

Научные статьи

УДК 550.837.211

DOI: 10.31431/1816-5524-2023-4-60-5-21

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНЕ СЛОБОДСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО УЗЛА (ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА)

© 2023 В.А. Куликов¹, Ив.М. Варенцов², П.В. Иванов², А.П. Ионичева²,
С.Ю. Колодяжный³, А.В. Королькова¹, И.Н. Лозовский², Т.А. Родина², А.Г. Яковлев¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, 119991;
e-mail: vic@nw-geophysics.ru

²Центр геоэлектромагнитных исследований ИФЗ РАН, Москва, Троицк, Россия, 108840;
e-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com

³Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017

Поступила в редакцию 21.05.2023 г.; после доработки 14.08.2023 г.; принята в печать 25.12.2023 г.

Слободской тектоно-геодинамический узел рассматривается в качестве области схождения крупнейших сегментов, авлакогенов, разломов и сутурных зон Восточно-Европейской платформы. В 2020–2022 гг. в данном районе сотрудниками Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН были выполнены магнитотеллурические зондирования вдоль профилей Пушкинские Горы – Андреаполь (РА), Себеж – Великие Луки – Ржев (SVR) и Остров – Осташков (ОО). Качественный анализ полученных данных позволил оценить размерность изучаемой среды, суммарную продольную проводимость осадочного чехла и основные направления простирающихся структур. По итогам количественной интерпретации, выполненной в классе 1D, 2D и 3D моделей, были получены двухъярусные геоэлектрические модели с проводящим осадочным чехлом и высокоомным основанием. В диапазоне глубин 10–40 км выделены трансоровые зоны повышенной электропроводности, интерпретируемые в качестве юго-западного продолжения Ильменско-Ладожской аномалии. Природа выявленных аномалий электропроводности связывается с глубоким погружением сильно тектонизированных и метаморфизованных осадочных пород, первоначально насыщенных органическим и карбонатным веществом.

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

ВВЕДЕНИЕ

В работах (Гарецкий, Каратаев, 2009, 2011, 2014, 2019; Гарецкий, Леонов, 2018) Слободской тектоно-геодинамический узел рассматривается в качестве области тройного сочленения и коллизионного взаимодействия трех главных сегментов раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) — Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. В пределах этой области отмечается схождение полосовых аномалий потенциальных полей

(гравитационного и магнитного), систем мезо-неопротерозойских авлакогенов, крупнейших разломов и сутурных зон ВЕП. Центр рассматриваемого узла расположен в пределах одноименной возвышенности в районе городов Витебска и Смоленска, внешние ограничения этой узловых структуры в настоящее время еще не установлены и, вероятно, охватывают обширные территории (рис. 1).

Магнитотеллурические (МТ) исследования в районе Слободского геодинамического узла расширили на север массив МТ зондирований

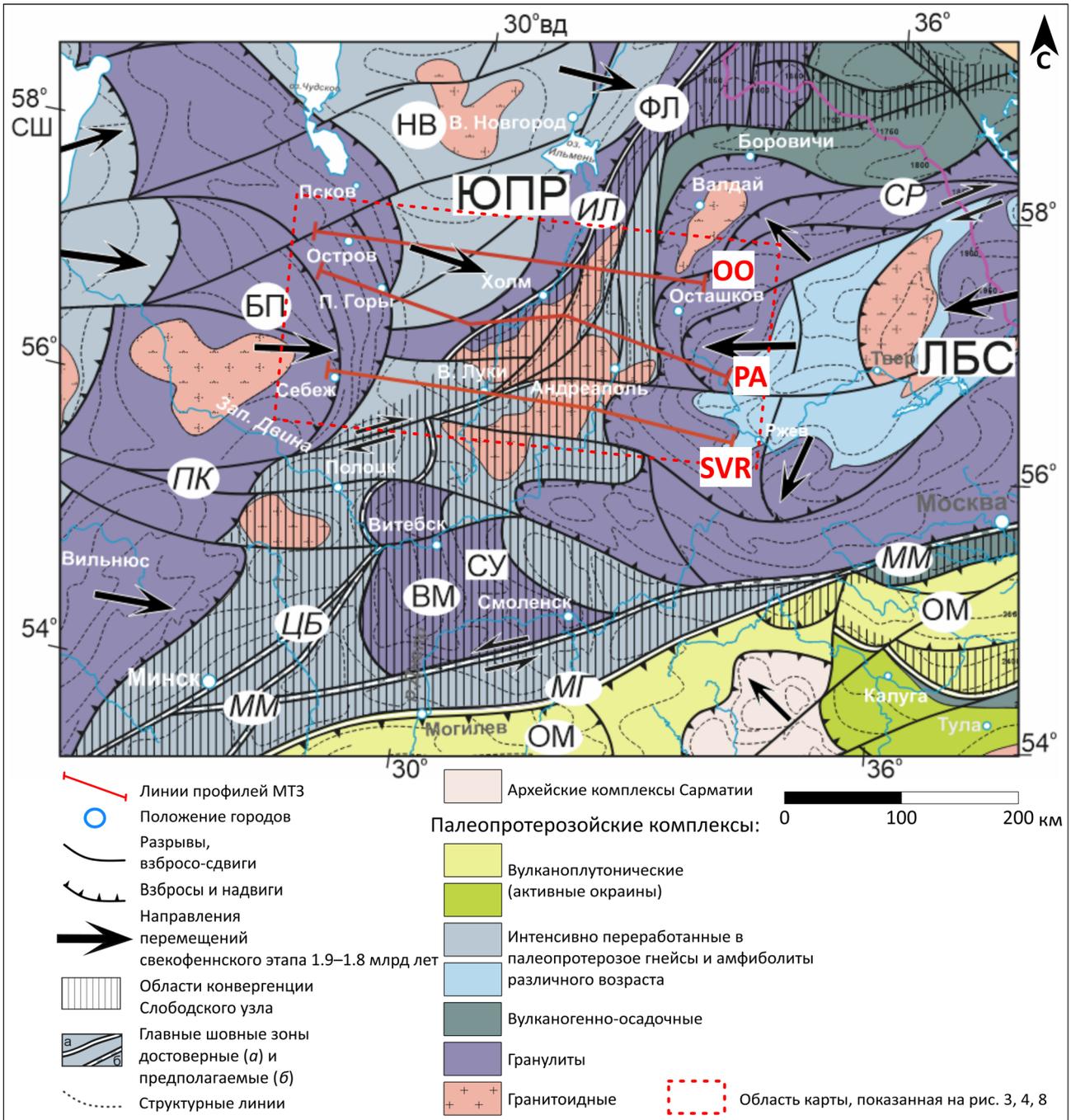


Рис. 1. Структурная схема фундамента района Слободского узла (с изменениями по (Колодяжный, 2018а; Минц и др., 2010)) и положение профилей МТЗ. ЮПР — Южно-Прибалтийский пояс, БП — Белорусско-Прибалтийский пояс, ВМ — Витебский массив, НВ — Новгородский пояс, ФЛ — Южно-Финско-Ладожский пояс, СУ — центр Слободского узла, ЛБС — Лапландско-Беломорско-Среднерусский пояс, СР — Среднерусский пояс, ОМ — Осницко-Микашевический пояс. Зоны разломов: ММ — Минско-Московская, МГ — Могилевская, ПК — Полоцко-Курземская. Шовные зоны: ЦБ — Центрально-Белорусская, ИЛ — Ильменско-Ладожская.

Fig. 1. Structural diagram of the basement of the Sloboda intersection area (modified from Kolodyazhny, 2018a and Mints et al., 2010) and the position of the MT profiles. SBB (ЮПР) — South Baltic belt, BBB (БП) — Belarusian-Baltic belt, VM (ВМ) — Vitebsk massif, NB (НВ) — Novgorod belt, SFL — South Finnish-Ladoga belt, SI (СУ) — center of Sloboda intersection, LWCR(ЛБС) — Lapland-White Sea-Central Russian belt, CR (СР) — Middle Russian belt, OM — Osnitsko-Mikashevichsky belt. Faults zones: MM — Minsk-Moscow, MG (МГ) — Mogilev, PK — Polotsk-Kurzemska. Suture zones: CB (ЦБ) — Central Belorussian, IL (ИЛ) — Ilmenk-Ladoga.

SMOLENSK (Варенцов и др., 2021; Иванов и др., 2022). С 2020 г. объединенным отрядом Геологического факультета МГУ и Лаборатории МТ исследований Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН) были выполнены синхронные магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) измерения на трех профилях: Себеж – Великие Луки – Ржев (SVR), Пушкинские Горы – Андреаполь (РА) и Остров – Осташков (ОО) (рис. 1), которые пересекали северную часть Слободского узла, а также Центрально-Белорусскую шовную зону — предполагаемую границу Фенноскандии и Сарматии (Гарецкий и др., 2006; Гарецкий, Каратаев, 2009, 2011).

Основной целью исследований стало выявление коровых проводящих аномалий, приуроченных к докембрийским шовным зонам центральной части ВЕП, поиск признаков современной активизации, а также уточнение региональных трендов в распределении суммарной продольной проводимости осадочных бассейнов.

Самые первые материалы исследований вдоль профиля SVR в сопоставлении с результатами, полученными на более южных профилях массива SMOLENSK, представлены в работах (Варенцов и др., 2021; Куликов и др., 2021).

ТЕКТОНИКА СЛОБОДСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО УЗЛА

Слободской тектоно-геодинамический узел соответствует локальной области тройного сочленения крупных структур ВЕП в обширном поясе коллизионного взаимодействия Сарматии и Фенноскандии (Колодяжный, 2018а). Волго-Уральский коровый сегмент (Минц и др., 2010; Bogdanova, 1993) выклинивается в ~500 км восточнее центра Слободского узла и не участвует в его строении. В качестве элементов тройного сочленения выступают мегадомен Сарматии и два структурно обособленных коллизионно-орогенных пояса — Лапландско-Беломорско-Среднерусский (ЛБС) и Южно-Прибалтийский (ЮПР), развитые вдоль окраины Фенноскандии (Минц, 2011; Минц и др., 2010) (рис. 1). В области Слободского узла эти пояса образуют дугообразные мегаструктуры, направленные выпуклой стороной навстречу друг другу. Западная дуга подчеркивается широкой полосой сложно сгруппированных магнитных и гравитационных аномалий, соответствующих Белорусско-Прибалтийскому поясу гранулитов в составе ЮПР пояса. Восточная дуга, вероятно, представляет собой фронтальную часть крупной горизонтальной протрузии западного фланга ЛБС пояса (Колодяжный, 2018а). Она также хорошо выра-

жена в конфигурации аномального магнитного ΔT_a и гравитационного полей.

Между этими структурными дугами располагается обширная область, имеющая в плане форму неправильного треугольника, соответствующая в нашем понимании области Слободского узла — зоне конвергенции трех крупных коровых тектонических элементов ВЕП (рис. 1). В южном расширенном растре этой области располагается Витебский гранулитовый массив (ВМ), также треугольной формы, и примерно здесь же намечен центр Слободского узла (по (Гарецкий, Каратаев, 2009, 2011)) (рис. 1). Некоторые исследователи предполагают, что гранулиты и гранитоиды ВМ представляют собой нижнекоровый фрагмент палеопротерозойского Осницко-Микашевичского вулканоплутонического пояса (Bogdanova et al., 2015). Но вопрос о тектонической позиции ВМ остается открытым. С северо-запада Витебский массив окаймлен гнейсо-сланцевой толщей в пределах Околковского террейна (Bogdanova et al., 2015), входящей в состав Центрально-Белорусской сутурной зоны и включающей реликтовые фрагменты Белорусской океанической плиты (Гарецкий, Каратаев, 2014).

Основание структурного треугольника Слободского узла, включающего в себя Витебский массив, контролируется Минско-Московским (Минско-Московский и Могилевский разломы) субширотным поясом разломов, образующих зону сочленения Фенноскандии и Сарматии (Минц и др., 2010) (рис. 1). Вдоль северной окраины Сарматии южнее этого пояса нарушений развит Осницко-Микашевичский (ОМ) вулканоплутонический пояс (активная континентальная окраина андийского типа), формирование которого было связано с длительной (2.0–1.9 млрд лет) субдукцией Белорусской океанической плиты в юго-восточном направлении под Сарматию (Аксаментова, 2002; Астапенко, 2012; Гарецкий и др., 2006; Гарецкий, Каратаев, 2011, 2014; Минц и др., 2010; Bogdanova et al., 2015).

Таким образом, Слободская узловая структура с трех сторон обрамляется конвергентными системами складчато-надвиговых структур и сутурных зон, сформировавшимися в конце палеопротерозоя в процессе коллизии и надвигания тектонических пластин к центру области тройного сочленения крупных геоструктур ВЕП (рис. 1). С северо-запада от узла расположены складчато-надвиговые структуры Центрально-Белорусской шовной зоны и Южно-Прибалтийского гранулитогнейсового пояса, с востока и северо-востока — надвиги, ограничивающие Лапландско-Беломорско-Среднерусский палеороген (Колодяжный, 2018а; Минц, 2011; Минц и др., 2010) или Волго-Уралию (Гарецкий,

Каратаев, 2009, 2019), а с юга — сдвиги и надвиги, окаймляющие Сарматию.

Главные системы мезо-неопротерозойских авлакогенов, грабенов и прогибов развиты вдоль палеопротерозойских коллизионных поясов и шовных зон, разделяющих крупнейшие сегменты фундамента ВЕП и, так же, как и они, ориентированы радиально и сочленяются в центре ВЕП. С северо-востока к области Слободского узла подходит Среднерусский авлакоген, переходящий в Валдайскую грабен-синклиналь, расположенную над структурами раннедокембрийского фундамента северной части Слободского узла (структурного треугольника). В пределах Валдайской депрессии кристаллические комплексы фундамента залегают на глубинах 1.5–2.5 км. Южнее над центральной и южной частью тектонического узла располагается Оршанская впадина, глубина которой достигает 1.8 км. С востока узловую область оперяют Тверской, Гжатский и Московский грабены, с юго-востока — разрывные нарушения, развитые на продолжении Пачелмского (Рязано-Саратовского) авлакогена, а с запада — субширотные разломы Полоцко-Курземского пояса. Отмеченные структуры сформировались в результате активизации палеопротерозойских коллизионных нарушений (Гарецкий, Каратаев, 2009; Колодяжный, 2018б; Нагорный, 2009; Чамов, 2016).

Осадочные породы, слагающие авлакогены и залегающие выше осадки чехла ВЕП, характеризуются высокой пористостью, тектонической дезинтеграцией и флюидонасыщенностью высокоминерализованными водами, что существенно повышает их электропроводность (Объяснительная..., 1999; Астапенко, 2012).

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА РАБОТ

При проведении работ использовались магнитотеллурические станции «МЭРИ-ПРО», разработанные в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва). Пятикомпонентная съемка электромагнитного (ЭМ) поля проводилась с использованием приемных линий длиной 80 м, заземленных графитовыми электродами, и индукционных датчиков IMS-010 производства ООО «Вега» (г. Санкт-Петербург), ориентированных на магнитные север, восток и вертикально. Средняя длительность записи на одной точке МТ зондирования составила 20 часов. Синхронная регистрация МТ поля проводилась на территории учебно-научной базы Александровка (Калужская область), находящейся в ~300 км от места работ, что дало возможность использовать обработку по технологии Remote Reference (Gamble et al., 1979) для борьбы с локальными ЭМ помехами.

Расстояние между точками МТЗ на профилях SVR, PA и OO составило ~10 км и увеличивалось до 15–17 км на отдельных участках с низкой транспортной доступностью.

В процессе обработки, выполненной в программе EPI-KIT (ООО «Северо-Запад», г. Москва), были получены оценки передаточных операторов импеданса и типпера в диапазоне периодов 0.001–5000 с. В районе исследований отсутствуют региональные электрифицированные железные дороги, которые являются наиболее интенсивным источником помех для метода МТЗ, что позволило получить данные высокого качества. На профиле SVR также выполнено оценивание горизонтальных магнитных откликов в разработанной в ЦГЭМИ ИФЗ РАН системе PRC_MTMV (Varentsov, 2015b; Варенцов и др., 2021).

АНАЛИЗ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Задачей первого этапа интерпретации МТ-данных является оценка степени геоэлектрической неоднородности среды, на основе которой определяется выбор методики решения обратной задачи. Для этого существуют различные инструменты, среди которых: качественный анализ амплитудных и фазовых компонент тензора импеданса, представленных в виде кривых от периода, псевдоразрезов, карт или полярных диаграмм; определение главных значений и главных направлений операторов импеданса, его фазового тензора и типпера, а также расчет различных параметров неоднородности и асимметрии среды (Бердичевский, Дмитриев, 2009).

В западной части профиля OO (рис. 2а, МТЗ № 08-13) меридиональные кривые кажущегося сопротивления (ρ_{xy}) на низких частотах характеризуются наличием крутой восходящей ветви, а на широтных кривых кажущегося сопротивления (ρ_{yx}) наблюдаем асимптотику, формально отражающую наличие проводника на глубинах 20–25 км. Суммарная продольная проводимость осадочного чехла (S_{oc}) на данном участке профиля изменяется слабо в пределах 200–230 См.

Центральная часть профиля OO представлена наиболее аномальными кривыми кажущегося сопротивления (рис. 2б, точки МТЗ № 22–25). На меридиональных кривых на точках МТЗ № 22 и 24 фактически отсутствует низкочастотная восходящая ветвь. Оцененная по асимптоте S_{oc} на точке МТЗ № 23 составляет ~4000 См. Мы предполагаем, что на данном участке профиля на форму кривых кажущегося сопротивления оказывают влияние два фактора.

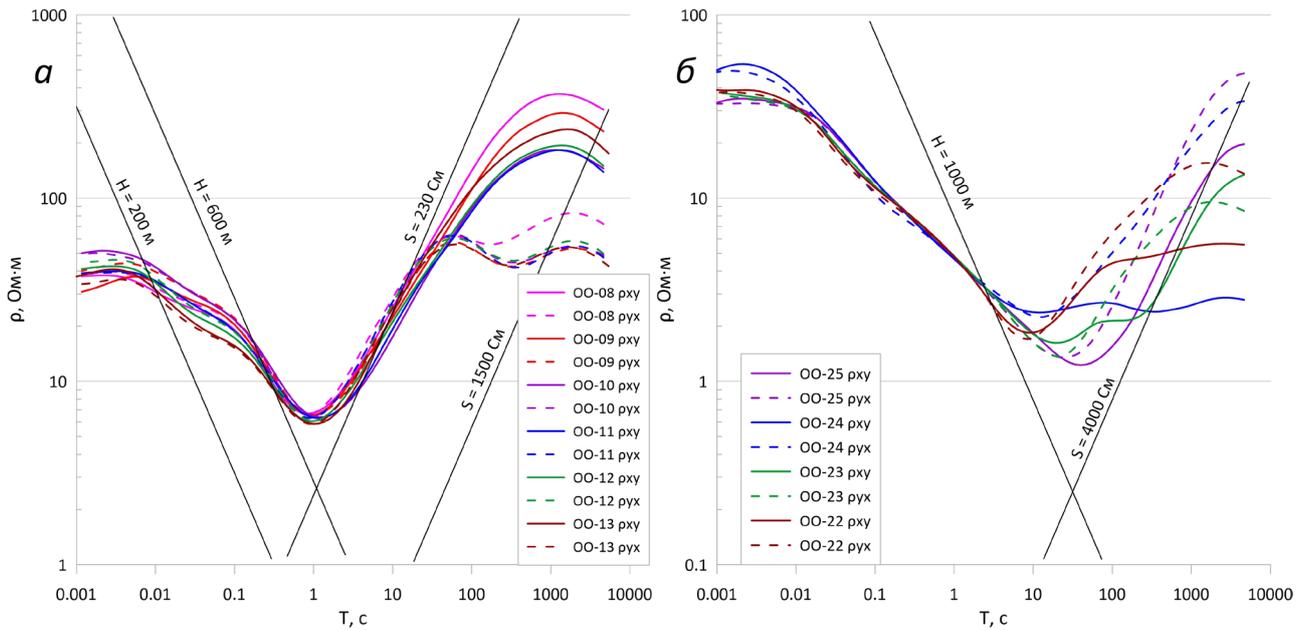


Рис. 2. Кривые ρ_T № OO-08 — OO-13 (а), № OO-22 — OO-25 (б). ρ_{xy} — меридиональные (сплошные линии), ρ_{yx} — широтные (пунктирные).

Fig. 2. Apparent resistivity curves № OO-08 — OO-13 (а), № OO-22 — OO-25 (б). ρ_{xy} — meridional (solid lines), ρ_{yx} — latitudinal (dashed lines).

С одной стороны, здесь фиксируются максимальные мощности и проводимости осадков, а, с другой стороны — минимальные глубины до коровых аномалий электропроводности.

Структуру карт кажущегося сопротивления формирует аномалия низких значений в центральной части площади (рис. 3а), которая связана с влиянием мощной толщи проводящих осадков, заполняющих Валдайский авлакоген.

Анализируя карту, построенную по разнице логарифмов значений между меридиональными (ρ_{xy}) и широтными (ρ_{yx}) компонентами кажущегося сопротивления (рис. 3б), можно отметить, что вся восточная часть площади работ характеризуется отрицательными значениями, а на западных участках профилей (особенно РА и ОО) — положительными. Подобное соотношение между меридиональными и широтными кривыми (как амплитудными, так и фазовыми) сохраняется в широком диапазоне низких частот.

На карту разницы $\lg \rho_{xy} - \lg \rho_{yx}$ для периода 1000с нанесены направления минимальных значений кажущегося сопротивления (рис. 3б). Данные направления были получены путем последовательного поворота кривых с шагом 5°. Длина и толщина линий пропорциональна отношению ρ_{\max}/ρ_{\min} . В пределах западной аномалии положительных значений ($\lg \rho_{xy} - \lg \rho_{yx}$) преобладающее направление проводника близко к широтному. Максимальные значения ρ_{\max}/ρ_{\min} зафиксированы на точках МТЗ № 09–15 профиля РА и на точках МТЗ № 04–15 профиля ОО (рис. 3б).

По поведению индукционных векторов на разных периодах наблюдается любопытный эффект. На больших периодах (>100 с) поведение векторов определяется преимущественно влиянием мощного осадочного бассейна Валдайского грабена (рис. 4). Смена ЮЗ направлений векторов, характерных для западной части планшета, на ЮВ румбы происходит точно по оси, отвечающей максимальному значению S_{oc} (МТЗ № 24 на профиле ОО; МТЗ № 23-24 на профиле РА, МТЗ № 7 на профиле SVR).

Увидеть проявление коровых неоднородностей на векторах индукции можно на меньших периодах ($T = 20-50$ с) и на больших расстояниях от центра грабена, где еще не сказывается влияние аномалии S_{oc} (рис. 4). Данные периоды, например, в западной части профилей РА и ОО, отвечают центральной части восходящей ветви, характеризующей сопротивление коровых глубин. По поведению векторов на периоде 25 с можно предположить преимущественно широтное направление течения токов в СЗ части площади (рис. 4).

Фазовый тензор импеданса (Caldwell et al., 2004) позволяет выделить региональные 2D структуры на фоне локальных 3D неоднородностей, снимая влияние частотно-независимых гальванических искажений (рис. 5). Анализ фазового тензора на исследуемых профилях показывает, что до периодов 10–50 с геоэлектрические разрезы характеризуются одномерностью, за исключением отдельных точек, вероятно,

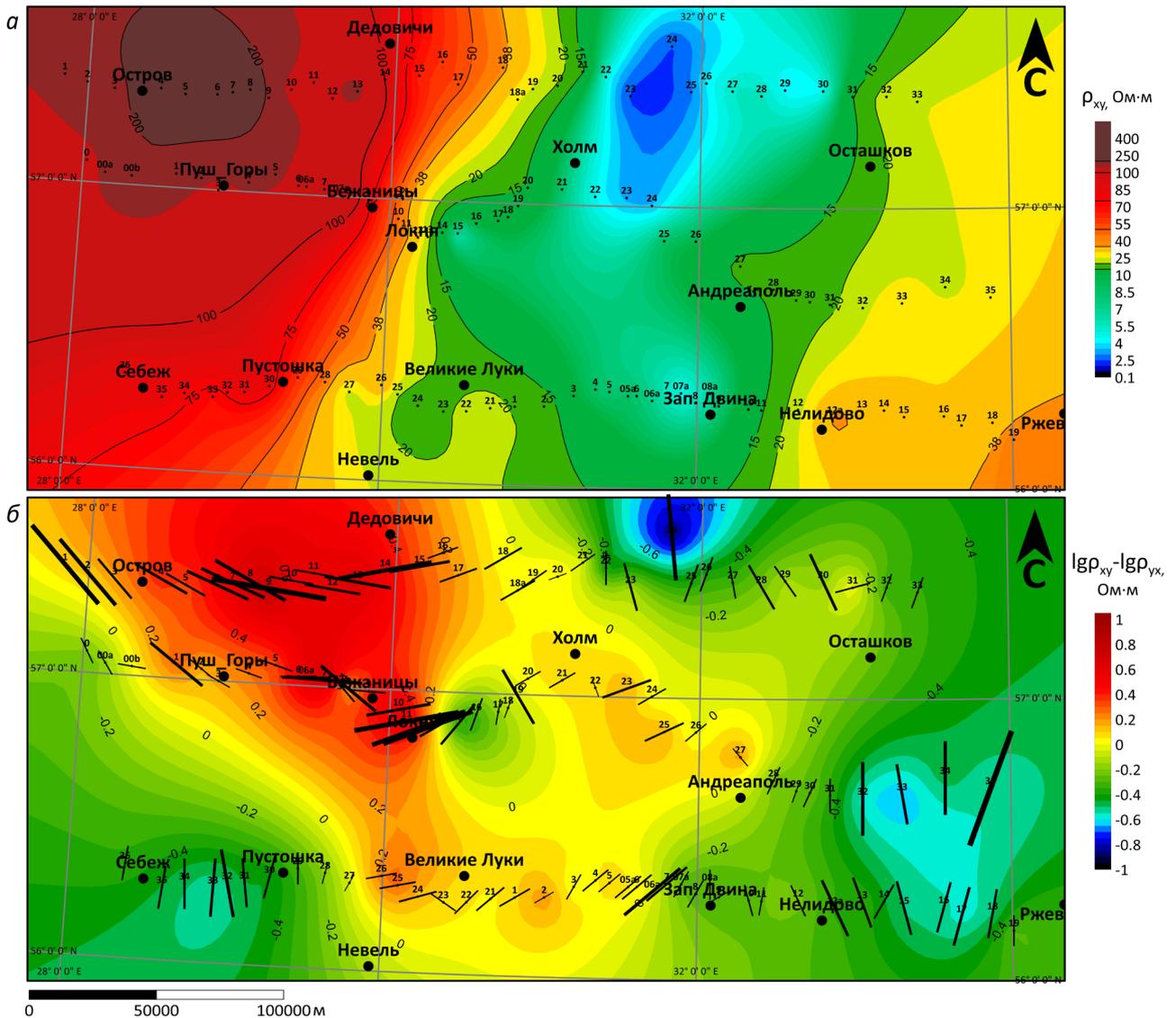


Рис. 3. Карта ρ_{xy} на периоде 250 с (а); карта разности логарифмов ρ_{xy} и ρ_{yx} на периоде 1000 с (б) для области, показанной на рис. 1, с нанесенными на нее направлениями минимальных значений кажущегося сопротивления. Длина и толщина линий пропорциональна отношению ρ_{max}/ρ_{min} .

Fig. 3. Map of ρ_{xy} at a period of 250 s (a); map of the differences between the logarithms ρ_{xy} and ρ_{yx} at a period of 1000 s (b) for the region shown in Fig. 1, with the directions of the minimum values of apparent resistivity. The length and thickness of the lines are proportional to the ratio ρ_{max}/ρ_{min} .

подверженных влиянию трехмерных локальных неоднородностей. На периодах больше 50 с можно выделить участки (рис. 5), где устойчиво определяются направления главных значений фазового тензора. На восточных участках профилей, главное направление, отвечающее минимальным значениям импеданса, — северное или северо-восточное ($\leq 45^\circ$). В центральной части профилей азимут главных направлений близок к широтному ($50\text{--}75^\circ$). На западных флангах профилей PA и OO главное направление фазового тензора — северо-западное (315°).

Учитывая все результаты анализа МТ-данных, можно сделать следующие выводы:

Верхняя часть разреза, отвечающая осадочному чехлу, укладывается в модель горизонтально-слоистой среды, что позволяет выполнять интерпретацию в рамках 1D моделей. На периодах более 10–50 с проявляются две аномалии проводимости субмеридионального направления. Восточная аномалия, по нашему мнению, связана с увеличением мощности осадков в осевой зоне Валдайского грабена. Западная аномалия, вероятно, имеет коровую природу. Разные оценки тензора импеданса показывают, что направление максимальной проводимости в границах двух этих аномалий составляет $50\text{--}70^\circ$ СВ. Однако, ярко выраженная двухмерность среды

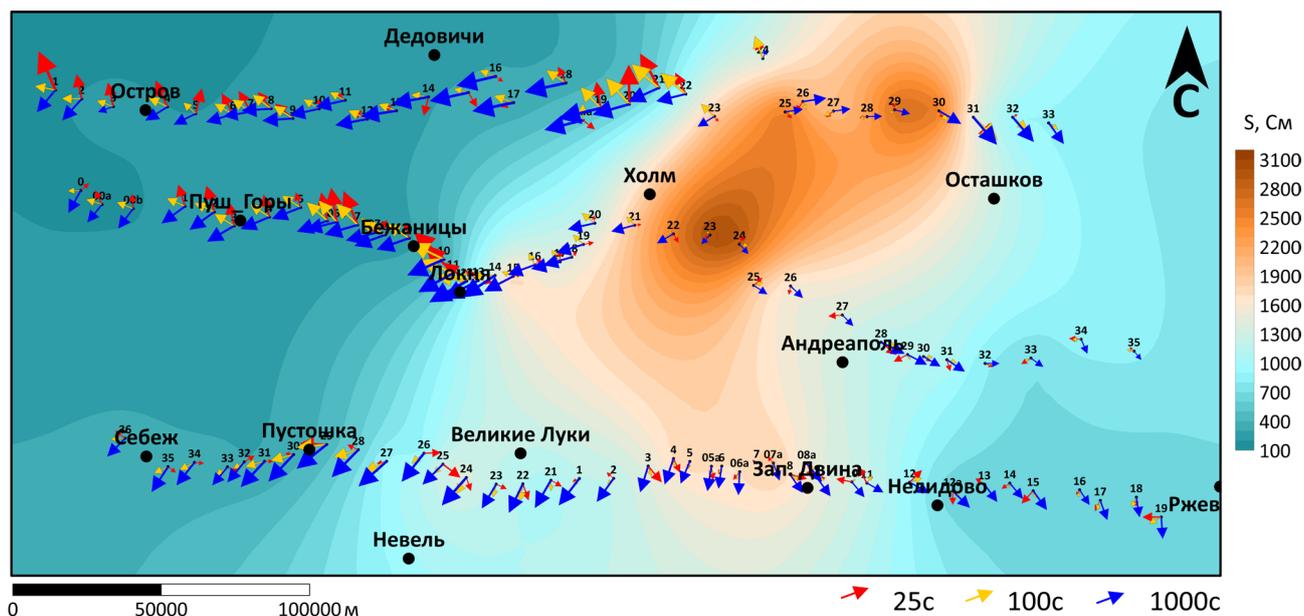


Рис. 4. Карта индукционных векторов ReW на периодах 25, 100, 1000 с на фоне карты S_{oc} для области, показанной на рис. 1.

Fig. 4. Map of ReW induction vectors at periods of 25, 100, 1000 s against the background of the S_{sed} map for the area shown in Fig. 1.

проявляется только на этих двух участках профилей, а на остальных участках глубинная геоэлектрическая модель имеет трехмерный характер.

Индукционные векторы на профиле SVR преимущественно имеют южное направление, что обусловлено влиянием более проводящей части осадочного чехла Валдайского грабена, расположенного севернее линии профиля. На профилях РА и ОО региональный фон в поведении типперов отсутствует, и более ярко проявляется субмеридиональная проводящая структура в районе точек МТЗ № РА-21 — РА-25 и № ОО-22 — ОО-27.

Стратегия интерпретации данных на рассматриваемых профилях начинается с 1D инверсии для верхних горизонтов осадочного чехла и заканчивается 3D инверсией для определения региональной структуры осадков и прослеживания коровых проводящих аномалий. Между этими этапами важную роль играют средства совместной 2D инверсии МТ/МВ данных, которые позволяют учесть влияние меридиональных токовых систем в пределах осадочных бассейнов и авлакогенов, выходящих за границы области 3D инверсии.

РЕЗУЛЬТАТЫ 1D И 2D ИНВЕРСИЙ

Решение задач 1D инверсии выполнено в программе Inversio (ООО «Северо-Запад»), двумерных — в программе ZONDMT2D (<http://zond-geo.com>, Куликов и др., 2017). Сложность интерпретации МТ данных в исследуемой

области связана с высокими значениями суммарной продольной проводимости осадочного чехла (рис. 4). Экранирование проводящими осадками снижает чувствительность МТ поля к геоэлектрическим параметрам земной коры: неоднозначность интерпретации возрастает, и расширяется область эквивалентных моделей удельного электрического сопротивления (УЭС), удовлетворяющих исходным данным.

Для поиска оптимального подхода к проведению 2D инверсии в условиях больших значений S_{oc} было выполнено, по аналогии с работой (Иванов и др., 2022; Varentsov, 2015a), имитационное моделирование МТ/МВ данных для геоэлектрических структур, включающих как неоднородности осадочного чехла, связанные с увеличением мощности осадков в осевой части Валдайского грабена, так и неоднородности консолидированной коры (рис. 6). Мощность осадочного чехла задавалась на основании карты кровли фундамента (Колодяжный, 2018б). Сопротивление осадков для стартовой модели рассчитывалось исходя из оценок, полученных по асимптотам кривых эффективного кажущегося сопротивления.

Полученные синтетические данные инвертировались с использованием различных начальных моделей (от нормального разреза (НР) до реалистичных моделей осадков, отвечающих известным оценкам суммарной продольной проводимости (рис. 6а)). Нормальный разрез был задан следующим образом: для интервала глубин 0–0.9 км удельное сопротивление составило 4 Ом·м;

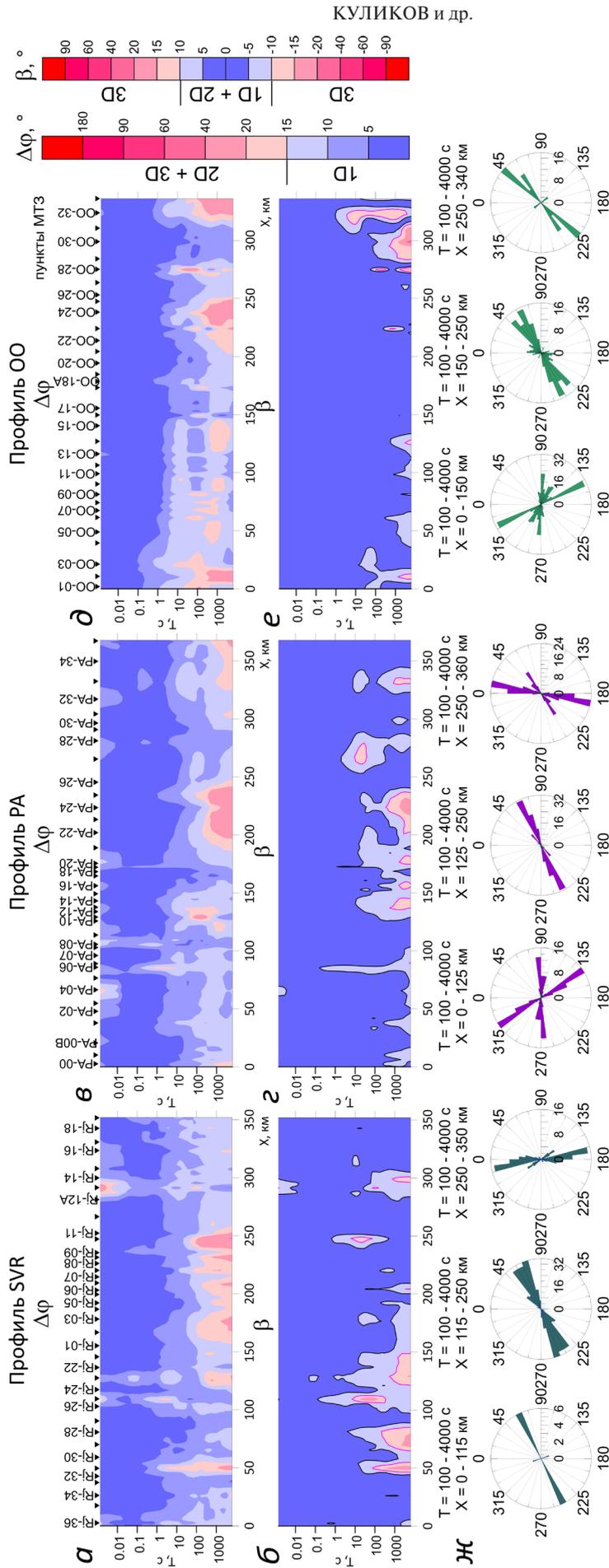


Рис. 5. Псевдоразрезы инвариантных параметров неоднородности $\Delta\varphi$ (*a, b, d*) и асимметрии β (*b, z, e*) фазового тензора импеданса для профилей SVR, PA и OO с диаграммами направлений его экстремальных фаз, отвечающих минимальным сопротивлениям (ϵ); профильные координаты X — в км вдоль линий профилей, показанных на рис. 1.

Fig. 5. Pseudo-sections of invariant parameters of inhomogeneity $\Delta\varphi$ (*a, b, d*) and asymmetry β (*b, z, e*) of the phase impedance tensor for SVR, PA and OO profiles with diagrams of directions of its extreme phases corresponding to the minimum resistivity (ϵ); profile coordinates X — in km along the profile lines shown in Fig. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

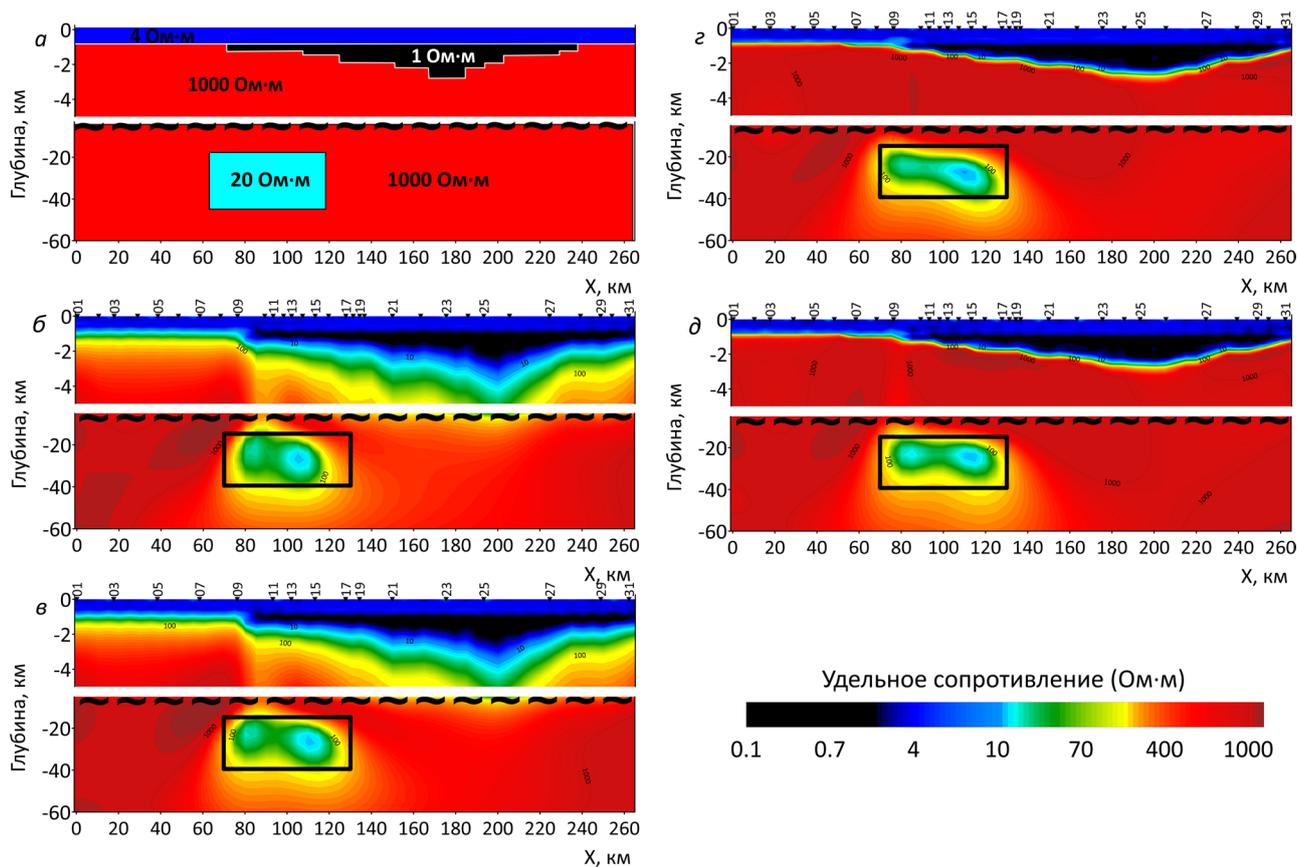


Рис. 6. Имитационная модель (*a*, сопротивления, Ом·м, lg-масштаб) и результаты инверсии синтетических данных с использованием алгоритма ZondMT2D: в рамках совместной бимодальной (*б*, *в*) и последовательной двухэтапной (*г*, *д*) инверсий данных импеданса и типпера от стартовых моделей НР (*б*, *г*) и НР+осадки (*в*, *д*); профильные координаты *X* — в км.

Fig. 6. Simulation model (*a*, resistivity, Ohm·m, lg-scale) and results of synthetic data inversion using the ZondMT2D algorithm: joint bimodal (*b*, *c*) and sequential two-stage (*e*, *d*) inversions of impedance and tipper data from the initial normal section models (*b*, *g*) and normal section + sediments (*e*, *d*); profile coordinates *X* — in km.

0.9–100 км — 1000 Ом·м; 100–200 км — 400 Ом·м; 200–325 км — 100 Ом·м; 325–360 км — 60 Ом·м; глубже — 30 Ом·м. Оценивалась точность восстановления истинных моделей с использованием разного набора МТ параметров. Применялись одноэтапные и многоэтапные инверсии.

Моделирование с использованием программы ZONDMT2D (рис. 6) показало, что наиболее близкий результат к истинной модели дает стратегия решения обратной задачи с последовательным увеличением числа инвертируемых компонент (Иванов и др., 2022), начиная с данных для Е-поляризации поля (рис. 6в, 6д). Также было установлено, что задание в стартовых моделях инверсии реалистичных представлений о структурах осадочного чехла не затрудняет сходимость итераций инверсии при определении коровых аномалий электропроводности (рис. 6д), а отсутствие этих сведений в стартовой модели приводит к завышению мощности осадков (рис. 6в).

Учитывая отсутствие выраженной двухмерности структур на профилях РА и ОО, при

проведении бимодальной инверсии мы использовали оригинальные данные, где в качестве продольных выступали меридиональные кривые, а в качестве поперечных — широтные. С учетом магнитного склонения это азимуты 10° СВ и 100° ЮВ, соответственно.

При проведении инверсии использовалась следующая сетка: размер первой вертикальной ячейки — 50 м, общая глубина модели 103 км; размер горизонтальной ячейки — 1/3 расстояния между точками МТЗ, т.е. ~3 км.

Результаты 1D и 2D инверсий для профилей РА и ОО в виде глубинных моделей УЭС показаны в двух вертикальных масштабах: в диапазоне глубин 0–6 км (рис. 7а, 7в) соотношение горизонтального/вертикального масштаба составляет 1/10, в диапазоне глубин 6–100 км (рис. 7б, 7г) — 1/1. Абсолютные невязки компонент данных (Иванов и др., 2022; Varentsov, 2015a) по результатам 2D инверсии для профиля РА составили: lgRho_TE — 0.075; Ph_TE — 3.10°; ReW — 0.049; ImW — 0.059; lgRho_TM — 0.146; Ph_TM — 4.92°; для профиля ОО — lgRho_TE — 0.091;

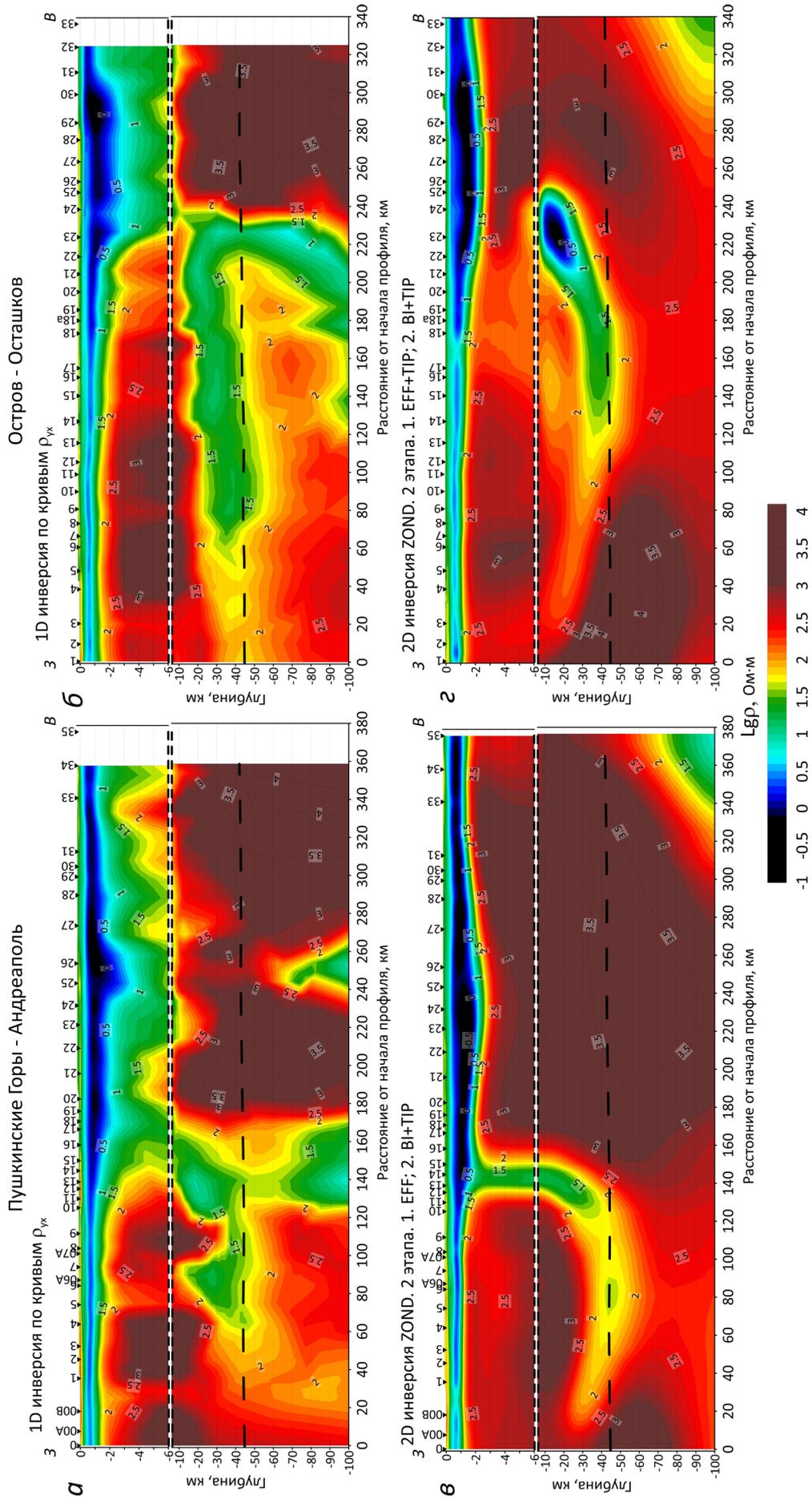


Рис. 7. Модели УЭС по профилям РА (а, б) и ОО (в, г) на основе 1D (а, б) и 2D (в, г) инверсий. Пунктирной линией показано положение границы Mohorovičićа по данным (Laske et al., 2013).

Fig. 7. Resistivity models for RA (a, б) and OO (в, г) profiles based on 1D (a, б) and 2D (в, г) inversions. The dashed line shows the position of the Mohorovičić boundary according to the data of (Laske et al., 2013).

$Ph_{TE} = 5.03^\circ$; $ReW = 0.089$; $ImW = 0.090$; $IgRho_{TM} = 0.129$; $Ph_{TM} = 4.63^\circ$.

По итогам интерпретации получена двухъярусная геоэлектрическая модель с проводящим осадочным чехлом ($УЭС = 1-3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), мощность которого принимает максимальные значения в центре Валдайского грабена, и высокоомным основанием земной коры.

Одним из наиболее устойчивых и значимых результатов проведенных инверсий является выделение корового проводящего слоя в западной части профилей РА и ОО. Проводник листрической формы выявляется в диапазоне глубин от 10 до 40 км, а его восточный край имеет практически вертикальный наклон и прослеживается в верхней коре вплоть до подошвы осадочного чехла (рис. 7). Эта аномалия коровой электропроводности, вероятно, является южным продолжением Ильменской аномалии, выявленной по результатам ранних одиночных МВ зондирований (Астапенко, 2008; Рокитянский и др., 1982).

РЕЗУЛЬТАТЫ 3D ИНВЕРСИИ

На заключительном этапе количественной интерпретации были получены первые результаты 3D инверсии данных импеданса и типпера по программе ModEM (Kelbert et al., 2014). Большим плюсом программы ModEM является ее реализация в рамках технологии MPI (Message Passing Interface), обеспечивающая быстрое (независимое и параллельное) решение прямых задач для всей серии периодов.

Так же, как и в случае 2D интерпретации, 3D инверсия выполнялась от стартовой модели, включающей априорную структуру осадочного чехла в окрестности рассматриваемых профилей зондирования.

При проведении 3D инверсии использовалась следующая сетка: до глубины 3 км размер вертикальной ячейки не менялся и составлял 200 м, начиная с глубины 3 км размер вертикальной ячейки увеличивался с коэффициентом 1.2, размер горизонтальной ячейки — 10×10 км.

Сеть зондирований на профилях SVR, РА и ОО (3 самых северных из 9 профилей массива SMOLENSK) явно недостаточна для получения представительной 3D модели УЭС, поэтому полученный результат представляется важным, но весьма предварительным. Он будет уточняться по мере детализации модельной дискретизации, вовлечения в инверсию всех имеющихся данных массива SMOLENSK, в т. ч. оценок горизонтальных магнитных откликов (Варенцов и др., 2021), и данных части зондирований примыкающего с юго-востока массива KIROVOGRAD (Варенцов и др., 2013), а также учета априорных геоэлектри-

ческих представлений в более широкой периферии области задания ансамбля инвертируемых данных.

Результаты 3D инверсии представлены в виде карт-срезов десятичного логарифма удельного сопротивления на двух уровнях глубин — 2 км и 30 км (рис. 8).

На глубине 2 км (рис. 8а) яркой линейной зоной низких значений УЭС северо-восточного простирания выделяются осадочные отложения центральной части Валдайского авлакогена. Удельное сопротивление осадочных пород в осевой части структуры опускается ниже $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Область низких значений УЭС изометричной формы в центральной части профиля РА (район городов Бежаницы и Локня) отвечает верхним горизонтам кристаллического фундамента, так как мощность осадков по данным бурения на этом участке составляет 1000–1300 м.

На карте УЭС для глубины 30 км на северо-западном фланге площади моделирования фиксируется область аномальной проводимости пород в средней коре. Направление оси проводящей структуры очень близко с главными направлениями фазового тензора импеданса, которые вынесены поверх карты УЭС (рис. 8б). Проводящая зона в районе профиля РА имеет простирание близкое к широтному, которое плавно изменяется на северо-восточное в центральной части профиля ОО. Южная часть области моделирования, в которую попадает профиль SVR, характеризуются высокими сопротивлениями пород земной коры, аномалии проводимости отсутствуют, что плохо согласуется с предшествующими результатами 2D инверсий, указывавшими на присутствие коровых проводящих аномалий.

Глубинная структура корового проводника вдоль профиля РА, полученная по трехмерной инверсии (рис. 9), близка к результатам 2D инверсии: проводящие породы локализируются в диапазоне глубин 10–40 км, общий наклон проводника западный, на его восточном краю область пониженных сопротивлений прослеживается в верхней коре, практически до подошвы осадочных отложений.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ИСТОЛКОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Происхождение глубинных проводящих структур обычно рассматривается с позиций двух основных концепций, в основе которых лежат электропроводящая и флюидная модели. Первая из них опирается на предположение о связи аномалий электропроводности с сульфидно-углеродными образованиями,

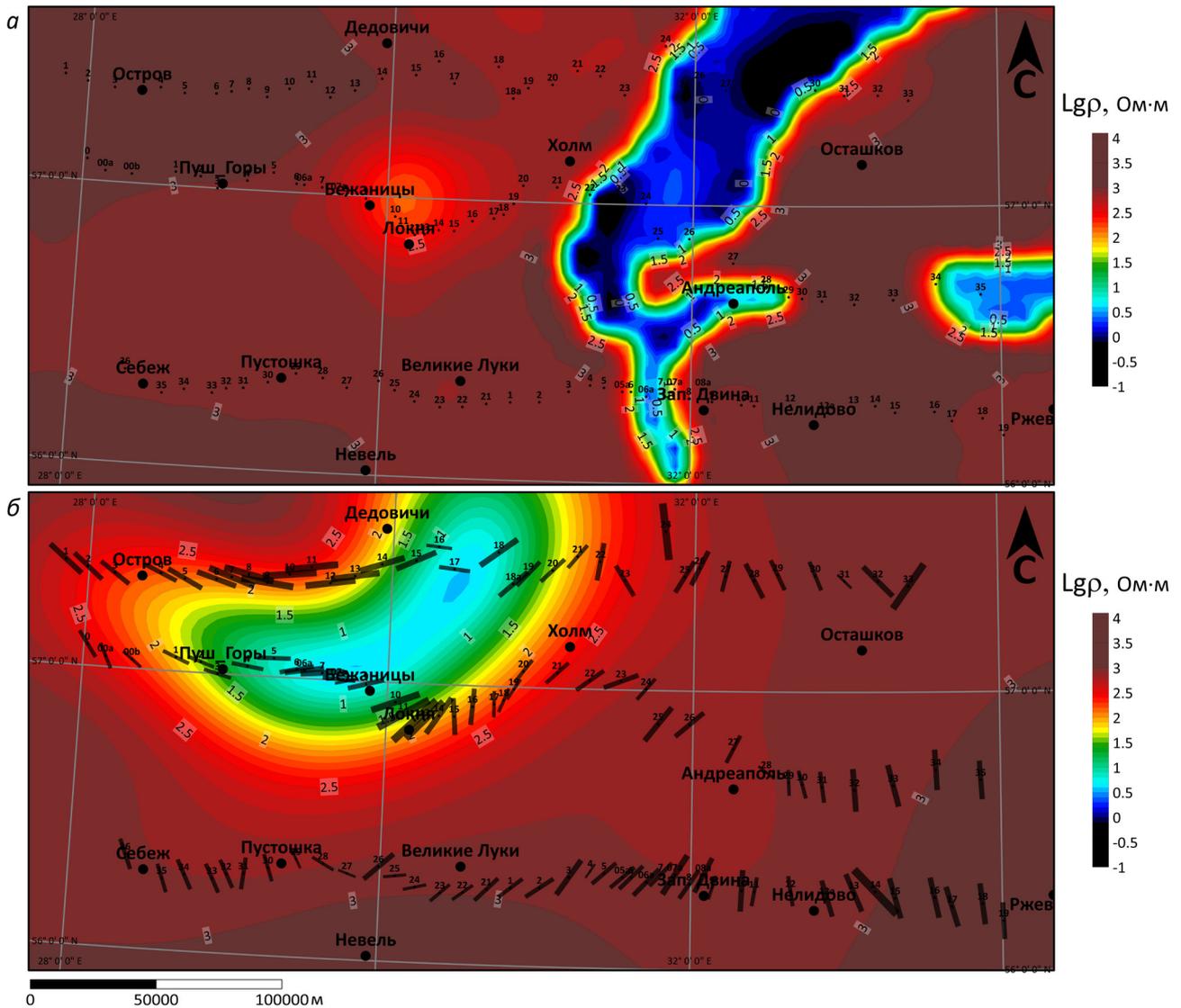


Рис. 8. Карты-срезы модели УЭС для области, показанной на рис. 1, построенной по результатам 3D инверсии для глубины 2 км (а) и 30 км (б, с нанесенными главными направлениями фазового тензора).

Fig. 8. Section maps of the resistivity model for the area shown in Fig. 1, obtained from 3D inversion results for a depth of 2 km (a) and 30 km (b, with the main directions of the phase tensor plotted).

а также на теоретическом допущении, что при отсутствии аномально высокого теплового потока, существование водных растворов на глубинах 40–80 км маловероятно (Жамалетдинов, Кулик, 2012; Варенцов и др., 2013). Обсуждение природы аномалий электропроводности в пределах региона исследований проекта SMOLENSK начато в работах (Варенцов и др., 2021; Иванов и др., 2022). Для интерпретации аномалий электропроводности в нашей области исследований будем использовать две модели: флюидную и электропроводящую.

Для верхних уровней разреза рассмотренных профилей мы предлагаем рассматривать флюидную модель электропроводности осадочной призмы и подстилающего ее дезинтегрированного фундамента, общая мощность которых

вдоль линий профилей достигает на отдельных участках 2.5–3 км.

На примере Валдайской грабен-синклинали показано, что изолинии наиболее высокой электропроводности заполняющих эту депрессию осадков очерчивают области их максимальной мощности и, соответственно, участки наибольшего погружения поверхности фундамента (рис. 8а).

Высокая пористость осадков и их тектоническая дезинтеграция позволяют предполагать высокую насыщенность осадочной призмы высоко минерализованными флюидами, что и объясняет их повышенную электропроводность (Астапенко, 2012; Астапенко, Дубаневич, 2017).

Высокой степени концентрации флюидов в осадочных толщах также, вероятно, способствовали

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

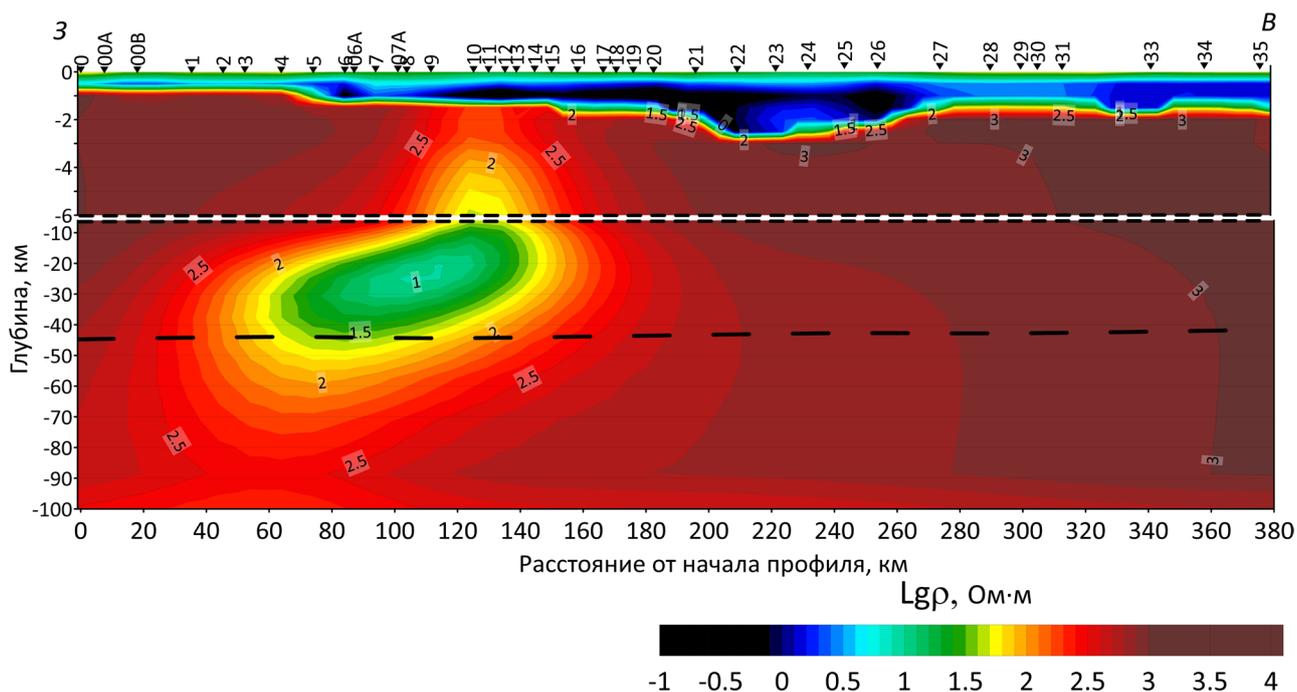


Рис. 9. Модель УЭС вдоль линии профиля РА, построенная по результатам 3D инверсии. Пунктирной линией показано положение границы Мохоровичича по данным (Laske et al., 2013).

Fig. 9. The resistivity model along the PA profile obtained from the results of 3D inversion. The dotted line shows the position of the Mohorovicich boundary according to (Laske et al., 2013).

проявления новейшей сейсмичности в области Слободского узла, обусловившие раскрытие трещин и активизацию поровых растворов (Колодяжный и др., 2021).

При интерпретации глубинной транскоровой аномалии электропроводности, отмеченной вдоль профилей РА и ОО, мы использовали электропроводящую модель. Ранее для МТ профилей, расположенных в южных частях Слободского узла и Оршанской впадины, были выявлены аномалии электропроводности, представленные в виде разрозненных линз на глубинах 10–30 км (Иванов и др., 2022). Эти аномалии были проинтерпретированы (Куликов и др., 2021) как реликты зоны субдукции Белорусской палеоокеанической плиты под окраину Сарматии в соответствии с ранее разработанными моделями (Гарецкий и др., 2006; Гарецкий, Каратаев, 2011, 2014; Bogdanova et al., 2015).

В рассматриваемом нами случае аномалии имеют совершенно другой облик. В разрезе они представлены ярко выраженными глубинными транскоровыми зонами электропроводности, которые имеют относительно крутые залегания в верхнекоровых слоях с небольшим наклоном в западных румбах. На глубинах 20–40 км эти зоны выполаживаются, обретая листрическую конфигурацию и простираясь далеко на запад в пределах нижней коры (рис. 7, 9). На поверхности ось электропроводности, связанная

с этими аномалиями на разрезах, имеет СВ простирание и, вероятно, продолжается в сторону озера Ильмень и далее в Южное Приладожье, где были выявлены аналогичные транскоровые аномалии, также круто наклоненные к западу (Куликов и др., 2022).

Аномалии Южного Приладожья были соотнесены с первоначально насыщенными органическим и карбонатным веществом сильно тектонизированными метаосадочными комплексами, накопившимися в палеопротерозое в пределах континентального склона Карельского кратона. В процессе коллизии эти отложения испытали погружение на большие глубины в пределах поддвиго-надвиговой безофиолитовой шовной зоны и были перекрыты нижними аллохтонными пластинами гранулитогнейсов ЮПР орогенного пояса. В результате метаморфизма и развития зон бластомилонитов в метаосадках произошло выделение свободных фаз углерода и кристаллического графита, образующего скопления в зонах скупивания и многократного сдвигания мелких тектонических пластин (Куликов и др., 2022). Графитсодержащие гранулитогнейсы и кондалиты отмечены в нижних аллохтонных пластинах ЮПР пояса, образующих обособленный Южно-Финско-Ладожский гранулитогнейсовый пояс (Минц и др., 2010), также входящий в состав зоны электропроводности Южного Приладожья (Куликов и др., 2022).

Если наше предположение о единстве выявленной в настоящей работе зоны электропроводности с Ильменско-Ладожской электропроводящей структурой верно, то имеются основания использовать аналогичную модель интерпретации.

Рассмотренные профили, вероятно, пересекают область выклинивания Южно-Финско-Ладожского гранулитогнейсового пояса, в строении которого могли участвовать наиболее глубоко погруженные и метаморфизованные до гранулитовой фации вулканогенно-осадочные серии континентального склона Карельского кратона, выведенные к поверхности в виде надвиговых пластин. Эти насыщенные углеродсодержащими породами пластины погружаются в западных румбах, достигают основания коры и по латерали далеко прослеживаются под вышележащими покровами ЮПР орогена, в частности, под чешуйчато-надвиговыми структурами Новгородского пояса.

Таким образом, Ильменско-Ладожская электропроводящая шовная зона, вероятно, представляет собой обособленную структуру по отношению к Центрально-Белорусской сутуре, которая, вероятно, перекрыта надвигами западного фланга ЛБС пояса. На поверхности ось ее электропроводности скрыта под экранящими электропроводящими осадками Валдайской и Оршанской депрессий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам качественного анализа МТ-данных (передаточных операторов импеданса, его фазового тензора и типпера) выделены основные направления, отражающие простиранье проводящих структур осадочного чехла и различных этажей земной коры.

По итогам количественной интерпретации, проведенной в формате 1D, 2D и 3D инверсий, была получена двухъярусная геоэлектрическая модель с проводящим осадочным чехлом ($U_{ЭС}=1-5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), мощность которого принимает максимальные значения в центре Валдайского грабена, и высокоомным основанием — породами кристаллического фундамента.

Наиболее контрастно в МТ/МВ данных проявляется аномалия, связанная с увеличением мощности проводящих осадков в Валдайском грабене, ось которой проходит по линии п. Западная Двина – п. Бологово – г. Демянск.

Коровый проводник, выявленный в западной части профилей РА и ОО по результатам 2D инверсий, имеет форму листрического разлома — восточная часть характеризуется крутым, близким к вертикальному, СЗ наклоном у подошвы осадков, а в западной части он выполажи-

вается с глубиной до почти горизонтального залегания.

Есть основания полагать, что выделенная зона является юго-западным продолжением Ильменско-Ладожской аномалии электропроводности (Астапенко, 2008; Астапенко, Дубаневич, 2017; Куликов и др., 2022; Рокитянский, 1982).

Высокая электропроводность предположительно связана с сильно тектонизированными метаосадками, насыщенными органическим веществом, погруженными в процессе коллизии на большие глубины в пределах поддвиго-надвиговых сутурных зон и перекрытыми покровами гранулитогнейсов Южно-Прибалтийского пояса.

В результате метаморфизма и развития зон бластомилонитов в метаосадках произошло выделение свободных фаз углерода и графита, образующего скопления в зонах сучивания и многократного сдвигания мелких тектонических пластин. Вероятнее всего, рассмотренные процессы были связаны с внутриконтинентальными безофиолитовыми сутурными зонами, возникшими в результате закрытия бассейнов пассивной окраины Карельского кратона в конце палеопротерозоя.

Список литературы [References]

- Аксаментова Н.В.* Магматизм и палеогеодинамика раннепротерозойского Осницко-Микашевичского вулканоплутонического пояса. Минск: ИГН НАН Беларуси, 2002. 175 с. [*Aksamentova N.V.* Magmatizm i paleogeodinamika ranneproterozoiskogo Osnitsko-Mikashevichskogo vulkano-plutonicheskogo poiyasa. Minsk: IGNNAN Belarusi, 2002. 175 p. (in Russian)].
- Астапенко В.Н.* Земная кора и мантия территории Беларуси по МТ данным // Минск: Экономпресс, 2012. 208 с. [*Astapenko V.N.* Zemnaya kora i mantiya territorii Belarusi po MT dannym // Minsk: Econompres, 2012. 208 p. (in Russian)].
- Астапенко В.Н.* Оршанско-Ильменская МВ аномалия // Доклады НАН Беларуси. 2008. Т. 52(5). С. 102–106 [*Astapenko V.N.* Orshansko-Ilmenskaya MV anomalija // Doklady NAN Belarusi. 2008. V. 52(5). P. 102–106 (in Russian)].
- Астапенко В.Н., Дубаневич М.А.* Базисная 3D геоэлектрическая модель литосферы Беларуси // Литасфера. 2017. № 2(47). С. 80–92 [*Astapenko V.N., Dubanovich M.A.* Bazisnaya 3D geoelektricheskaya model litosfery Belarusi // Litasfera. 2017. № 2(47). P. 80–92 (in Russian)].
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М: Научный мир, 2009. 680 с. [*Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I.* Models and methods of magnetotellurics // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 448 p.].
- Варенцов Ив. М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др.* Склон Воронежского кристаллического массива

- (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2013. 118 с. [Varentsov I.V., Gordienko V.V., Gordienko I.V. et al. SklonVoronezhskogo kristallicheskogo massiva (geofizika, glubinnyyeprocessy). Kiev: Logos, 2013. 118 p. (in Russian)].
- Варенцов Ив.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. [Varentsov I.V., Ivanov P.V., Ionicheva A.P. et al. Array of magnetotelluric soundings SMOLENSK: a deep structure study of the triple junction zone of the East European platform's largest segments // Geofizika. 2021. № 1. P. 46–56 (in Russian)].
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический узел Восточно-Европейской платформы // Литасфера. 2009. № 2. Вып. 31. С. 50–66 [Garetsky R.G., Karataev G.I. Slobodskiy tektono-geodinamicheskii uzel Vostochno-Evropeyskoy platformy // Litasfera. 2009. № 2(31). P. 50–66 (in Russian)].
- 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 [Garetsky R.G., Karataev G.I. A tectonogeodynamic model for the junction zone between the Fennoscandian and Sarmatian segments of the East European platform // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52. № 10. P. 1228–1235].
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Беларуская навука, 2014. 120 с. [Garetsky R.G., Karataev G.I. Shovnyye zony Fennoskandii, Sarmatii i Volgo-Uralii. Minsk: Belaruskaya navuka, 2014. 120 p. (in Russian)].
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический омутообразный узел в центре Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2019. № 2(51). С. 165–178 [Garetsky R.G., Karataev G.I. Slobodskiy tektono-geodinamicheskii omutoobrazny uzel v tsentre Vostochno-Evropeyskoy platformy // Litosfera. 2019. № 2 (51). P. 165–178 (in Russian)].
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Голобоков С.В., Данкевич И.В. Глубинное строение Центрально-Белорусской шовной зоны по геофизическим данным // Литасфера. 2006. № 1. Вып. 24. С. 101–112 [Garetsky R.G., Karataev G.I., Golobokov S.V., Dankevich I.V. Depth structure of the Central-Belarusian suture zone from geophysical data // Litasfera. 2006. № 1(24). P. 101–112 (in Russian)].
- Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г. «Структуры омота» – новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 5. С. 546–550. <https://doi.org/10.7868/S0869565218050110> [Garetsky R.G., Leonov M.G. Pool structures: a new type of interaction zones of lithospheric plate flows // Doklady Earth Sciences. 2018. V. 478. № 2. P. 152–155. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18020137>].
- Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н. Крупнейшие аномалии электропроводности мира // Геофизический журнал. 2012. Т. 34(4). С. 22–39 [Zhamaletdinov A.A., Kulik S.N. First-rate anomalies of electro-conductivity on the globe // Geofiz. Zhurnal. 2012. V. 34(4). P. 22–39 (in Russian)].
- Иванов П.В., Варенцов Ив.М., Колодяжный С.Ю. и др. Исследование глубинной электропроводности в окрестности Оршанской впадины: двумерная инверсия синтетических и наблюдаемых магнитотеллурических данных методом REBOCC // Физика Земли. 2022. № 5. С. 26–44. <https://doi.org/10.31857/S0002333722050179> [Ivanov P.V., Varentsov I.V., Kolodyazhnyi S.Yu. et al. Deep electrical conductivity in the vicinity of the Orsha depression: 2D REBOCC inversion of synthetic and observed magnetotelluric data // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2022. V. 58. № 5. P. 626–641. <https://doi.org/10.1134/S1069351322050032>].
- Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Тектоника фундамента // Известия ВУЗОВ. Серия: Геология и разведка. 2018а. № 2. С. 5–13 [Kolodyazhny S.Yu. Long-lived structural ensembles of the East European platform. Article 1. The basement tectonics // Izvestiya VUZOV. Seriya: Geologiya i razvedka. 2018a. № 2. P. 5–13 (in Russian)].
- Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Строение кровли фундамента // Известия ВУЗОВ. Серия: Геология и разведка. 2018б. № 3. С. 5–14 [Kolodyazhny S.Yu. Long-lived structural ensembles of the East European platform. Article 1. The structure of the top of the basement // Izvestiya VUZOV. Seriya: Geologiya i razvedka. 2018b. № 3. P. 5–14 (in Russian)].
- Колодяжный С.Ю., Певзнер М.М., Полещук А.В. и др. Признаки сейсмичности и новейшей активности древних разломов в районе Слободского геодинамического узла (запад Восточно-Европейской платформы) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 6. С. 43–58. <https://doi.org/10.31857/S0203030621060067> [Kolodyazhny S.Yu., Pevzner M.M., Poleshchuk A.V. et al. Signs of seismicity and neotectonic activity of ancient faults in the area of the Sloboda geodynamic intersection in the west of the East European platform // Journal of Volcanology and Seismology. 2021. V. 15. № 6. P. 399–413. <https://doi.org/10.1134/S0742046321060063>].
- Кудельский А.В. Высокоминерализованные воды и рассолы в верхнепротерозойских отложениях и кристаллическом фундаменте древних платформ (на примере Восточно-Европейской платформы и территории Беларуси) // Литасфера. 2005. Т. 2(23). С. 9–21 [Kudelsky A.V. High-mineralization groundwater and brines in Upper-Proterozoic sedimentary and crystalline formations of Belarus // Litasfera. 2005. V. 2(23). P. 9–21 (in Russian)].
- Куликов В.А., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю. и др. Геоэлектрическая модель Южного Приладожья по результатам 3D-инверсии магнитотеллурических данных // Физика земли. 2022. № 5. С. 45–59. <https://doi.org/10.31857/S0002333722050192> [Kulikov V.A., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu.

- et al.* A geoelectrical model of the Southern Ladoga region on the basis of 3D magnetotelluric data inversion // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022. Т. 58. № 5. С. 642–654. <https://doi.org/10.1134/S1069351322050056>].
- 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. № 2. С. 3–11 [Kulikov V.A., Ionicheva A.P., Lubnina N.V. et al. New magnetotelluric data for the Fennoscandia–Sarmatia suture zone // *Moscow University Geology Bulletin*. 2021. V. 76. № 3. P. 239–246].
- Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная инверсия данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований при решении рудных задач // *Геофизические исследования*. 2017. Т. 18. № 3. С. 27–44 [Kulikov V.A., Kaminsky A.E., Yakovlev A.G. Combined inversion of electric resistivity tomography and magnetotelluric sounding for solving tasks of ore geophysics // *Geofizicheskiye issledovaniya*. 2017. V. 18. № 3. P. 27–44 (in Russian)].
- Мици М.В. Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия // *Геотектоника*. 2011. № 4. С. 3–29 [Mints M.V. 3D model of deep structure of the early precambrian crust in the East European craton and paleogeodynamic implications // *Geotectonics*. 2011. V. 45. № 4. P. 267–290].
- Мици 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. [Mints M.V., Suleymanov A.K., Babayants P.S. et al. Glubinnoye stroeniye, evolutsiya i poleznye iskopayemye rannedokembriyskogo fundamenta Vostochno-Evropeyskoy platformy: Interpretatsiya materialov po opornomu profile 1-EV, 4V i Tatseys // *Moscow: Geokart; GEOS*. 2010. V. 1. 408 p.; V. 2. 400 p. (in Russian)].
- Нагорный М.А. Тектоника Оршанской впадины // *Литасфера*. 2009. № 2(31). С. 67–74 [Nagorny M.A. Tektonika Orshanskoy vpadiny // *Litasfera*. 2009. № 2(31). P. 67–74 (in Russian)].
- Объяснительная записка к комплекту геологических карт масштаба 1:1000000. Лист N-(35), 36 – Смоленск, Минск. СПб.: изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 192 с. [Obyasnitelnaya zapiska k komplektu geologicheskikh kart masshtaba 1:1000000. List N-(35), 36 – Smolensk, Minsk. SPb.: izd-vo VSEGEI, 1999. 192 p. (in Russian)].
- 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 [Rokityanskiy I.I., Kulik S.N., Logvinov I.M., Rokityanskaya D.A. Anomalii geomagnitnykh variatsiy na SZ Evropeyskoy chasti SSSR // *FizikaZemli*. 1982. № 11. P. 101–106 (in Russian)].
- Чамов Н.П. Строение и этапы развития катаплатформенного чехла среднерусско-беломорской провинции // *Литология и полезные ископаемые*. 2016. № 6. С. 547–563 [Chamov N.P. Structure and stages in development of the cataplatform cover in the Central Russian-Belomorian province // *Lithology and Mineral Resources*. 2016. V. 51. № 6. P. 484–499].
- Богданова С.В. Segments of the East European Craton // *Europrobe in Jablonna*. Warszawa, 1993. P. 33–38.
- Богданова С., Горбачев Р., Скрудлайте Г. et al. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna // *Precambrian Research*. 2015. V. 259. P. 5–33.
- Caldwell T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // *Geophysical Journal International*. 2004. V. 158. № 2. P. 457–469. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>
- Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference // *Geophysics*. 1979. V. 44. № 1. P. 53–68.
- Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K. A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // *Computers and Geosciences*. 2014. V. 66. P. 40–53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010>
- Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M. Update on CRUST1.0 – A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013–2658, 2013.
- Varentsov Iv.M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // *Electromagnetic sounding of the Earth's interior*, V. 40 (2nd Edition) Amsterdam: Elsevier, 2015a. P. 191–229.
- 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) Amsterdam: Elsevier, 2015b. P. 271–299.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
**FINDINGS FROM THE DEEP MAGNETOTELLURIC STUDIES
IN THE AREA OF THE SLOBODA GEODYNAMIC INTERSECTION
(EAST EUROPEAN PLATFORM)**

**V.A. Kulikov¹, Iv.M. Varentsov², P.V. Ivanov², A.P. Ionicheva², S.Yu. Kolodyazhny³,
A.V. Korolkova¹, I.N. Lozovsky², T.A. Rodina², A.G. Yakovlev¹**

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 119991;
e-mail: vic@nw-geophysics.ru*

²*Geoelectromagnetic Research Center — Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, Russia, 108840;
e-mail: yaroslavtseva.anna@gmail.com*

³*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 119017*

Received May 21, 2023; revised August 14, 2023; accepted December 25, 2023

The Sloboda Geodynamic Intersection is considered as an area of convergence for major segments, aulacogens, faults, and suture zones of the East European Platform. Between 2020 and 2022, researchers from the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University and the Geoelectromagnetic Research Center (GEMRC IPE RAS) conducted deep magnetotelluric surveys in this region. The surveys were performed along the Pushkin Gory – Andreapol, Sebezh – Velikiye Luki – Rzhev, and Ostrov – Ostashkov profiles. Through qualitative analysis of the collected data, the dimensionality of the studied medium, the total longitudinal conductance of the sedimentary cover, and the dominant strike direction of conductive structures were assessed. Quantitative interpretation using 1D, 2D, and 3D inversions resulted in geoelectric models comprising a conductive sedimentary cover and a highly resistive basement. Within the depth range of 10–40 km, transcrustal zones of enhanced electrical conductivity were consistently identified, interpreted as the southwest extension of the Ilmen-Ladoga anomaly. These conductivity anomalies are attributed to the deep submergence of heavily tectonized and metamorphosed sedimentary rocks, initially saturated with organic and carbonate matter.

Keywords: magnetotelluric soundings, crustal conductive anomalies, inversion.