

УДК 550.837.211

## ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ИЛЬМЕНСКОЙ КОРОВОЙ АНОМАЛИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

© 2025 г. В. А. Куликов<sup>1</sup>, Ив. М. Варенцов<sup>2</sup>, П. В. Иванов<sup>2</sup>, А. П. Ионичева<sup>2,\*</sup>, С. Ю. Колодяжный<sup>3</sup>, И. Н. Лозовский<sup>2</sup>, Т. А. Родина<sup>2</sup>, Н. М. Шагарова<sup>1</sup>, А. Г. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>3</sup>Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 07.06.2024 г.

После доработки 21.07.2024 г.

Принята к публикации 09.08.2024 г.

С 2020 г. в зоне сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии) проводятся магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования. Область представляемых исследований продолжает на север массив зондирований SMOLENSK, учитывая новые наблюдения 2023 г. Таким образом, массив SMOLENSK смыкается с еще более северным массивом зондирований LADOGA. В статье обсуждаются результаты инвариантного анализа МТ/МВ данных, выбор ансамбля данных для трехмерной (3D) инверсии, последовательность этапов такой инверсии и анализ полученной 3D-модели удельного электрического сопротивления (УЭС).

*Ключевые слова:* магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, обратные задачи.

DOI: 10.31857/S0002333725010078, EDN: ACLVRZ

### ВВЕДЕНИЕ

Летом 2023 г. в кооперации сотрудников и студентов кафедры геофизики Геологического факультета МГУ и сотрудников Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН) были продолжены синхронные МТ/МВ зондирования на северном фланге массива SMOLENSK [Варенцов и др., 2021], севернее области тройного сочленения Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии.

Три субширотных профиля Себеж—Великие Луки—Ржев (SVR), Пушкинские Горы—Андреполь (РА) и Остров—Осташков (ОО) в 2023 г. были дополнены (рис. 1) профилями Псков—Валдай (PV) и Великие Луки—Порхов (VP).

Основная цель исследований — выявление коровых проводящих аномалий, приуроченных к докембрийским шовным зонам центральной части Восточно-Европейской платформы (ВЕП), поиск признаков современной активизации, а также уточнение карт суммарной продольной проводимости осадочных бассейнов. Область исследований относится к сложной зоне сочленения крупных палеопротерозойских коллизионных поясов фундамента ВЕП (рис. 1): Южно-Прибалтийского (ЮПП), включающего в себя гранулитогнейсовый Белорусско-Прибалтийский (БП) и гранито-гнейсовый Новгородский (НП) пояса, и Среднерусского (СРП) сложно построенного композитного пояса [Минц и др., 2010; Колодяжный, 2018a].

Первые результаты исследований вдоль профиля SVR в сопоставлении с результатами, полученными на южных профилях массива SMOLENSK, были представлены в работах [Варенцов и др., 2021; Куликов и др., 2021], результаты 2D-интерпретации для профилей SVR, PA и ОО приведены в работах [Куликов и др., 2023; Варенцов и др., 2024]. Положение пунктов зондирования в северной части массива SMOLENSK на фоне тектонической схемы фундамента ВЕП показано на рис. 1. Зондирования выполнены в 2020–2023 гг. в широком частотном диапазоне (0.001–2500 с). Акцент в представленной работе сделан на инвариантный анализ МТ/МВ данных, выбор данных для 3D-инверсии и анализ полученной 3D геоэлектрической модели.

ПЕРВИЧНЫЙ АНАЛИЗ МТ ДАННЫХ

Структура карт кажущегося сопротивления на периодах 2–100 с главным образом определяется строением мощного палеозойского осадочного чехла и рифей-вендского проточехла Валдайского авлакогена. Ось зоны минимальных значений имеет северо-восточное направление и проходит через Валдай, Демянск и далее юго-восточнее г. Холм (рис. 2а). Аномалия в южной части этой карты на широте профиля SVR, связанная с осадочными отложениями Валдайского авлакогена, разветвляется на две части: ось юго-западного ответвления проходит западнее Великих Лук, а субмеридионального — в окрестности г. Западная Двина.

Начиная с периодов 100–200 с структура карт кажущегося сопротивления меняется. На фоне

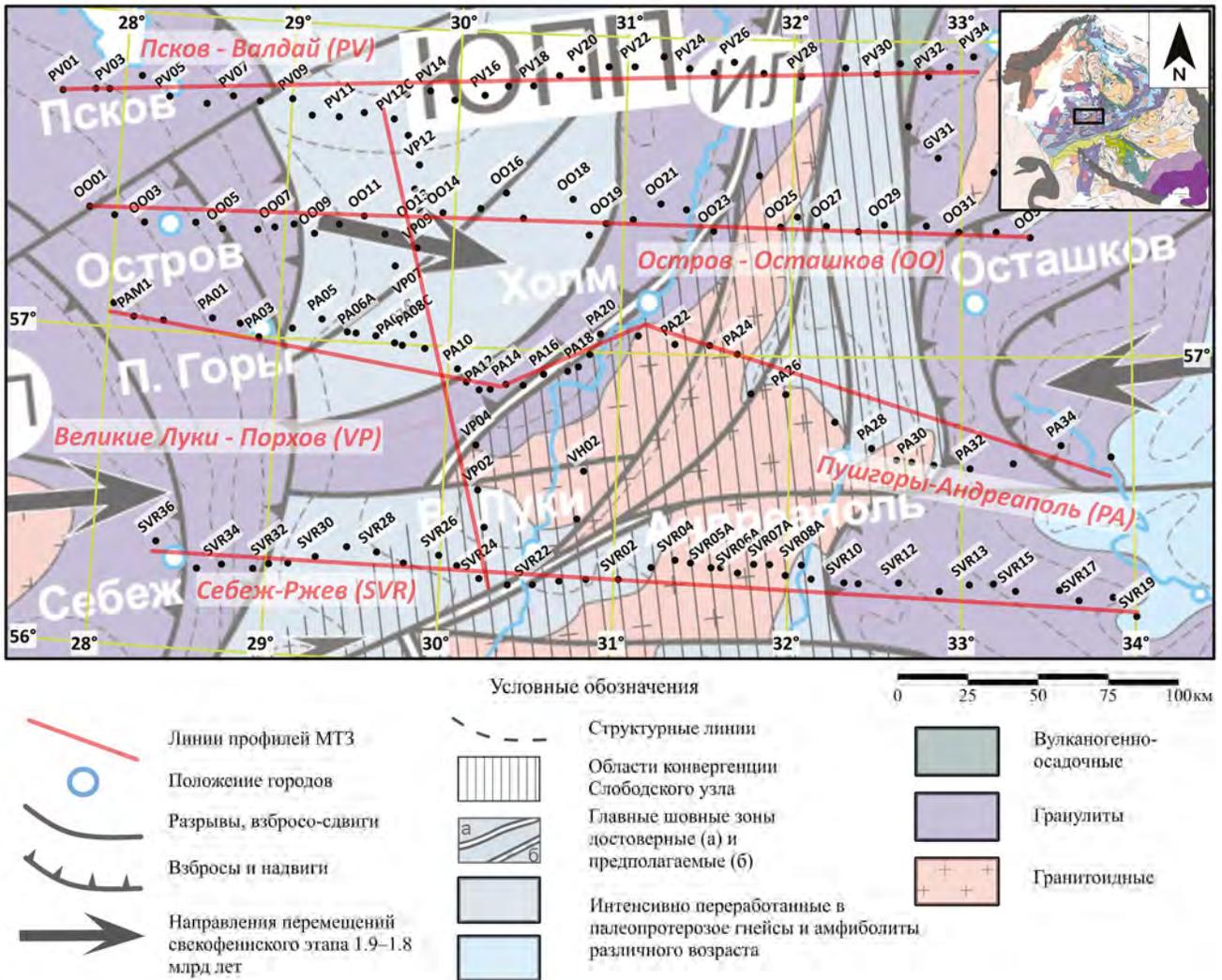


Рис. 1. Положение пунктов и профилей синхронных МТ/МВ зондирования на фоне тектонической схемы фундамента центральной части ВЕП по работам [Минц и др., 2010; Колодяжный, 2018а] с дополнениями; вкладка — положение области исследований на тектонической схеме фундамента ВЕП.

снижения аномального эффекта от осадочных толщ Валдайского авлакогена проявляется (рис. 2б) отрицательная аномалия меридионального простирания с осью, проходящей вблизи Старой Руссы на севере и между Западной Двиной и Великими Луками на юге. Зоны пониженных значений также отмечаются в окрестностях Локни и Дна. В северо-западной части области исследований наблюдается значимое расхождение между широтной ( $\rho_{yx}$ ) и меридиональной ( $\rho_{xy}$ ) компонентами кажущегося сопротивления. Здесь на длинных периодах значения  $\rho_{xy}$  заметно превышают  $\rho_{yx}$  — см. карту их разности для периода 500 с на рис. 3а. Аналогичный эффект для разности фаз импеданса наблюдается уже на периоде 50 с (рис. 3б).

Анализ карт кажущихся сопротивлений и фаз импеданса на различных периодах позволяет выделить три зоны присутствия пород с аномально высокой проводимостью на разных глубинах:

1. Центральная часть Валдайского авлакогена с максимальными (до 2500–3000 См) значениями суммарной продольной проводимости осадков  $S_{oc}$  — здесь среднее сопротивление пород чехла и проточехла с учетом априорных [Колодяжный, 2018б] мощностей осадков (до 2700–3000 м) составляет ~1 Ом·м. Такой уровень сопротивления объясняется присутствием высокоминерализованных вод в нижней части осадков, понижающих сопротивление пород до уровня десятых долей Ом·м. Характерные для этой зоны кривые получены в п. РА22–РА24, ОО28–ОО30 и РВ32–РВ34 (рис. 4а).

2. Северо-западная часть области исследований — здесь фиксируются минимальные (70–400 См) значения  $S_{oc}$ . Характерной особенностью кривых кажущегося сопротивления (рис. 4б) является перегиб на широтной компоненте  $\rho_{yx}$  в диапазоне периодов 50–1000 с. Глубина

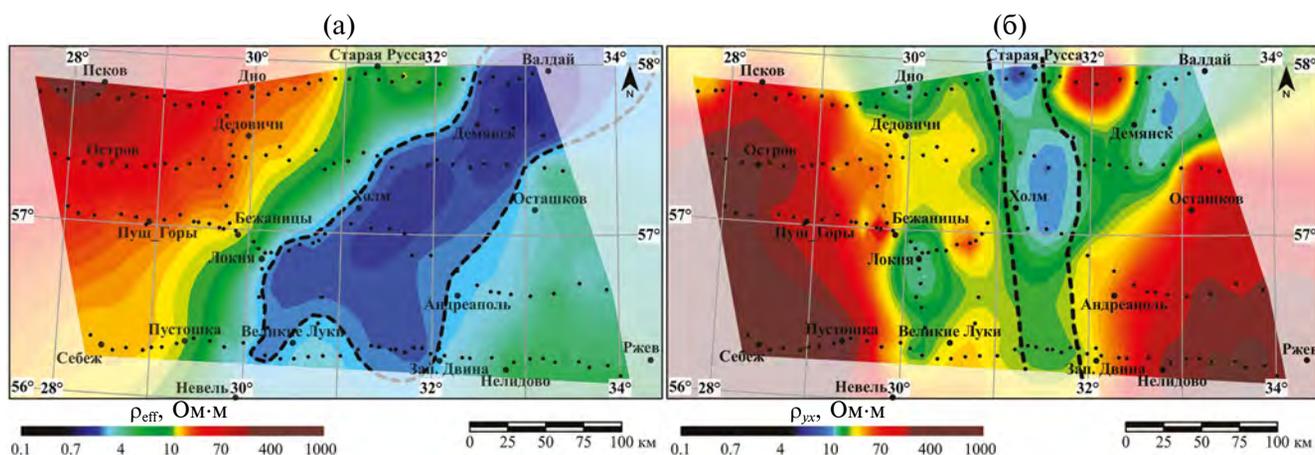


Рис. 2. Карты эффективной компоненты кажущегося сопротивления на периоде 20 с (а) и его меридиональной компоненты на периоде 1000 с (б).

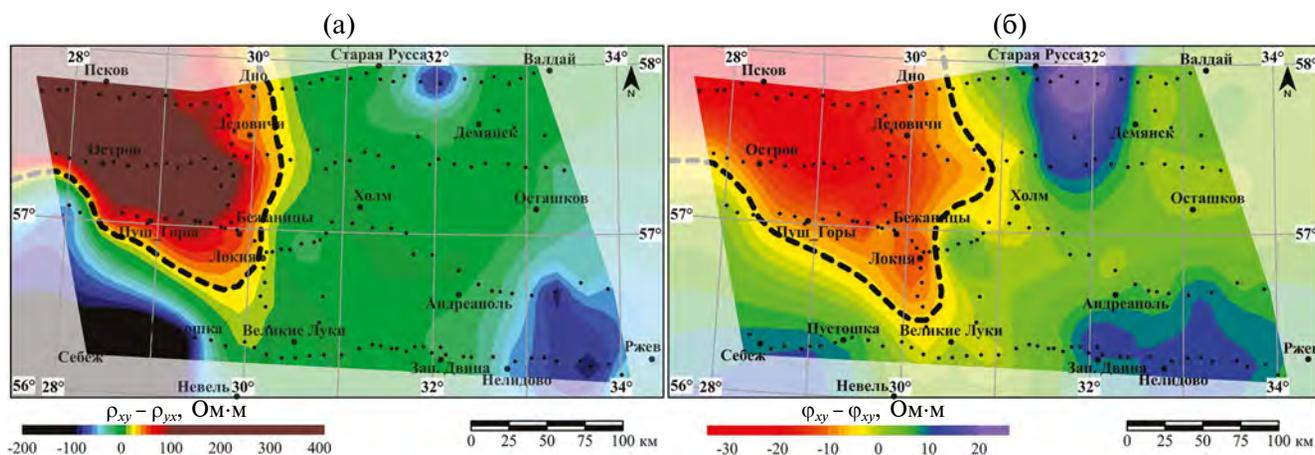
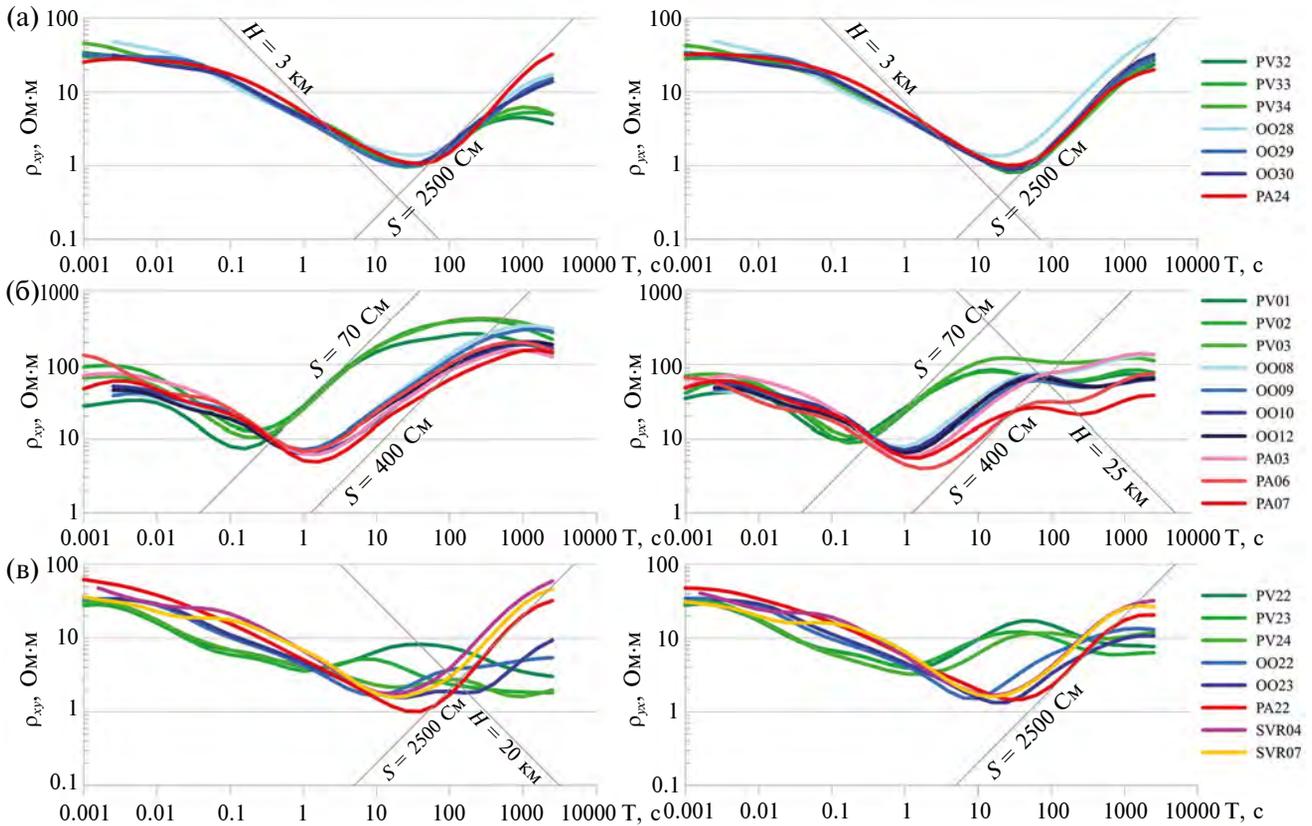


Рис. 3. Карта разности меридиональной и широтной компонент кажущегося сопротивления на периоде 500 с (а) и соответствующих фаз импеданса на периоде 50 с (б).



**Рис. 4.** Типичные кривые кажущегося сопротивления: (а) — в центре Валдайского авлакогена; (б) — в северо-западной зоне; (в) — над меридиональной проводящей зоной в центральной части области исследований.

до кровли проводника асимптотически оценивается в 18–25 км, а его суммарная продольная проводимость  $S_{\text{кор}} = 700\text{--}1500$  См.

3. Зона субмеридиональной отрицательной аномалии  $\rho_{xy}$ , прослеживающейся на длинных периодах от п. 04–08 профиля SVR на юге до п. 22–24 профиля PV на севере — здесь характерной особенностью кривых  $\rho_{xy}$  является аномальное поведение длиннопериодной ветви (рис. 4в). У нескольких кривых отсутствуют восходящие ветви, отвечающие высокоомным породам кристаллического фундамента, на других — присутствуют небольшой максимум и нисходящая ветвь, предполагающая проводник на коровых глубинах 4–20 км. На профилях SVR и PA данная зона пересекается с осью Валдайского авлакогена, что может служить причиной экранирования откликов коровых аномалий осадочными структурами с высокой  $S_{\text{ос}}$ .

#### АНАЛИЗ ИНВАРИАНТОВ МТ/МВ ДАННЫХ

Выделение в области исследований трех зон, характеризующихся различным геоэлектрическим строением осадочного и корового

структурных этажей, подтверждается анализом инвариантов импеданса и МВ передаточных операторов.

Для углубленного анализа геоэлектрической среды [Бердичевский, Дмитриев, 2009] был выполнен анализ значений инвариантных параметров импеданса: неоднородности  $N$ ,  $\beta$ , асимметрии Свифта  $skew_s$ , асимметрии Бара  $skew_B$ , главных значений и направлений фазового тензора [Caldwell et al., 2004] и др. Анализ различных инвариантных параметров показал близкие результаты, однако наиболее информативными оказались параметры фазового тензора.

Фазовый тензор  $\Phi$  имеет четыре вещественные компоненты:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix}$$

В присутствии частотно независимых приповерхностных гальванических искажений он восстанавливает неискаженные фазы компонент тензора импеданса, а в более общем случае приповерхностных искажений дает фазы регио-

нального импеданса, в той или иной степени от них “очищенные”. Компоненты  $\Phi$  часто используются вместо исходных фаз в 2D-инверсии [Varentsov, 2015; Варенцов и др., 2024], а его инварианты позволяют определять размерность и простирание региональных структур при минимальном влиянии приповерхностных искажений. Эллипс фазового тензора определяется четырьмя независимыми параметрами —  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  (длинами осей эллипса, отвечающими экстремальным фазам  $\Phi$ ) и углами  $\alpha$  и  $\beta$ . В 1D-случае  $\Phi_{\max}$  и  $\Phi_{\min}$  равны между собой, в 2D- и 3D-случаях они различаются. Считается, что при их разности более  $15^\circ$  импеданс не отвечает 1D-модели. В 2D-случае  $\beta = 0$ , а  $\alpha$  определяет направление геоэлектрических структур (простирание или падение). При  $\beta$ , меньшем  $5-10^\circ$ , среда считается квазидвухмерной. В этом случае направление структур определяется величиной  $\alpha-\beta$ . Таким образом, по величинам  $\Delta\phi = \Phi_{\max} - \Phi_{\min}$  и параметру  $\beta$  можно оценивать размерность среды, а по величине  $\alpha-\beta$  определить ориентацию доминирующих геоэлектрических структур. Выдержанность значений  $\alpha-\beta$  вдоль профиля, по площади и по периодам свидетельствует о квазидвухмерности изучаемой среды.

В области исследований аномалии  $\Delta\phi > 15^\circ$  начинают проявляться с периодов  $5-10$  с. На меньших периодах разрез можно считать близким к одномерному. На периоде  $100$  с (рис. 5а) выделяются две аномальные области — северо-западная (от Пскова до Острова) и северная (восточнее Старой Руссы). Простирание геоэлектрических структур на периоде  $10$  с для выделенных областей составляет: на северо-западе —  $270-290^\circ$ , восточнее Старой

Руссы — субмеридиональное. С увеличением периода размеры этих двух аномалий увеличиваются при сохранении преобладающих азимутов — первая протягивается до Бежаниц и Локни на профиле РА, вторая — до профиля ОО. На периоде  $100$  с еще несколько зондирований на профиле SVR восточнее Нелидова характеризуются значениями  $\Delta\phi > 15^\circ$  (рис. 5а), а на периоде  $1000$  с (рис. 5б) данная аномалия смещается на запад и смыкается с аномалией восточнее Старой Руссы.

С учетом значений асимметрии фазового тензора  $\beta$ , области с высокими значениями  $\Delta\phi$  отвечают 2D-структурам — в них значения  $\beta$  практически не выходят за пределы  $10^\circ$ . Трехмерность геоэлектрической структуры отмечается в районе Локни и Андреаполя. На периоде  $1000$  с высокая неоднородность среды проявляется в субмеридиональной зоне от Западной Двины до Старой Руссы (рис. 5б).

## АНАЛИЗ МВ ДАННЫХ

Первым этапом изучения МВ данных [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Varentsov, 2015] является анализ компонент и инвариантов типпера  $W_z$ , связывающего локальные вертикальное и горизонтальные магнитные поля:

$$H_z = \begin{bmatrix} W_{zx} & W_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}.$$

Важнейшими инвариантами  $W_z$  являются [Бердичевский, Дмитриев, 2009] индукционные векторы (Re и Im), составленные, соответственно, из действительных и мнимых компонент типпера. Действительные векторы имеют

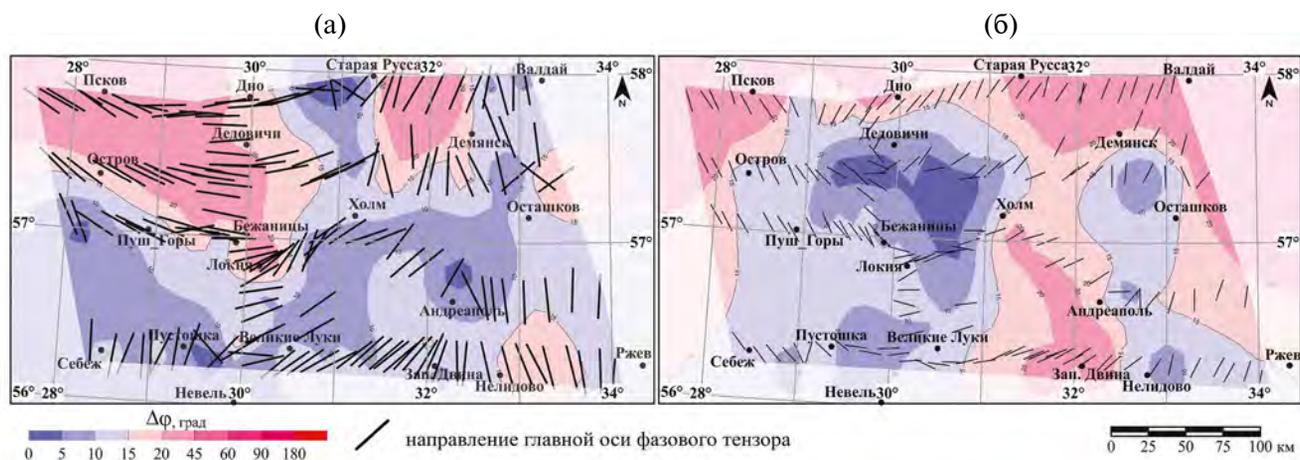


Рис. 5. Карта фазового параметра неоднородности  $\Delta\phi$  и направлений максимальной оси фазового тензора на периодах  $100$  с (а) и  $1000$  с (б).

примечательные свойства: они малы на оси проводящих аномалий, максимальны по длине в ближней окрестности проводников и направлены (в конвенции Визе) от их оси в сторону повышенных сопротивлений.

Самым распространенным способом визуализации индукционных векторов является их наложение на карты изолиний других компонент или инвариантов МТ/МВ данных (например, кажущихся сопротивлений или импедансных фаз), в т.ч. при их совмещении с другими инвариантами, представляемыми в виде векторов или эллипсов [Varentsov, 2015]. Анализ ориентации индукционных векторов позволяет предсказывать существование проводников на удалении от профиля зондирования [Ivanov, Pushkarev, 2010].

На коротких периодах в квази-1D-условиях длины векторов индукции минимальны равно-

мерно по области исследований. На периодах 5–10 с наблюдается увеличение длины векторов в западной части профиля PV, предполагающее присутствие проводника субширотного простирания. На периодах 20–200 с наиболее яркая аномалия минимальных длин действительных индукционных векторов картирует зону Валдайского авлакогена (рис. 6а). С увеличением периода на юге аномалии минимальных длин постепенно меняют простирание с ЮЗ на меридиональное, а на периодах более 500 с фиксируется в этом направлении.

Ось глубинного проводника прослеживается на карте действительных индукционных векторов (рис. 6б). Компонента  $ReW_{zy}$  на длинных периодах меняет знак (рис. 7а) на линии вблизи меридиана 32° в.д. (от Западной Двины до Старой Руссы). На этой линии происходит инверсия направлений действительных индукционных векторов (рис. 6б) с западного на восточное.

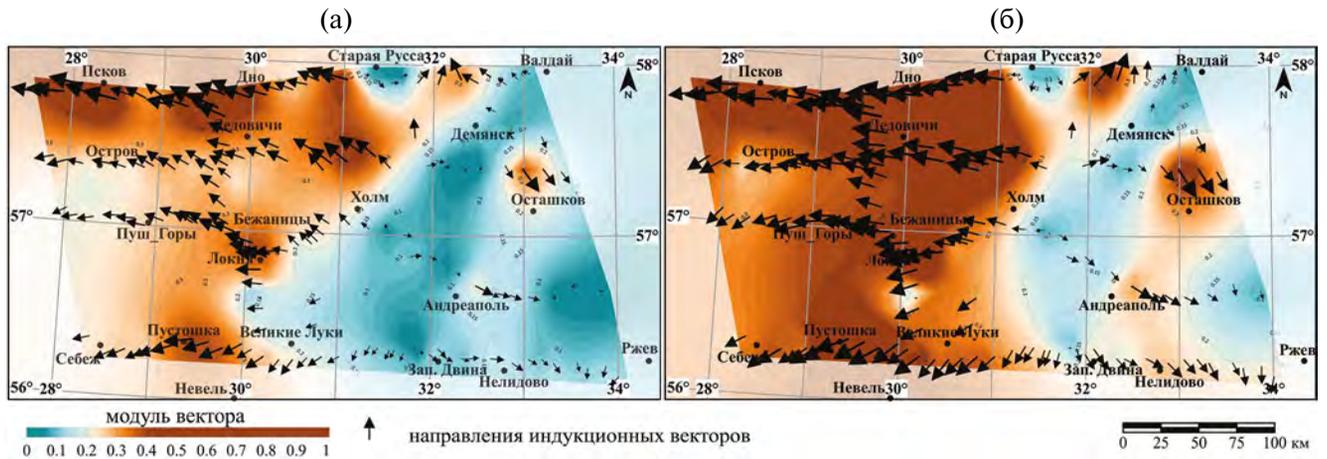


Рис. 6. Индукционные векторы (Re) на фоне карты их длин: периоды 200 (а) и 500 с (б).

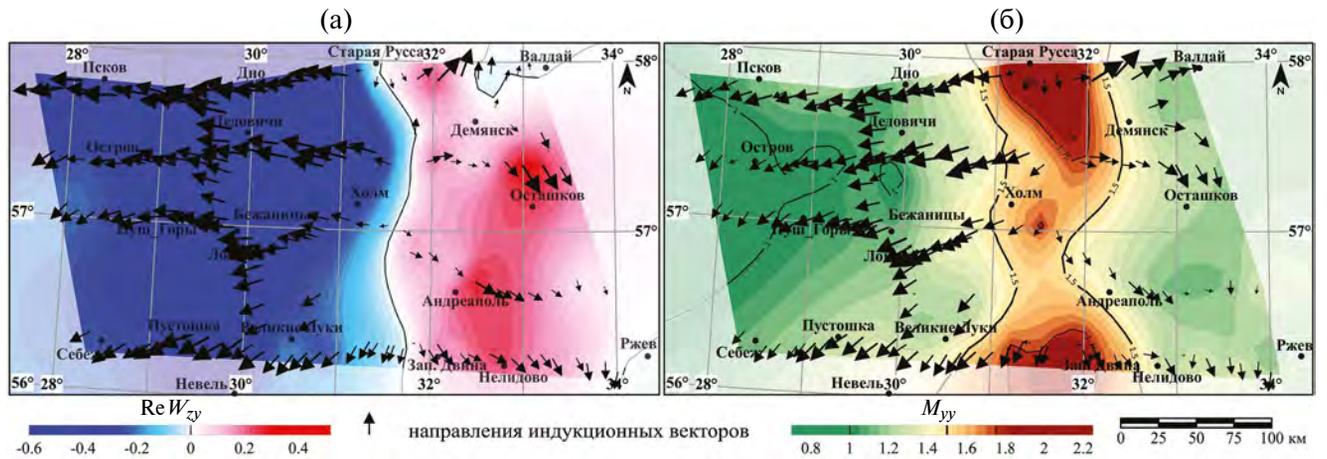


Рис. 7. Карты действительной части компоненты  $W_{zy}$  на периоде 500 с (а) и амплитуды широтной компоненты  $M_{yy}$  (б) на периоде 2000 с; на карты наложены действительные векторы индукции.

Далее, с использованием магнитных наблюдений на базовой станции ALX в д. Александровка Калужской области, были получены и проанализированы компоненты горизонтального МВ оператора  $M$  [Varentsov, 2015]. На малых периодах ( $<200$  с) на картах компонент  $M$  заметных аномалий не отмечено. На периодах более 500 с в центральной части области исследований ярко проявляется меридиональная положительная аномалия амплитуды  $M_{yu}$  (рис. 7б). Данная аномалия является продолжением аналогичной субмеридиональной аномалии, прослеженной южнее от профиля SVR до южного борта Оршанской впадины [Варенцов и др., 2021]. Легко заметить на рис. 7б, что ось аномалии амплитуды  $M_{yu}$  практически совпадает с осью инверсии направлений индукционных векторов, что свидетельствует о непротиворечивости полученных оценок  $W_z$  и  $M$ .

Новым результатом анализа компонент и инвариантов МТ/МВ данных во всей области исследований, по сравнению с данными в работе [Куликов и др., 2023], стало прослеживание субмеридиональных аномалий, наиболее ярко проявившихся в МВ данных типпера и горизонтального МВ оператора. Ось этих аномалий согласованно проходит (рис. 7б) к западу от Западной Двины на профиле SVR, к западу от Холма на профиле РА и в окрестности Старой Руссы на профиле РV. Данные аномалии в значительной части связаны с присутствием коровой проводящей зоны соответствующего простираения. Однако в их пределах имеет место интерференция с откликами осадочных проводящих структур, проявляющаяся во всем исследуемом диапазоне длинных периодов до нескольких тысяч секунд.

Вторая аномальная область выделена на северо-западе, где на широтных кривых кажущегося сопротивления и фазы импеданса в явном виде и в согласии с экстремальными осями фазового тензора  $\Phi$  проявляется коровый проводник субширотного простираения. Данный проводник геологически приурочен к Новгородскому поясу и ограничен на западе гранулитогнейсовым Белорусско-Прибалтийским поясом, а на востоке — гранулитами основного состава Ильменско-Ладожского пояса.

### ТРЕХМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ МТ/МВ ДАННЫХ

Проведенный выше анализ МТ/МВ данных показал, что геоэлектрическая структура осадочного чехла и земной коры исследуемого

участка характеризуется существенно неоднородным строением и наличием объектов с аномальными электрическими свойствами разного простираения на нескольких структурных этажах. В ее центральной части на коровых глубинах присутствуют проводящие объекты субмеридионального простираения, а в северо-западной части — субширотного, притом что Валдайский авлакоген, заполненный наиболее проводящими осадочными породами, имеет северо-восточное простираение.

Присутствие разноориентированных и расположенных на различных глубинах проводящих структур нацеливает нас на постановку и решение обратной задачи в классе объемных 3D-моделей. Анализируемые зондирования велись на серии субширотных профилей с шагами вдоль профилей ( $\sim 10$  км), в разы меньшими межпрофильных расстояний (50–60 км). Такая система наблюдений благоприятна для изучения субмеридиональных структур как методами 2D-, так 3D-инверсии [Иванов и др., 2022; Куликов и др., 2023; Варенцов и др., 2024]. Менее благоприятна она для 3D-инверсии, нацеленной на изучение субширотных структур ограниченной ширины (до 50 км). В этом случае важную роль должны сыграть данные типпера, наиболее чувствительные к проводящим объектам в межпрофильном пространстве [Иванов, Пушкарев, 2012].

Формализованная 3D-инверсия МТ/МВ данных велась с помощью программы ModEM [Kelbert et al., 2014] от стартовой модели, включающей априорную информацию о структуре осадочного чехла в окрестности региона исследований. При подготовке стартовой модели использована карта  $S_{oc}$  [Варенцов и др., 2021], пополненная результатами новых МТ зондирований (рис. 8а). Для задания значений мощности осадочного чехла (рис. 8б) использована карта изогипс фундамента [Колодяжный, 2018б] и данные альтитуд рельефа. Нормальный (фонный) 1D-разрез стартовой модели выбран, следуя с упрощениями работе [Иванов и др., 2022], и включал следующие параметры слоев: сопротивление 500 Ом·м на глубинах 0–100 км, 400 Ом·м на глубинах 100–200 км, 100 Ом·м на глубинах 200–300 км и 30 Ом·м ниже 300 км. Размерность сетки моделирования:  $49 \times 69 \times 61$  ячеек по осям  $X$  (направленной на север),  $Y$  (на восток) и  $Z$  (вниз) соответственно. Горизонтальные размеры ячеек моделирования в окрестности области задания данных —  $10 \times 10$  км, по вертикали ячейки составляли 200 м до глубины 4 км, а далее увеличивались в геометрической прогрессии с коэффициентом 1.15.

До инверсии была выполнена процедура нормализации кривых кажущегося сопротивления для устранения гальванических искажений в программе *Inversio* (ООО “Северо-Запад”, Москва). Она проводилась путем площадного сглаживания данных (с радиусом 60 км) на периоде 0.7 с. Общее число зондирований, участвовавших в 3D-инверсии, составило 163. Использовались данные на 33 периодах от  $10^{-3}$  до 2500 с (с плотностью 5 периодов на декаду). Инвертировался ансамбль четырех компонент тензора импеданса и двух компонент типпера — всех в представлении ( $Re$ ,  $Im$ ). При инверсии задавались фиксированные оценки погрешностей импедансных амплитуд на уровне 5% для главных компонент и 15% для дополнительных. Абсолютная ошибка компонент типпера фиксировалась на уровне 0.01. Оценки погрешностей, полученные при обработке данных, не использовались.

Одной из ключевых особенностей проведенной 3D-инверсии являлась ручная корректировка модели сопротивлений на промежуточных итерациях подбора. Корректировка выполнялась с помощью инструментов программы *Inversio* с участием консультантов-геологов. Этот подход, в частности, позволил скорректировать положение нижних границ коровых проводников, которые при автоматической инверсии имеют обыкновение “затягиваться” на верхнемантийные глубины.

Сводная невязка (RMS) данных в итоговой модели инверсии составила 1.91, однако эта оценка сильно зависит от заданной модели погрешностей данных. Поэтому дополнительно были рассчитаны средние по всем периодам невязки для каждой компоненты инвертируе-

мых данных и каждого пункта зондирования. Результаты расчета представлены на рис. 9 в виде карт таких невязок: относительных для кажущегося сопротивления (в %) и абсолютных для импедансных фаз и компонент  $W_z$ .

Показанные невязки для подавляющего большинства зондирований не превышают 4% для кажущихся сопротивлений и  $4^\circ$  для импедансных фаз. Лишь для меридиональной компоненты  $\rho_{xy}$  в восточной части профилей ОО и PV уровень невязок превышает 5%, особенно в окрестности Старой Руссы. Для зондирования ОО07 получены невязки, соответствующие средней точности подбора ( $\rho_{xy} - 3.4\%$ ,  $\rho_{yx} - 2.2\%$ ,  $\varphi_{xy} - 2.8^\circ$ ,  $\varphi_{yx} - 2.9^\circ$ ,  $ReW_{zx} - 0.025$ ,  $ImW_{zx} - 0.009$ ,  $ReW_{zy} - 0.011$ ,  $ImW_{zy} - 0.009$ ), для PV23 — одни из худших невязок подбора ( $\rho_{xy} - 6.5\%$ ,  $\rho_{yx} - 6.1\%$ ,  $\varphi_{xy} - 5.5^\circ$ ,  $\varphi_{yx} - 2.8^\circ$ ,  $ReW_{zx} - 0.029$ ,  $ImW_{zx} - 0.020$ ,  $ReW_{zy} - 0.072$ ,  $ImW_{zy} - 0.037$ ). Сопоставление модельных и наблюдаемых кривых приведено на рис. 10.

Отметим, что невязки, полученные в результате 3D-инверсии, соответствуют уровню невязок 2D-инверсии [Иванов и др., 2022; Куликов и др., 2023; Варенцов, 2024], что может свидетельствовать о высоком качестве входных данных, корректно выбранных параметрах сетки моделирования и адекватной структуре стартовой модели. Следует, однако, заметить, что использование в 3D-инверсии данных импеданса и, прежде всего, типпера в диапазоне коротких периодов 0.001–0.025 с, в котором МТ/МВ данные весьма близки к одномерным и имеют малую мозаичную площадную изменчивость, порождает большое число малых невязок, практически не влияющих в рамках принятой дискретизации модели на разрешение осадочных и коровых

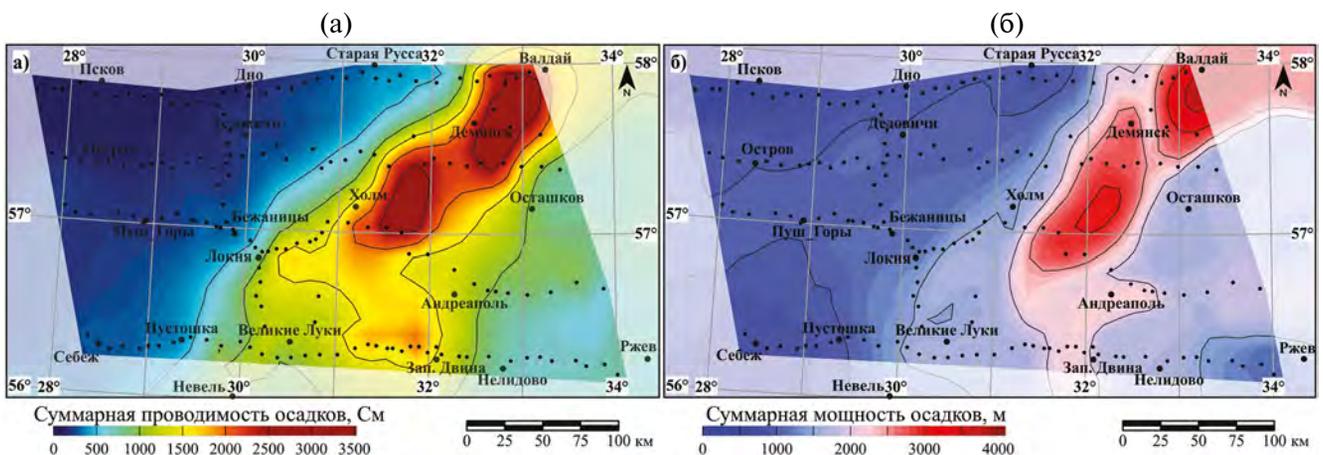


Рис. 8. Карты суммарной продольной проводимости (а) и мощности (б) осадков по работе [Колодяжный, 2018б].

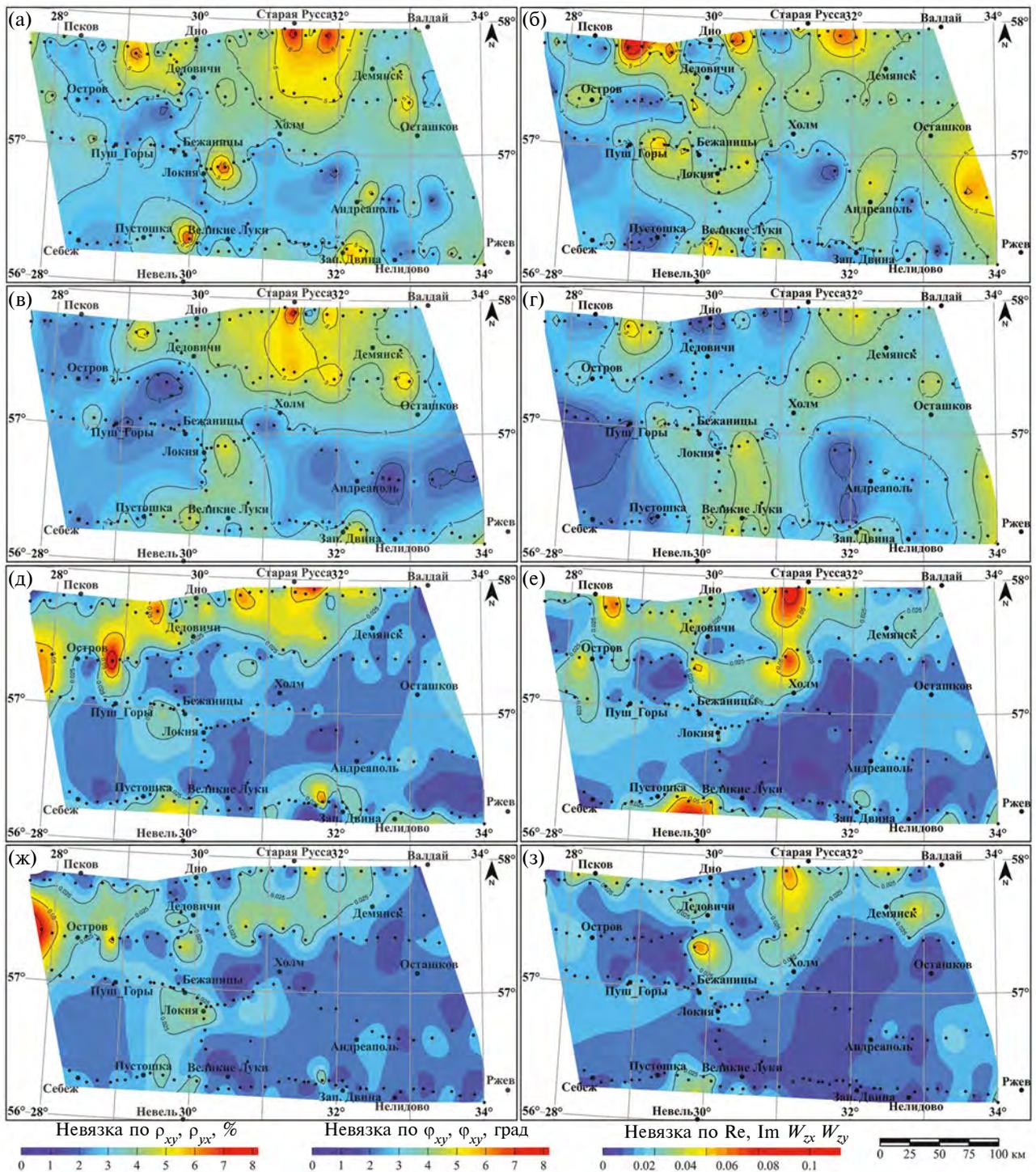


Рис. 9. Карты невязок по результатам инверсии: компоненты  $\rho_{xy}$  (а),  $\rho_{xx}$  (б),  $\varphi_{xy}$  (в),  $\varphi_{xx}$  (г),  $Re W_{zx}$  (д),  $Re W_{zy}$  (е),  $Im W_{zx}$  (ж),  $Im W_{zy}$  (з).

структур, но существенно занижающих оценки норм невязок по всему интервалу периодов.

Результаты 3D-инверсии представлены в виде карт-срезов сопротивления для серии глубин (от 1 до 40 км), а также в виде разрезов

вдоль отдельных широтных линий, некоторые из которых соответствуют положению профилей зондирования.

Первый срез УЭС на глубине 1 км (рис. 11а) для большей части площади характеризует оса-

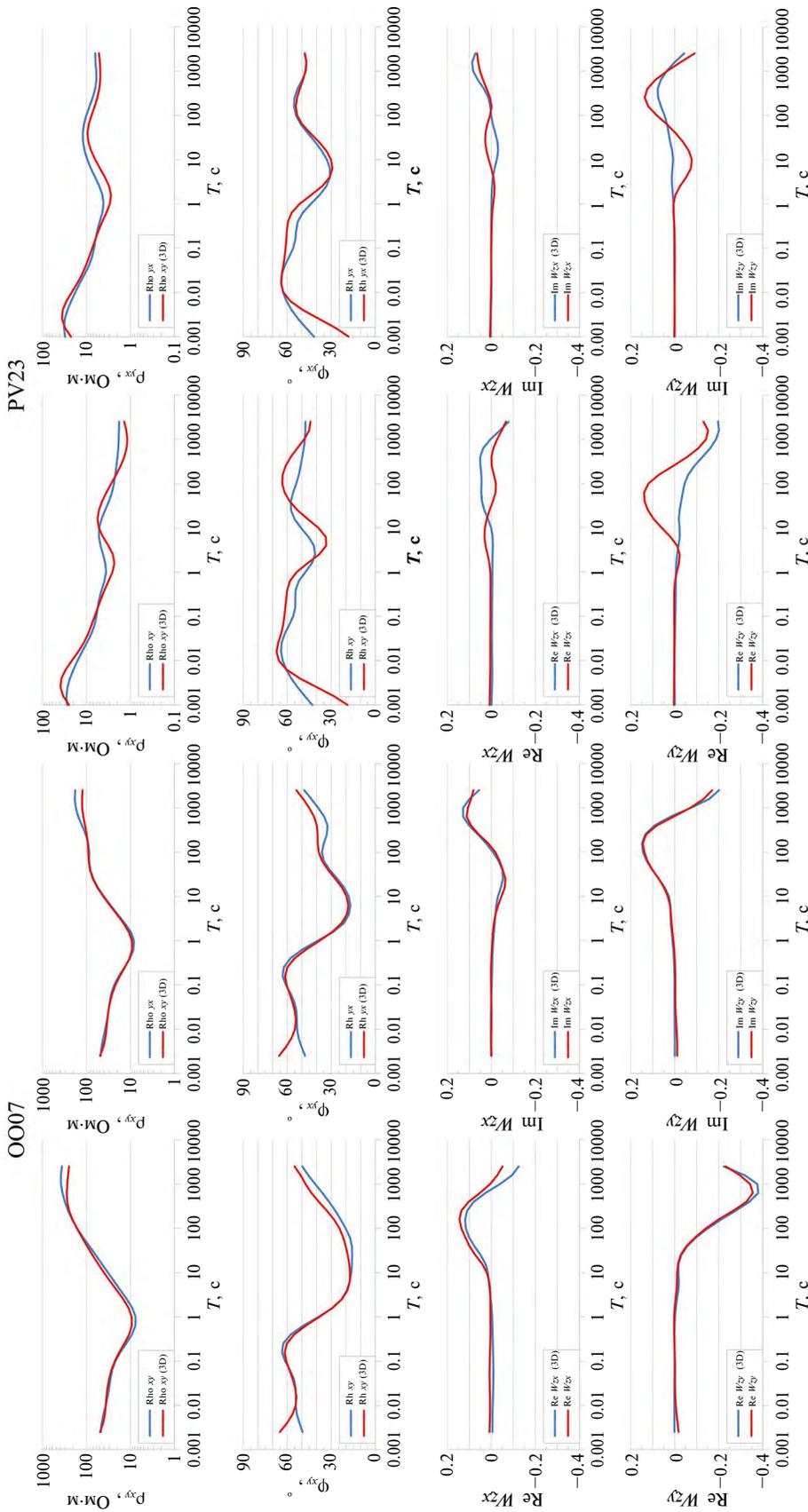


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные кривые  $\rho_k$ ,  $\phi$ ,  $Re$ ,  $Im W_{zx}$  и  $W_{zy}$  для зондирований OO07 (слева) и PV23 (справа).

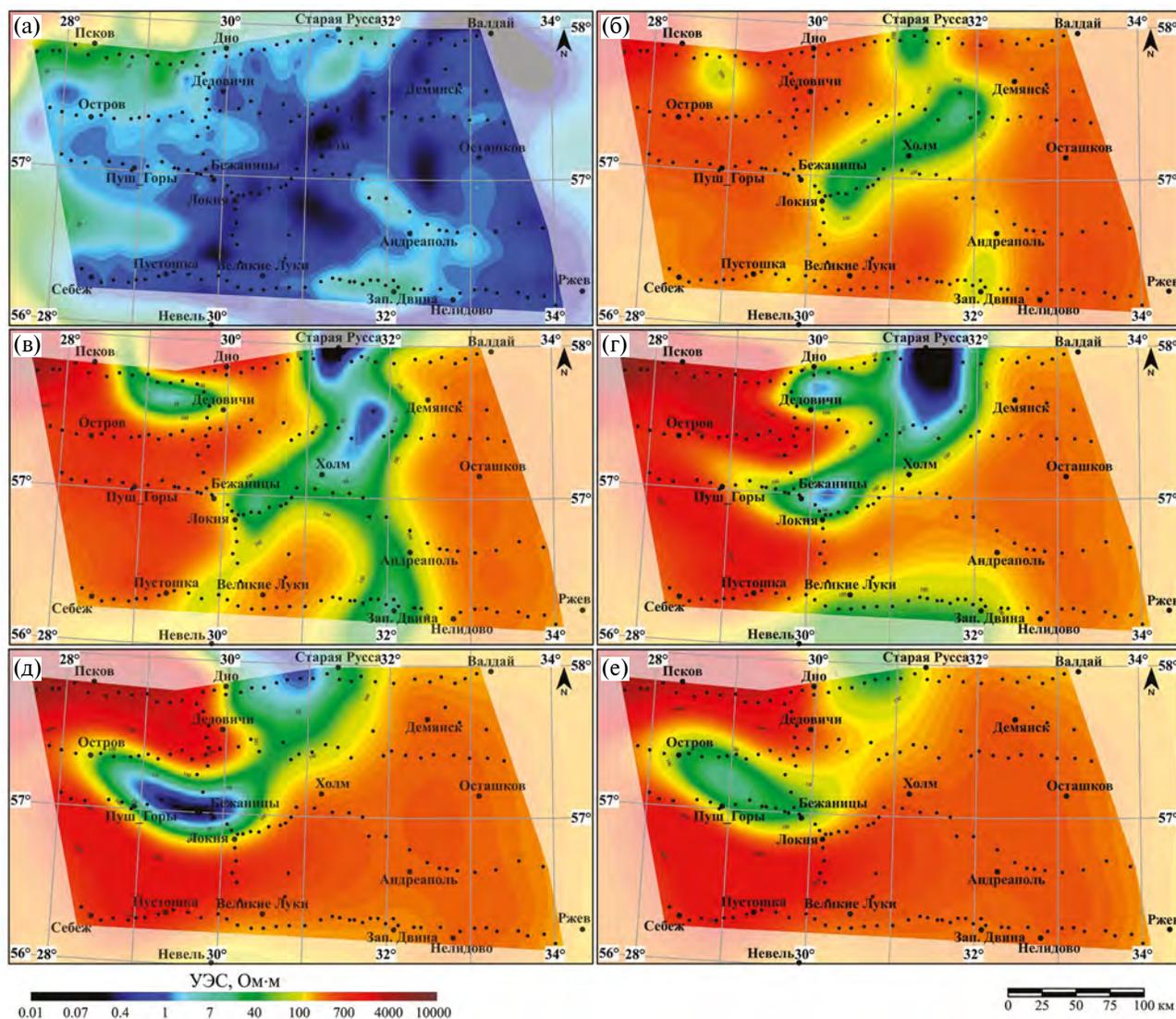


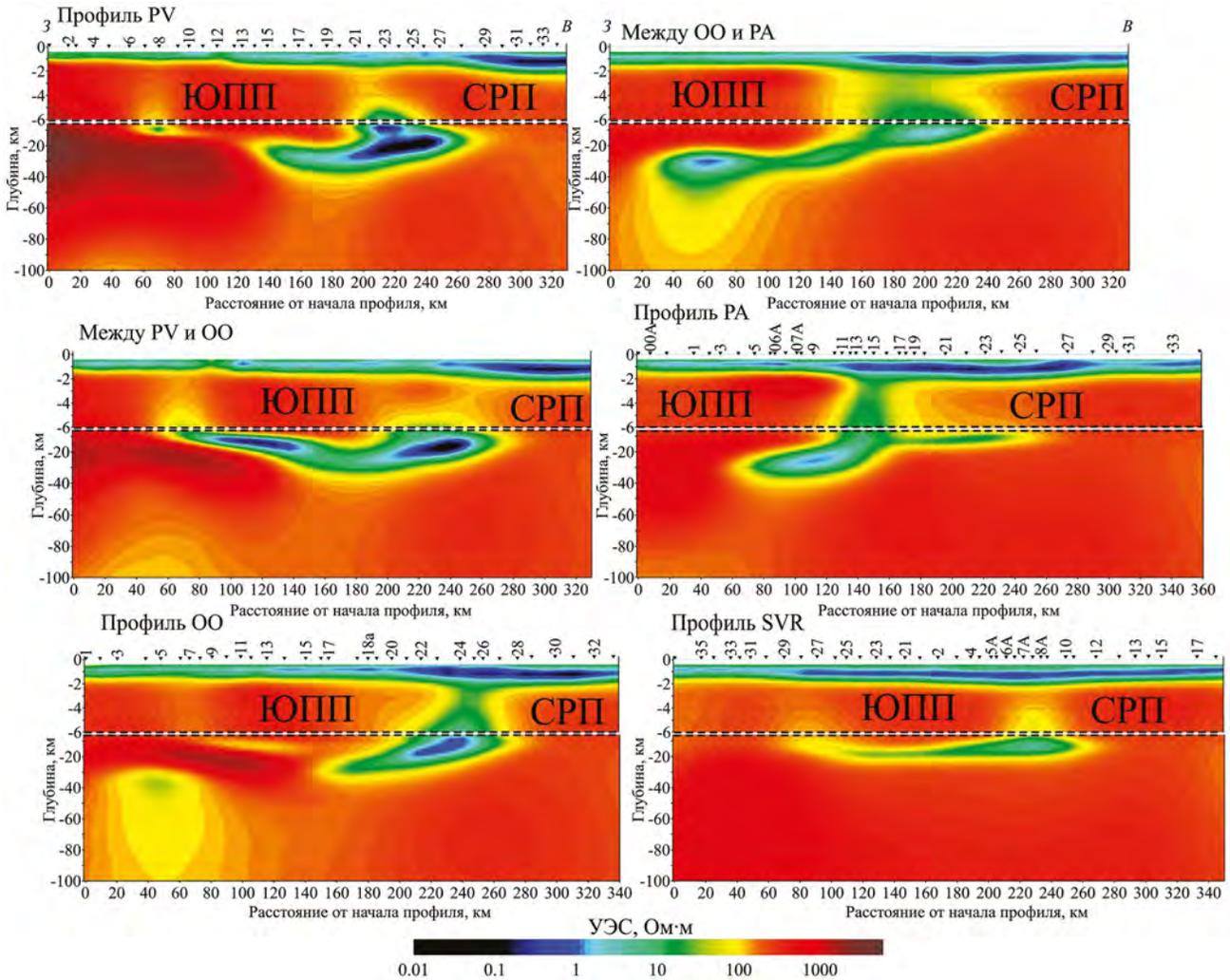
Рис. 11. Карты-срезы сопротивления 3D-модели: для глубины 1 км (а), 5 км (б), 10 км (в), 20 км (г), 30 км (д) и 40 км (е).

дочные породы. Самые низкие сопротивления осадков фиксируются по оси Валдайского авлакогена (Пустошка—Локня—Холм—Демянск—Валдай) и составляют 0.2–0.4 Ом·м. Если предположить, что средние значения пористости осадков составляют 15%, то минерализация пластовых вод для таких сопротивлений составляет ~40 г/л [Алексанова и др., 2018].

Зона пониженных сопротивлений в земной коре начинает проявляться уже на глубинах 5–10 км (рис. 11б). Проводник субмеридионального простирания, существование и положение которого было предсказано по результатам анализа МВ параметров (рис. 7), наиболее ярко отобразился на карте-срезе для глубины 10 км (рис. 11в). На разрезах вдоль профилей ОО, РА и SVR (рис. 12) видно, что на верхних уровнях коры он образует широкую (20–30 км) субвертикаль-

ную зону, прослеживаемую до глубин 10–15 км, после чего переходит в латерально вытянутое тело, локализованное на глубине 15–30 км. Именно эту структуру мы называем Ильменской коровой аномалией электропроводности. На приведенных разрезах она окаймляется фронтальными частями двух блоков высокого сопротивления, соответствующих Южно-Прибалтийскому и Среднерусскому поясам (рис. 1).

Полого залегающая часть Ильменской аномалии проявляется на глубинах от 10 км. На горизонтальных срезах разной глубинности контуры этой хорошо проводящей зоны несколько меняются. Начиная с глубины 20 км проявляется регионально выдержанный пояс СВВ простирания, осложненный двумя ответвлениями субширотного направления (рис. 11г, 11д): одно из них



**Рис. 12.** Глубинные разрезы УЭС вдоль субширотных линий, близких к профилям зондирований РА, ОО и PV, и лежащих между ними; ЮПП — Южно-Прибалтийский пояс, СРП — Среднерусский пояс.

протягивается между профилями РА и ОО, второе — несколько южнее профиля PV.

В разрезах вдоль профилей РА, ОО и PV формы проводящих зон близки. Их ширина составляет ~100 км, они погружаются в западном направлении под углом ~15° в диапазоне глубин 10–30 км, во всех сечениях присутствует узкая зона умеренно низких сопротивлений, связывающая коровые и осадочные структуры. Два субширотных ответвления Ильменской аномалии лежат между профилями зондирований, поэтому их лучше видно в промежуточных разрезах (рис. 12) между профилями РА — ОО (южная ветвь) и ОО — PV (северная ветвь). Они структурно различаются: южная ветвь характеризуется западным наклоном, совпадающим с наклоном основной ветви Ильменской аномалии и в плане имеет дугообразную форму; северная ветвь на востоке также имеет пологое западное погружение, но далее

меняет его на западное вздымание, образуя “чашеобразную” структуру (рис. 12).

### ОБСУЖДЕНИЕ ПОСТРОЕННОЙ 3D-МОДЕЛИ И ВЫВОДЫ

По результатам 3D-инверсии в области исследований построена достаточно подробная объемная геоэлектрическая модель от осадочного чехла на всю глубину консолидированной коры. В присутствии мощных осадков, достигающих в осевой части Валдайского авлакогена суммарной продольной проводимости 3000 См и существенно экранирующих глубинные МТ/МВ отклики, получена важная информация о структуре коровых аномалий электропроводности. Этот результат был получен благодаря:

— широкому (0.001–5500 с) частотному диапазону МТ/МВ зондирований;

– подавлению локальных ЭМ-помех методом мульти-RR оценивания [Varentsov, 2015] передаточных МТ/МВ операторов с использованием синхронных записей с нескольких удаленных пунктов полевых зондирований и на базовом п. ALX (д. Александровка, Калужской области);

– получению оценок горизонтального МВ отклика относительно п. ALX;

– проведению углубленного инвариантного анализа МТ/МВ данных (импеданса, типпера и горизонтального МВ оператора);

– учету априорной информации об осадочном чехле в стартовой модели 3D-инверсии;

– многоэтапной реализации формализованной 3D-инверсии с ручной корректировкой промежуточных результатов, не отвечающих априорным представлениям.

В построенной модели сопротивление нижних горизонтов осадочного проточехла в границах Валдайского авлакогена составляет 1–2 Ом·м, что объясняется присутствием терригенных коллекторов, насыщенных высокоминерализованными водами, сходных с венд-рифейскими коллекторами Оршанской впадины [Варенцов и др., 2021]. В северной части области исследований данная структура имеет северо-восточное простирание, в южной оно плавно меняется на субмеридиональное.

Между 31° и 32° в.д. через всю область исследований на глубинах от 10 км протягивается линейная область низких сопротивлений (<100 Ом·м). Схожая аномалия прослеживается и южнее (до южного борта Оршанской впадины) на профилях NZ, GD, VS, OB, MK и KZ массива SMOLENSK [Варенцов и др., 2021; 2024; Иванов и др., 2022]. Она хорошо картируется максимальными амплитудами горизонтального МВ отклика [Варенцов и др., 2021]. На профилях PA и OO данная структура располагается под центром Валдайского авлакогена, и ее разрешение на данном этапе 3D-инверсии затруднительно, хотя она достаточно уверенно выделяется в моделях 2D-инверсии [Куликов и др., 2023; Варенцов и др., 2024], имеющих в разы лучшую дискретизацию моделей.

Ильменская аномалия электропроводности, впервые упомянутая в работе [Рокитянский и др., 1982] севернее по результатам редких МВ зондирований, проявляется западнее на профилях PA, OO и PV. В плане она имеет сложную структуру — ее основная ветвь имеет северо-восточное простирание и проходит несколько

восточнее оси Ильменско-Ладужской шовной зоны. Помимо основной ветви, по результатам инверсии выявлено два субширотных ответвления Ильменской аномалии (рис. 11г, 11д): одно из них протягивается между профилями PA и OO, второе — несколько южнее профиля PV. Южная ветвь проводника характеризуется западным наклоном, совпадающим с наклоном основной ветви Ильменской аномалии, и в плане имеет дугообразную форму, огибая южную границу Новгородского пояса. Северная ветвь имеет пологий восточный наклон и широтный азимут. Кровля проводника располагается на глубинах ~10 км, выше намечается менее контрастный гальванический контакт с проводящими осадками.

На данном этапе можно рассматривать две концепции геологического истолкования полученных результатов. В рамках первой из них предполагается, что Ильменская аномалия имеет ту же природу, что и Ладужская аномалия, связанную с присутствием сильно тектонизированных и метаморфизованных пород, накопившихся в виде мощных осадочных призм в условиях континентального склона и насыщенных органическим и карбонатным веществом. В процессе коллизии эти отложения испытали погружение на большие глубины в пределах поддвиго-надвиговых сутурных зон, оказавшись перекрытыми покровами гранулитогнейсов и гранитогнейсов Южно-Прибалтийского и Среднерусского поясов, надвигавшимися навстречу друг другу. Контуры этих слабо проводящих аллохтонных массивов (рис. 12, красные тона) определяются границами зон низкого сопротивления (желтые, зеленые и синие тона) и лучше всего видны на профилях PV, PA и OO. Основание покровов расположено на глубинах 10–20 км. Ильменская аномалия электропроводности соответствует шовной зоне, сохранившейся между аллохтонными массивами, и прослеживается от основания высокопроводящих осадков до глубин 30–35 км. На этих средне- и нижнекоровых уровнях аномально проводящие образования, вероятно, соответствуют метаосадкам, оказавшимся в поднадвиговой области встречных покровов. Характер их латерального распространения позволяет предполагать, что амплитуды надвигания Южно-Прибалтийского покровного массива (до 120–140 км) значительно выше, чем Среднерусского (20–65 км). В результате метаморфизма в пределах поднадвиговых и межблоковых частей шовной зоны в метаосадках произошло выделение свободных фаз углерода и графита из пород карбонатного

и углисто-глинистого состава. В зонах скучивания и многократного сдвигания мелких тектонических пластин в пределах шовной зоны сформировались скопления графитосодержащих парагнейсов и бластомилонитов. Рассмотренные процессы, вероятнее всего, были связаны с формированием внутриконтинентальной безофиолитовой сутурной зоны [Куликов и др., 2022].

Ладожская аномалия располагается [Ионичева, 2022; Куликов и др., 2022] на континентальном склоне Карельского массива. Ильменская аномалия выявлена на большом удалении от границ Карельского массива, но не исключено, что западная (фронтальная) часть Среднерусского пояса является интенсивно переработанным фрагментом коры Карельского массива либо аналогичного крупного архейского блока, что согласуется с тектонической картой [Bogdanova et al., 2016] (рис. 13). Важным шагом верификации данной концепции станет дальнейшее продвижение массива зондирований SMOLENSK на север и запад, приближаясь от Чудского озера до Валдайской возвышенности к электрифицированной на постоянном токе ж/д Москва — С. Петербург, ограничивающей область исследований проекта SMOLENSK.

Согласно второй концепции, уже обсуждавшейся в работах [Варенцов и др., 2021; Иванов, 2022], Ильменская аномалия связана с офиолитовой сутурой Центрально-Белорусской шовной зоны. Высокая проводимость в этом случае может быть связана с сульфидсодержащими метаморфизованными магматическими породами

офиолитовой ассоциации, а также с процессами графитизации метаосадков в зонах бластомилонитов. Осадки, накопившиеся в палеопротерозое в пределах желоба и континентального склона Сарматии, в процессе субдукции под ее активную окраину (Осницко-Микашевический вулcano-плутонический пояс [Минц и др., 2010]) испытали глубокий термодинамический метаморфизм и в больших объемах трансформировались в графитосодержащие бластомилониты. Тектоническое совмещение графитосодержащих метаосадочных и сульфидсодержащих магматических комплексов способствовало формированию интенсивных аномалий электропроводности. Для обоснования этой версии требуется продолжить интеграцию существующих результатов интерпретации для всех 10 широтных профилей массива SMOLENSK [Варенцов и др., 2021; 2024; Иванов и др., 2022; Куликов и др., 2023] и перейти к решению 3D-обратных задач на данной расширенной территории для сводного ансамбля данных импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика.

В заключение необходимо отметить, что при горизонтальном разрешении в 10 км и вертикальном (на коровых глубинах) в 3–6 км качество аппроксимации коровых проводящих структур размером первых десятков км в 3D-инверсии все еще лежит на грани удовлетворительности. Необходимы имитационные исследования, аналогичные проведенным двумерным [Иванов и др., 2022], характеризующие устойчивость и разрешающую способность применяемых методов 3D-инверсии при различной дискрети-

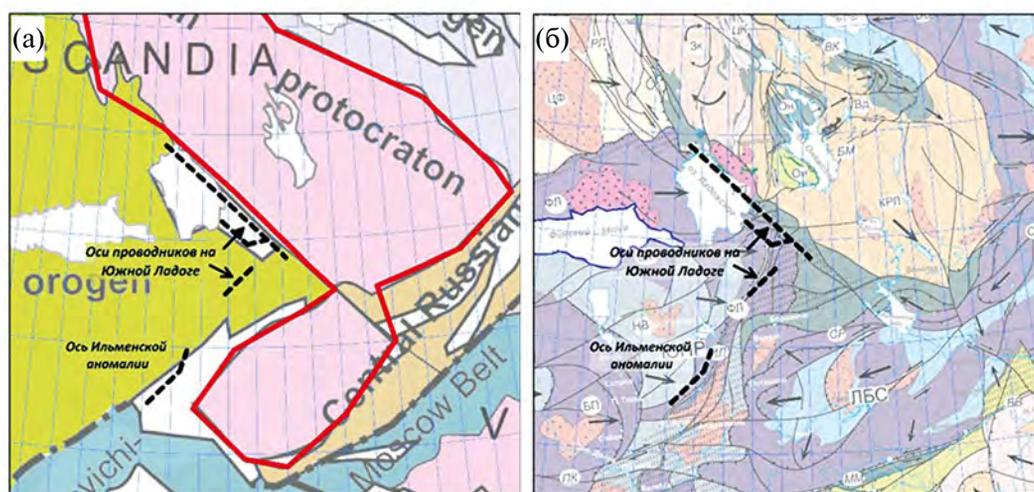


Рис. 13. Оси Ладожской и Ильменской коровых аномалий электропроводности на фоне тектонических карт докембрия: (а) — [Bogdanova et al., 2016]; (б) — [Минц и др., 2010; Колодяжный, 2018а].

зации и альтернативных априорных предположениях о структуре стартовой модели и погрешностях инвертируемых данных.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования по проекту SMOENSK были начаты в 2018–2020 гг. сотрудниками ЦГЭМИ ИФЗ РАН и Геологического факультета МГУ в рамках гранта РФФИ № 18-05-00733\_а и продолжены в 2022–2024 г. в рамках госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН № FMWU-2022-0023 и личной инициативы сотрудников Геологического факультета МГУ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны всем участникам рабочей группы SMOLENSK и признательны за поддержку геофизической компании “Северо-Запад”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Е.Д., Бобачев А.А., Епишкин Д.В. и др.* ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Том I / И.Н. Модин, А.Г. Яковлева (ред.). 2-е изд., перераб. и доп. Тверь: “ПолиПРЕСС”. 2018. 276 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
- Варенцов Ив.М., Иванов П.В., Ионичева А.П. и др.* Литрические проводящие структуры в земной коре Фенноскандии: 2D-инверсия МТ/МВ данных на профилях Остров — Осташков и Пушкинские горы — Андреаполь. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 50-й юбилейной сессии Межд. научн. семинара им. Д.Г. Успенского — В.Н. Страхова. М.: ИФЗ РАН. 2024. С. 105–109.
- Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П. и др.* Массив магнитотеллурических зондирований SMOLENSK: изучение глубинной структуры области тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы // Геофизика. 2021. № 1. С. 46–56.
- Иванов П.В., Варенцов Ив.М., Колодяжный С.Ю. и др.* Исследование глубинной электропроводности в окрестности Оршанской впадины: 2D-инверсия синтетических и наблюдаемых МТ данных методом REBOCC // Физика Земли. 2022. № 5. С. 26–44.  
<https://doi.org/10.31857/S0002333722050179>
- Иванов П.В., Пушкарев П.Ю.* Трехмерная инверсия рассчитанных на одиночном профиле магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2012. № 11–12. С. 91–96.
- Ионичева А.П.* Трехмерная геоэлектрическая модель Южного Приладожья по МТ данным. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ. 2022. 131 с.
- Колодяжный С.Ю.* Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Тектоника фундамента // Изв. ВУЗОВ, сер. Геология и разведка. 2018а. № 2. С. 5–13.  
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-2-5-13>
- Колодяжный С.Ю.* Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Строение кровли фундамента // Изв. ВУЗОВ, сер. Геология и разведка. 2018б. № 3. С. 5–14.  
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-3-5-14>
- Куликов В.А., Варенцов Ив.М., Иванов П.В. и др.* Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в районе Слободского геодинамического узла (Восточно-Европейская платформа) // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2023. Т. 60 (4). С. 5–21.  
<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-5-21>
- Куликов В.А., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю. и др.* Геоэлектрическая модель Южного Приладожья по результатам 3D-инверсии магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2022. Т. 68 (5). С. 45–59.  
<https://doi.org/10.31857/S0002333722050192>
- Куликов В.А., Ионичева А.П., Лубнина Н.В. и др.* Новые магнитотеллурические данные для зоны сочленения Фенноскандии и Сарматии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. Т. 1 (2). С. 3–11.  
<https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-2-3-10>
- Милиц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др.* 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.
- Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Логвинов И.М. и др.* Аномалии геомагнитных вариаций на северо-западе европейской части СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 101–106.
- Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G.* EUROPE| East European Craton. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Amsterdam. Elsevier, 2016. P. 1–18.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10020-x>
- Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C.* The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158(2). P. 457–469.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>
- Ivanov P.V., Pushkarev P.Y.* Possibilities of interpretation of the magnetotelluric data, obtained on a single profile over 3D resistivity structures // Izv. Phys. Solid Earth. 2010. V. 46 (9). P. 727–734.
- 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>
- Varentsov Iv.M.* Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior. V. 40 (2nd Edition) / Spichak V.V. (ed.). Amsterdam: Elsevier. 2015. P. 271–299.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00010-6>

## Three-Dimensional Model of the Ilmen Crustal Conductive Anomaly Based on Magnetotelluric Soundings

V. A. Kulikov<sup>a</sup>, Iv. M. Varentsov<sup>b</sup>, P. V. Ivanov<sup>b</sup>, A. P. Ionicheva<sup>b, \*</sup>, S. Yu. Kolodyazhny<sup>c</sup>,  
I. N. Lozovsky<sup>b</sup>, T. A. Rodina<sup>b</sup>, N. M. Shagarova<sup>a</sup>, and A. G. Yakovlev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>b</sup>*Geoelectromagnetic Research Center, Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth,  
Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 108840 Russia*

<sup>c</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

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

Received June 7, 2024; revised July 21, 2024; accepted August 9, 2024

**Abstract** — Since 2020, magnetotelluric/magnetovariational (MT/MV) soundings have been conducted in the triple-junction area of major segments (Fennoscandia, Sarmatia and Volga–Uralia) of the East European Platform. The study area extends to the north the SMOLENSK sounding array with inclusion of new observations from summer, 2023. Thus, the SMOLENSK array approaches from the south to the LADOGA sounding array. This article presents the results of MT/MV data invariant analysis, describes the selection of data ensembles for three-dimensional (3D) inversion, and analyzes the resulting 3D resistivity model.

**Keywords:** magnetotelluric soundings, crustal conductive anomalies, inversion