (в нашей версии – Южно-Прибалтийский пояс), с одной стороны, и Сарматию – Волго-Уралию (в нашей версии – Среднерусский пояс) – с другой.

Полученные результаты изучения коровой электропроводности Южного Приладожья вносят существенную новизну в современные представления о геоэлектрическом строении фундамента северо-западной части ВЕП и предоставляют возможности определенного уточнения его тектонического деления под осадочным чехлом. Кроме того, проведенное исследование ставит новые вопросы для продолжения изучения аномалий коровой электропроводности, касающиеся соотношения проводящих ветвей южной и северной частей Ладожской аномалии, а также связи проводников Фенноскандии и Сарматии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксаментова Н.В., Данкевич И.В., Найденов И.В. Глубинное строение Белорусско-Прибалтийского гранулитового пояса // Докл. НАН Белоруссии. 1994. Т. 38. № 2. С. 93–98.

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. М.: ГЕОН. 2002.

Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Урал. сегмента) / С.В. Богданова. М.: Наука. 1986. 222 с. ISSN-0002-3272.

Буртман В.С., Колодяжный С.Ю. Системы разломов в верхней коре Фенноскандинавского щита Восточно-Европейской платформы // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 11(4). С. 756–769.

Васин Н.Д. Геоэлектрическая характеристика разреза юго-западной Карелии // Записки Горного института. 1988. Т. 113. С. 57–63.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Тектоногеодинамическая модель сочленения Фенноскандинавского и Сарматского сегментов Восточно-Европейской платформы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 10. С. 1557–1566.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Белорусская наука. 2014. 120 с.

Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофиз. журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 22–39.

Ковтун А.А., Варданянц И.Л., Успенский Н.И. Сопоставление сейсмической и геоэлектрической моделей Ладожско-Ботнической аномальной зоны // Вопросы геофизики. 2011. Вып. 44. С. 124–133.

Ковтун А.А. Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурических зондирований. Л.: изд-во Ленинградского университета. 1989. 284 с.

Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Тектоника фундамента // Изв. Вузов. Сер. Геология и разведка. 2018. №2. С. 5–13.

Куликов В.А., Ионичева А.П., Королькова А.В. и др. Трехмерная инверсия данных магнитотеллурических зондирований в южном Приладожье // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. № 6. С. 133–141.

Куликов В.А., Александрова Е.Д., Варенцов И.М. и др. Барятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных МТ-исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.

Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Ионичева А.П., Пушкарёв П.Ю., Яковлев А.Г. Электропроводность фундамента восточно-европейской платформы в юго-восточном Приладожье по данным магнитотеллурических зондирований // Физика Земли. 2020. № 6. С. 66–85.

Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Десятов Д.О. и др. Новые данные МТЗ-ГМТЗ по профилю Кириши-Подпорожье 2018 г. Труды Международной геолого-геофизической конференции ГеоЕвразия 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии. М.: ПолиПРЕСС. 2019. С. 446–452.

Литвинова Т.П., Красинский Е.М., Глебовский В.Ю., Белов Е.А., Бойко А.В., Серых С.В. Гравиметрическая карта  $\Delta g$  (редукция Буге,  $\sigma = 2.67 \text{ г/см}^3$ ) РОССИИ масштаб 1 : 2 500 000. ВСЕГЕИ. 2016а. Режим доступа: <https://vsegei.ru/ru/info/atlas/grav/>

Литвинова Т.П., Красинский Е.М., Глебовский В.Ю., Белов Е.А., Бойко А.В., Воронова М.А., Васильева С.И. Карта аномального магнитного поля России масштаб 1 : 2 500 000. ВСЕГЕИ. 2016б. Режим доступа: <https://vsegei.ru/ru/info/atlas/mag/>

Минц М.В. Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия // Геотектоника. 2011. № 4. С. 3–29.

Минц М.В. Палеопротерозойский суперконтинент: возникновение и эволюция аккреционных и коллизийных орогенов (на примере северных кратонов) // Геотектоника. 2007. №4. С. 3–29.

Минц М.В., Соколова Е.Ю., рабочая группа Ладога. Объемная модель глубинного строения Свеклофеннского аккреционного орогена по данным МОВ-ОГТ, МТЗ и плотностного моделирования // Труды Кар. НЦ РАН. № 2. 2018. С. 34–61.

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., Натанов Л.М., Пийп В.Б., Ступак В.М., Тихоцкий С.А., Трусов А.А., Филиппова И.Б., Шур Д.Ю. 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. 2010. Т. 1. 408 с. Т. 2. 400 с.

Морозов Ю.А. О роли транспрессии в формировании структуры свекокарелид Балтийского щита // Геотектоника. 1999. № 4. С. 37–50.

Морозов Ю.А. Структурообразующая роль транспрессии и транстензии // Геотектоника. 2002. № 6. С. 3–24.

Поснеева Е.В. Природа глубинной электропроводности и связь коровых аномалий с месторождениями полезных ископаемых. Тезисы VIII Всероссийской школы-семинара ЭМЗ-2021, Москва, 4–9 октября 2021. С 1–6.

Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Рокитянская Д.А. Ладожская аномалия электропроводности // Геофиз. журн. Украинская академия наук. 1981. № 3. С. 97–99.

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

Соколова 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. Результаты синхронных магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований в районе Ладожской аномалии электропроводности // Геофизика. 2016. № 1. С. 48–61.

Таран Я.В., Зайцев С.В., Соколова Е.Ю., Пушкарёв П.Ю. Опыт инверсии данных новых МТ/МВ зондирований по профилю Выборг-Суоярви через Ладожскую аномалию электропроводности. Глубинное строение и геодинамика Приладожья. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Институт

геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск. 2017. С. 224–230.

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. М. 2009.

Чамов Н.П. Строение и развитие Среднерусско-Беломорской провинции в неопротерозое. Тр. ГИН РАН. Вып. 609. М.: ГЕОС. 2016. 234 с.

Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Yu.A. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // Precambrian Research. 2008. V. 160. P. 23–45.

Bogdanova S., Gorbatshev R., Skridlaite G., Soesoo A., Taran L., Kurlovich D. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna // Precambrian Research. 2015. V. 259. P. 5–33.

Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbatshev R., Orlyuk M.I. Rhiphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // Tectonophysics. 1996. V. 268. P. 1–21.

Egbert G.D., Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems // Geophys. J. Int. 2012. V. 189. P. 167–251.

Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic shield // Precambrian Res. 1993. V. 64. P. 3–21.

Heinson G., Didana Y., Soeffky P., Thiel S., Wise T. The crustal geophysical signature of a world-class magmatic mineral system // Nature Scientific Reports. 2018. V. 8. P. 10608.

Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Comput. Geosci. 2014. V. 66. P. 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010>

Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., Palshin N.A., Smirnov M.Yu., Tokarev A.D., Asming V.E., Vanyan L.L., Vardaniants I.L., the BEAR Working Group. Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 535–558.

Stepanov K., Antashchuk K., Saraev A. Clarification of Pasha Rift Structure in Pasha-Ladoga Basin Based on AMT and Gravity Data // Geophysica. 2016. V. 51. № 1–2. P. 51–67.

## A Geoelectrical Model of the Southern Ladoga Region on the Basis of 3D Magnetotelluric Data Inversion

V. A. Kulikov<sup>a, \*</sup>, A. P. Ionicheva<sup>a, \*\*</sup>, S. Yu. Kolodyazhny<sup>b, \*\*\*</sup>, E. Yu. Sokolova<sup>c, d, \*\*\*\*</sup>, P. Yu. Pushkarev<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>, and A. G. Yakovlev<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>c</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>d</sup>All-Russian Research Institute of Oil Geology, Moscow, Russia

\*e-mail: vic@nw-geophysics.ru

\*\*e-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com

\*\*\*e-mail: kolod63@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: sokol\_l@mail.ru

\*\*\*\*\*e-mail: pavel\_pushkarev@list.ru

\*\*\*\*\*e-mail: mail@nw-geo.ru

The paper presents results of magnetotelluric sounding performed in the South-Eastern Ladoga Region in 2018–2021 for the purpose of studying the deep geoelectrical structure of the basement of the East-European Platform (EEP). The area of the study covers the territory south and south-east of Lake Ladoga to the latitude  $58^{\circ}45' S$  and the longitude  $35^{\circ}37' E$ . In the west, the territory is confined to the Saint Petersburg–Murmansk electric railway. The data gathered by the LADOGA working group and the most solid findings of the previous studies were used to make a 3D inversion and to build a three-dimensional geoelectrical model of the area under study. More detailed electrical resistivity models were obtained for specific profiles on the basis of a two-dimensional inversion. We traced the continuation of the southern branch of the Ladoga electrical conductivity anomaly and clarified its deep structure. Also, we established completely new zones of the crustal electrical conductivity anomaly, which are presumed to mark first-order tectonic boundaries between the South-Baltic belt and the central Russian orogen.

*Keywords:* magnetotelluric sounding, geoelectrical model, crustal electrical conductivity anomaly, two-dimensional inversion