

УДК 550.837.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ОКРЕСТНОСТИ ОРШАНСКОЙ ВПАДИНЫ: ДВУХМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ И НАБЛЮДЕННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ МЕТОДОМ REBOCC

© 2022 г. П. В. Иванов¹, *, Ив. М. Варенцов¹, **, С. Ю. Колодяжный², ***,
И. Н. Лозовский¹, П. Ю. Пушкарев³, Т. А. Родина¹

¹Центр геоэлектроманнитных исследований, филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
г. Москва, г. Троицк, Россия

²Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

³Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: pavel.vl.ivanov@gmail.com

**E-mail: ivan_varentsov@mail.ru

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

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Изучается геоэлектрическое строение области сочленения трех крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (БЕП): Волго-Уралии, Сарматии и Фенноскандии. Основным объектом исследования являются аномалии электропроводности в пределах Оршанской впадины. Применяется методика синхронного площадного магнитотеллурического (МТ) и магнитовариационного (МВ) зондирования земной коры. Используются данные глубинных МТ/МВ зондирований, полученные в 2018–2020 гг. в окрестности Оршанской впадины в ходе эксперимента SMOLENSK, и материалы аналогичных исследований, накопленные с 2007 г. восточнее на склоне Воронежского кристаллического массива (ВКМ) в рамках предшествующего эксперимента KIROVOGRAD. Их интерпретация осуществляется в классе двухмерных (2D) геоэлектрических моделей, которые строятся вдоль протяженных широтных профилей, объединяющих зондирования массива SMOLENSK в западной части и массива KIROVOGRAD в восточной. Совместная 2D-инверсия МТ и МВ откликов ведется с помощью широко распространенной программы REBOCC. Интерпретация МТ/МВ данных в пределах Оршанской впадины существенно затруднена сложной интерференцией глубинных и приповерхностных откликов. Последние определяются токовыми системами в пределах проводящего осадочного чехла, достигающего в центре впадины мощности ~2 км и суммарной продольной проводимости ~1000 См. Квазитрехмерные приповерхностные эффекты маскируют отклики коровых проводящих структур в широком диапазоне периодов и создают серьезные препятствия для их изучения в ходе 2D-интерпретации импедансных данных. Значимую роль в преодолении этих препятствий играют МВ данные типпера, иммунные к приповерхностным искажениям. Для формирования стратегии совместной интерпретации комплекса МТ/МВ данных проведены эксперименты по инверсии синтетических данных, рассчитанных в серии 2D-моделей, имитирующих возможную геоэлектрическую структуру региона исследований. Результаты численных экспериментов показали целесообразность применения REBOCC в рамках схемы двухэтапной последовательной 2D-инверсии, в которой на первом этапе учитываются МТ/МВ данные только электрической (TE) моды, а затем на втором этапе подключаются импедансные данные магнитной (TM) моды. Данная методика позволяет надежно выделять глубинные проводящие структуры под мощной осадочной толщей. Продемонстрирована важность использования априорных сведений о геоэлектрической структуре осадочного чехла при построении стартовой модели инверсии. Стратегия совместной 2D-инверсии, выработанная на синтетических МТ/МВ данных, применена для интерпретации наблюдений вдоль трех сводных профилей массивов SMOLENSK и KIROVOGRAD. Полученные результаты позволили уточнить строение Кирово-Барятинской коровой аномалии на западном склоне ВКМ, выявить сложную структуру коровых аномалий под Оршанской впадиной и сделать предварительные выводы о природе данных аномалий электропроводности и их связи с древними и современными геодинамическими процессами.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, Слободский тектоно-геодинамический узел, Сарматия, Фенноскандия, шовные зоны, Оршанская впадина, геоэлектрика, магнитотеллурика, 2D-моделирование и инверсия, коровые проводящие аномалии, стартовая и априорная модели электропроводности.

DOI: 10.31857/S0002333722050179

ВВЕДЕНИЕ

МТ исследования являются неотъемлемой частью комплекса геолого-геофизических методов при изучении региональной морфологии осадочных бассейнов и тектоники фундамента древних платформ. Они позволяют эффективно выявлять протяженные линейно-вытянутые зоны высокой электропроводности, отмеченные на разных уровнях земной коры на всех континентах в различных геологических обстановках [Жамалетдинов, Кулик, 2012]. Во многих случаях, на основе комплексного анализа геолого-геофизических данных установлена пространственная связь коровых проводников с глубинными зонами нарушений и сутурными зонами, разделяющими крупные блоки континентальной коры. В пределах ВЕП такому анализу посвящены работы [Рокитянский, 1972; 1975; Астапенко, Файнберг, 1999; Белявский и др., 2001; Астапенко, 2012; Жамалетдинов, Кулик, 2012; Варенцов и др., 2012; 2013; Алексанова и др., 2013; Куликов и др., 2018; Logvinov, Tarasov, 2018], выявившие целый ряд проводящих коровых структур, связанных с палеопротерозойскими шовными зонами в пределах Украинского щита и ВКМ.

Следует, однако, отметить, что в исследуемой области тройного сочленения сегментов ВЕП объем глубинных МТ исследований до недавнего времени был ограничен единичными профилями [Астапенко, 2012; Астапенко, Дубаневич, 2017], выполненными по технологии локальных зондирований в самом начале 1990-х годов. Новые данные, полученные с применением современной методики синхронного площадного МТ/МВ зондирования [Varentsov, 2015a], появились на западном склоне ВКМ в течение последних 15 лет [Варенцов и др., 2012; Алексанова и др., 2013] в рамках международного проекта KIROVOGRAD. Помехоподавляющая синхронная технология позволила получить здесь надежные МТ/МВ отклики вопреки высокому уровню промышленных электромагнитных (ЭМ) помех. Интерпретация полученных данных была выполнена с помощью трех различных методов 2D-инверсии на серии широтных профилей массива зондирований KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012; 2013; Алексанова и др., 2013; Бойченко и др., 2014; Varentsov, 2015a; Logvinov, Tarasov, 2018], а также средствами 3D-инверсии МВ откликов для всего массива [Варенцов и др., 2017] и импедансных данных для его российского сегмента [Куликов и др., 2018]. Полученные геоэлектрические модели позволили изучить в пределах ВКМ строение Кировоградской, Курской и Кирово-Барятинской коровых проводящих аномалий и структуру зоны их сочленения к юго-востоку от Брянска.

В 2018–2020 гг. в рамках проекта SMOLENSK массив зондирований KIROVOGRAD был про-

должен с применением аналогичной синхронной технологии на северо-запад в широкую окрестность Оршанской впадины [Варенцов и др., 2021]. Появилась возможность изучения глубинной геоэлектрической структуры на протяженных широтных профилях, пересекающих данную впадину и примыкающие склоны ВКМ и Белорусского кристаллического массива.

Проблемы и результаты таких исследований обсуждаются в данной статье. В ней последовательно дается геолого-тектоническая характеристика изучаемого региона и представляются площадные массивы и профильные ансамбли МТ/МВ данных, выбранные для интерпретации. Далее формируется рациональная стратегия ведения 2D-инверсии методом REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000], основанная на серии проведенных нами численных экспериментов по инверсии ансамблей синтетических данных импеданса и типпера, рассчитанных в 2D-моделях, имитирующих геоэлектрические разрезы, ожидаемые в регионе исследования. Затем выработанная стратегия 2D-инверсии реализуется на трех смежных широтных профилях, интегрирующих зондирования массивов SMOLENSK и KIROVOGRAD. Заканчивается статья сопоставлением моделей, полученных по экспериментальным данным, и предварительным геологическим истолкованием выявленных аномалий электропроводности.

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Согласно современным представлениям, фундамент ВЕП состоит из трех главных сегментов: Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, разделенных крупными сутурными зонами и орогенными поясами, сформировавшимися в конце палеопротерозоя в результате коллизии одноименных микроконтинентов [Глубинное ..., 2010; Гарецкий, Каратаев, 2014; Колодяжный, 2018a; Минц, 2011; Gorbatshev, Bogdanova, 1993; Bogdanova et al., 2015] (рис. 1a). Коллизионные швы и контуры палеорогенов подчеркиваются цепочками линейных магнитных и гравитационных аномалий, ориентированных радиально и сходящихся в центральной части ВЕП. Эта же закономерность повторяется в особенностях распределения систем рифей–ранневендских палеорифтов (авлакогенов), пространственно наследующих палеопротерозойские сутурные зоны фундамента ВЕП [Bogdanova et al., 1996] (рис. 1б). Пачелмский авлакоген протягивается вдоль зоны сочленения Волго-Уралии и Сарматии. Среднерусский авлакоген, предположительно, наследует одноименную шовную зону, разделяющую Фенноскандию и Волго-Уралию [Bogdanova et al., 1996]. В отношении границы Сарматии и Фенноскандии мнения исследователей расходятся. Согласно одним пред-

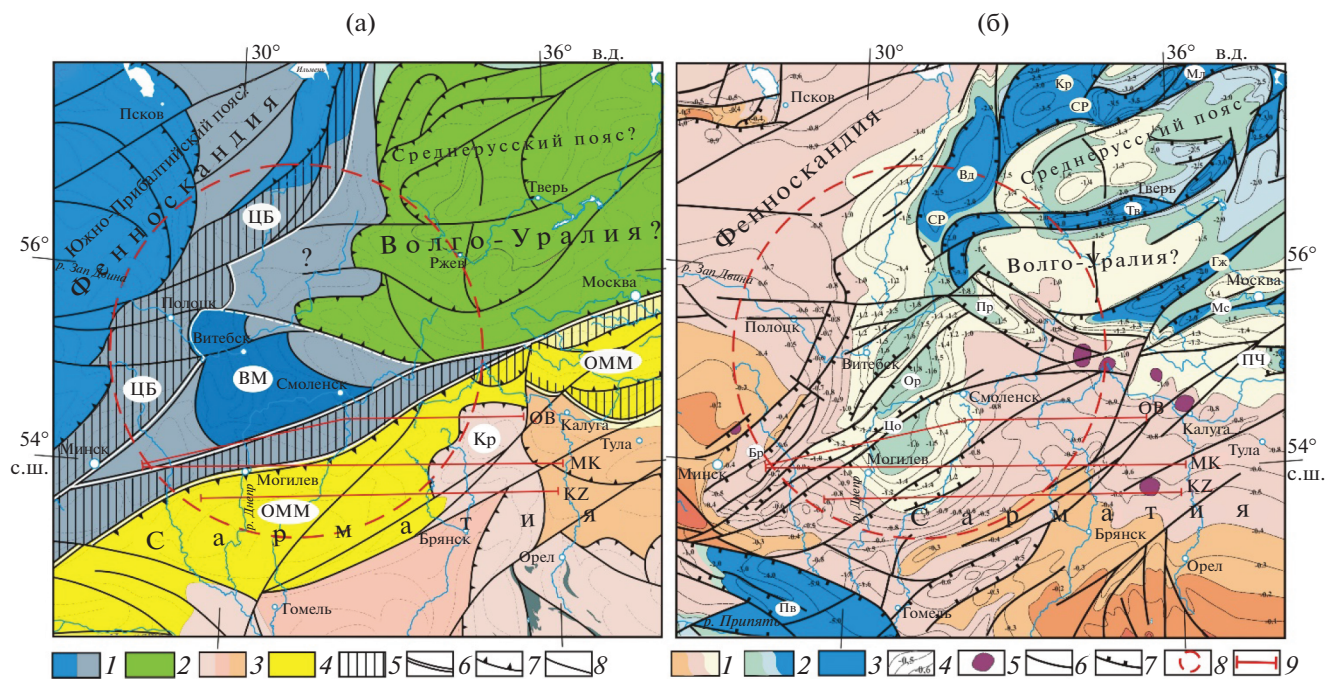


Рис. 1. Схемы строения фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы: (а) – архей–палеопротерозойский фундамент (с дополнениями по работам [Глубинное ..., 2010; Гарецкий, Каратаев, 2011; Колодяжный, 2018а]); (б) – кровля фундамента (с дополнениями по работам [Нагорный, 2009; Колодяжный, 2018б]).
 На рис. 1а: 1–3 – архей–палеопротерозойские комплексы (1 – Фенноскандии, 2 – Волго-Уралии, 3 – Сарматии); 4 – палеопротерозойский вулканоплутонический пояс окраины Сарматии; 5 – сутурные зоны; 6–8 – разломы (6 – главные швы, 7 – надвиги, 8 – прочие); ЦБ – Центрально-Белорусская шовная зона; ВМ – Витебский гранулитовый массив; ОММ – Осницко-Микашевичско-Московский вулканоплутонический пояс; Кр – выступ Курского блока Сарматии.
 На рис. 1б: 1–3 – морфоструктуры кровли фундамента (1 – поднятия, 2 – депрессии, 3 – авлакогены); 4 – изогипсы кровли фундамента; 5 – кольцевые депрессии; 6–7 – разломы (6 – преимущественно сдвиги, 7 – сбросы); 8 – контуры Слободского узла; 9 – линии рассматриваемых МТ профилей; СР – авлакогены и впадины Среднерусской системы (Ор – Оршанская; Вд – Валдайская; Кр – Крестцовский; Мл – Молоковский; Тв – Тверской; Пр – Пречистенский; Гж – Гжатский; Мс – Московский); ПЧ – Пачелмский авлакоген; Пв – Припятская впадина; Цо – Центрально-Оршанский горст; Бр – Брагинская зона разломов.

ставлениям она проходит вдоль Центрально-Белорусской шовной зоны, расположенной в основании западного крыла Оршанской впадины и являющейся южным продолжением Среднерусского авлакогена [Гарецкий, Каратаев, 2011; Гарецкий и др., 2006; Разломы ..., 2007] (рис. 1а, 1б). В других интерпретациях этот граничный шов расположен в пределах полосы северо-восточного простирания между городами Минском и Москвой [Глубинное ..., 2010; Колодяжный, 2018а; 2018б]. В этих тектонических построениях в качестве области сочленения Фенноскандии, с одной стороны, и Сарматии – Волго-Уралии, с другой, рассматривается широкий (сотни километров) Среднерусско-Южно-Прибалтийский коллизионный ороген [Глубинное ..., 2010; Минц, 2011]. До настоящего времени вопросы строения и местоположения главных шовных зон фундамента центральной части ВЕП остаются открытыми.

Р.Г. Гарецкий с соавторами ввел понятие “тектонико-геодинамический узел” на примере Слободской структуры, рассматриваемой в качестве

главного узлового сегмента схождения полосовых аномалий потенциальных полей, крупнейших разломов и сутурных зон, а также систем авлакогенов в области сочленения главных сегментов ВЕП [Гарецкий, Каратаев, 2009; 2014; Гарецкий, Леонов, 2018]. Центр Слободского узла расположен в пределах одноименной возвышенности между Витебском и Смоленском. Образование этой структуры авторы связывали с вихревыми движениями в астеносфере и верхней мантии, создавшими стягивающую силу, ставшую причиной “омутообразного” затягивания вещества земной коры в литосферу. Эта модель основана преимущественно на гравиметрическом моделировании и требует верификации другими методами исследований.

Рассматриваемая узловая структура с трех сторон обрамляется конвергентными системами палеопротерозойских складчато-надвиговых структур и сутурных зон (рис. 1а). С северо-запада расположены структуры Центрально-Белорусской шовной зоны, с северо-востока – надвиги, огра-

ничающие Волго-Уралию (или Среднерусский палеороген по работам [Глубинное ..., 2010; Минц, 2011]). С юга предполагается наличие сутурной зоны, ограничивающей северную окраину Сарматии, в пределах которой развит Осницко-Микашевичско-Московский вулканоплутонический пояс [Аксаментова, 2002; Глубинное ..., 2010; Колодяжный, 2018a]. Данный пояс рассматривается в качестве активной окраины андийского типа, связанной с длительной (2.0–1.8 млрд лет) субдукцией Белорусской океанической плиты в юго-восточном направлении под Сарматию [Гарецкий, Каратаев, 2011; 2014; Bogdanova et al., 2015]. Системы сутурных зон контролируют общую треугольную конфигурацию Слободского узла, в центре которого располагается Витебский гранулитовый массив, так же имеющий треугольную форму (рис. 1а). Предполагается, что этот массив представляет собой нижнекоровый фрагмент Осницко-Микашевичско-Московского вулканоплутонического пояса [Гарецкий, Каратаев, 2011; Bogdanova et al., 2015] либо образует часть Среднерусско-Южно-Прибалтийского коллизионного орогена [Глубинное ..., 2010; Минц, 2011].

В структуре кровли фундамента Слободского узла отмечается пересечение и сочленение систем рифей–ранневендских авлакогенов (рис. 1б). Центральную и южную части узловой структуры занимает субмеридиональная Оршанская впадина и осложняющие ее системы узких горстов, грабенов и сбросов, во многом наследующих палеопротерозойские коллизионные нарушения [Гарецкий, Каратаев, 2009; Разломы ..., 2007; Нагорный, 2009]. Рифейские разрывы в бортах Центрально-Оршанского горста наследуют палеопротерозойские разломы, развитые вдоль северного обрамления Сарматии (рис. 1б). Сбросовые нарушения западного крыла Оршанской впадины связаны с активизацией древних разломов Центрально-Белорусской шовной зоны. Кристаллические комплексы фундамента в пределах Оршанской впадины залегают на глубинах 1.0–1.8 км. Впадина выполнена образованиями протоплатформенного чехла суммарной мощностью ~1000 м [Нагорный, 2009]. В разрезе депрессии преобладают красноцветные песчаники с прослоями алевролитов и глин. В нижней части разреза Оршанской впадины в приразломных зонах развиты диамиктиты (подводно-оползневые образования), которые вследствие высокой дезинтеграции обладают повышенной пористостью и флюидонасыщенностью [Нагорный, 2009]. Установлено, что в основании Оршанской впадины верхние несколько сотен метров фундамента представлены высокотрещиноватой зоной, содержащей концентрированные рассолы и поэтому дополняющей собой проводящую толщу осадков [Кудельский, 2005; Астапенко, 2012]. Отложения плитного чехла общей мощностью до 800 м с

несогласием плащеобразно перекрывают протоплатформенные отложения Оршанской впадины, широко выходя за ее пределы.

СИНХРОННЫЕ МТ/МВ ЗОНДИРОВАНИЯ МАССИВОВ SMOLENSK И KIROVOGRAD

Зондирования международного эксперимента KIROVOGRAD выполнены, начиная с 2007 г., на территории от Днепрово-Донецкой впадины до южного борта Московской синеклизы и от западного края ВКМ до его центра [Варенцов и др., 2012; Varentsov, 2015a]. В 2018–2020 гг. в рамках эксперимента SMOLENSK территория исследований существенно расширилась в северном и западном направлениях до 57° с.ш. и 28° в.д. [Варенцов и др., 2021].

Наблюдения проводились с секундной дискретизацией в течение двух суток одновременно в нескольких (2–3) полевых пунктах. В эксперименте KIROVOGRAD преимущественно использовалась аппаратура Phoenix MTU5, в эксперименте SMOLENSK – длинопериодные станции LEM1-417V. Широко использованы синхронные наблюдения с такой же дискретизацией в нескольких ближних магнитных обсерваториях (KIV, MHV, BOX и др.) и на стационарном МВ пункте МГУ под Юхновом (ALX).

Многоточечное синхронное оценивание импеданса и типпера велось с учетом данных в 3–4 удаленных пунктах по мульти-RRMC методике [Варенцов и др., 2003; 2020; 2021; Varentsov, 2015a]. Оно позволило получить кондиционные данные импеданса и типпера для периодов от 0.125–1 до 4096 с в проекте KIROVOGRAD и от 8–16 до 4096–8192 с в проекте SMOLENSK. Дополнительно велось оценивание горизонтального МВ отклика относительно обсерватории KIV [Варенцов и др., 2012; Varentsov, 2015a]. Эти данные затем были пересчитаны относительно интерпретационной базы, расположенной западнее Брянска на удалении от ярких аномалий электропроводности [Варенцов и др., 2021].

Суммарно массивы KIROVOGRAD и SMOLENSK включают ~300 синхронных глубинных МТ/МВ зондирований с данными импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика (большие кружки на рис. 2) и еще ~500 зондирований (например, белорусских [Астапенко, Дубаневич, 2017]) с данными импеданса и/или типпера, предшествовавших этим экспериментам (малые кружки на рис. 2).

В точках наблюдения проектов SMOLENSK и KIROVOGRAD, а также для других собранных МТ зондирований прошлых лет была рассчитана [Варенцов и др., 2012; 2021] суммарная приповерхностная продольная проводимость S , характеризующая геоэлектрическую структуру осадоч-

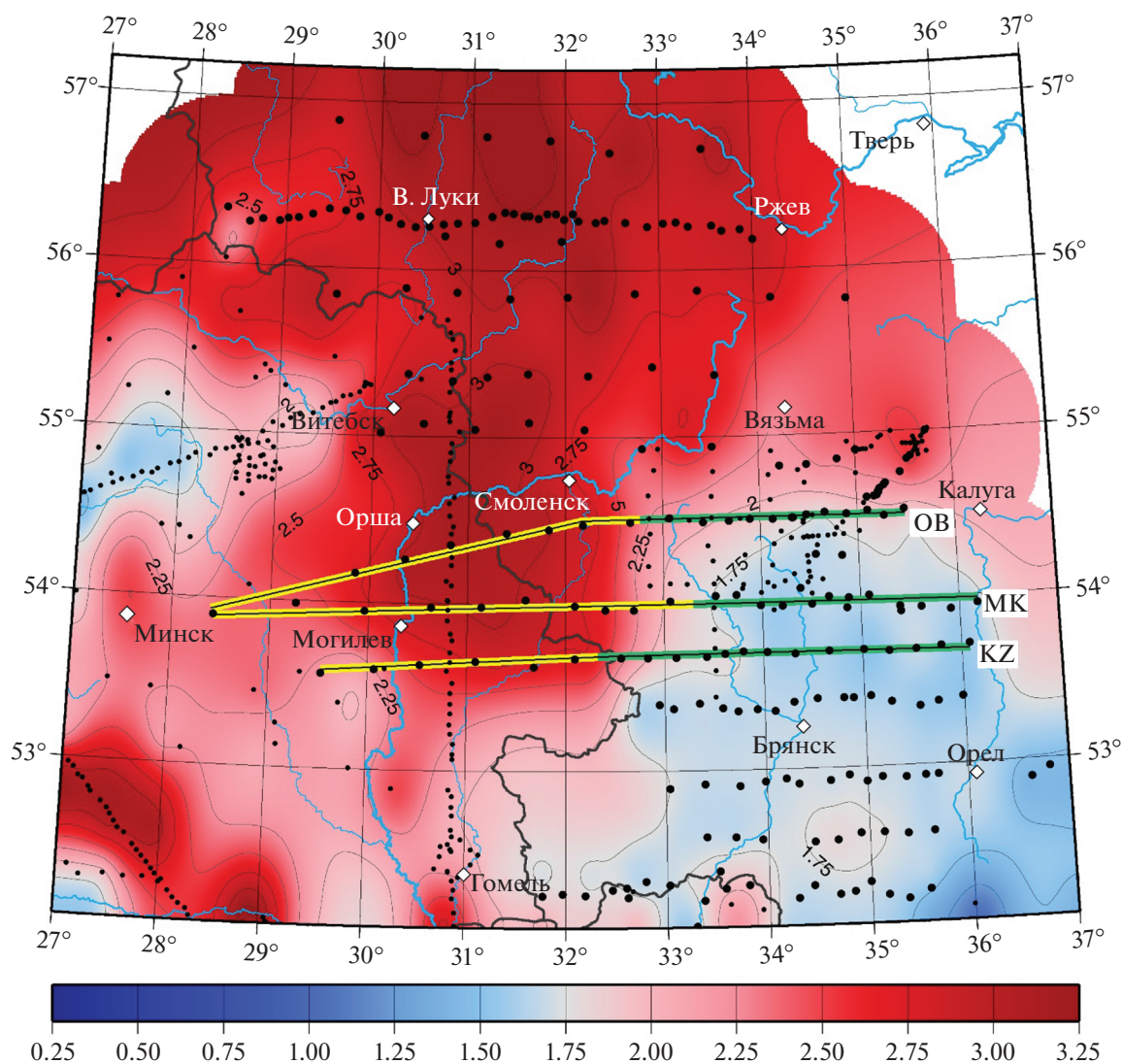


Рис. 2. Карта приповерхностной суммарной продольной проводимости S (См, lg-масштаб): большие кружки – синхронные МТ/МВ зондирования проектов SMOLENSK и KIROVOGRAD; малые кружки – локальные зондирования прошлых лет; сплошные жирные линии – сводные профили объединенных массивов зондирования SMOLENSK (желтые) и KIROVOGRAD (зеленые), с юга на север: Кричев – Жиздра (KZ), Могилев – Киров (МК) и Орша – Барятново (ОВ).

ного чехла и примыкающей проводящей измененной части фундамента. Оценивание S велось асимптотически по кривым эффективного кажущегося сопротивления. На рис. 2 показана карта распределения S , хорошо очерчивающая контур Оршанской впадины и представляющая особенности ее сочленения с Московской, Припятской и Днепрово-Донецкой впадинами.

Карты важнейших инвариантов передаточных операторов импеданса, типпера и горизонтального МВ отклика для массива KIROVOGRAD приведены в работах [Варенцов и др., 2012; 2013; Varentsov, 2015a], а для двух объединенных массивов – в работе [Варенцов и др., 2021]. Они дают представление о простирании доминирующих прово-

дящих структур и их 1D-/2D-/3D-размерности, что весьма важно для проведения профильной интерпретации данных.

В настоящей статье ставится и решается задача такой интерпретации МТ/МВ данных на трех наиболее представительных профилях объединенных массивов зондирования SMOLENSK и KIROVOGRAD, с юга на север (рис. 1, рис. 2): Кричев–Жиздра (KZ), Могилев–Киров (МК) и Орша–Барятново (ОВ). Западные части профилей представлены новыми зондированиями, выполненными в рамках эксперимента SMOLENSK, а восточные – зондированиями проекта KIROVOGRAD. Общая протяженность каждого профиля составляет 400–500 км. Профили МК и ОВ в своей за-

падной части под углом пересекают предполагаемую зону сочленения Сарматии и Фенноскандии (рис. 1). Следует, однако, понимать, что плановое положение этой предположительно надвиговой зоны определено по приповерхностным геологическим данным и может измениться по результатам применения методов глубинной геофизики. Далее, в восточном направлении линии этих профилей, а также профили KZ проходят вдоль Осницко–Микашевичско–Московского вулканоплутонического пояса активной окраины Сарматии. На восточном окончании все три профиля пересекают выступ Курского блока в составе Сарматии и связанные с ним ярко выраженные магнитные аномалии.

Все три рассматриваемые профили пересекают мощную проводящую толщу Оршанского осадочного бассейна (рис. 1, рис. 2), что значительно осложняет выявление и локализацию глубинных аномалий электропроводности. Сопротивления дофанерозойских пород в нижней части осадочного комплекса опускаются до $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в зонах насыщения терригенных формаций высокоминерализованными водами (до 170 г/л) [Кудельский, 2005; Астапенко, 2012]. Отметим при этом, что хорошая геолого-геофизическая изученность Оршанской впадины позволяет использовать оценки суммарной приповерхностной продольной проводимости в пунктах МТ зондирований (рис. 2), мощности осадков по результатам сейсморазведки и бурения (рис. 1), а также оценки сопротивления отдельных осадочных комплексов по результатам электрического каротажа для построения обоснованных априорных геоэлектрических моделей приповерхностной электропроводности, имеющих важное значение при изучении ниже лежащих проводящих структур по длиннопериодным МТ/МВ данным.

СОВМЕСТНАЯ 2D-ИНВЕРСИЯ АНСАМБЛЕЙ МТ/МВ ДАННЫХ МЕТОДОМ REBOCC

Представленные в статье результаты интерпретации МТ/МВ данных на профилях KZ, МК и ОВ получены с помощью широко распространенного метода (алгоритма, программы) 2D-инверсии REBOCC [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. В нем, реализуя классический принцип Оккама, решение обратной задачи ищется в классе плавно меняющихся (сглаженных) сред с минимальной структурной сложностью. Программа REBOCC находит распределение сопротивлений ячеек разреза, при котором достигается необходимое согласие модельных и инвертируемых данных, в котором градиенты этого распределения по глубине и вдоль профиля в достаточной мере ограничены. Такой подход позволяет избежать появления в моделях, получаемых на поздних итерациях инверсии, мозаичной структуры мелких аномалий,

не вносящих заметный вклад в массивы инвертируемых данных. Данный алгоритм также дает возможность дополнительной стабилизации решения путем введения априорной модели разреза. Это позволяет контролировать соответствие решения обратной задачи альтернативным априорным геолого-геофизическим предположениям.

Прямая задача в программе REBOCC решается методом конечных разностей. В качестве инвертируемых данных допустимы кажущиеся сопротивления и фазы импедансов для двух (TE и TM) поляризации ЭМ поля, а также МВ данные, представленные действительной и мнимой частями типпера. Все эти компоненты могут использоваться как отдельно, так и совместно. Эффективность совместной инверсии МТ/МВ данных существенно зависит от методики решения обратных задач. Комплексование данных может способствовать повышению разрешающей способности инверсии, объединяя различную чувствительность компонент данных к значимым элементам моделей, но может и усложнять сходимость итераций инверсии и останавливать ее процесс вдали от искомого решения в силу противоречивых влияний разных компонент. Эффективное разрешение таких противоречий достигается, например, на пути рационального взвешивания компонент данных и применения робастных методов минимизации [Варенцов, 2002; Varentsov, 2015б]. При этом, в других алгоритмах инверсии их разрешение может быть затруднительным.

Частная и совместная одновременная (далее – параллельная) инверсия доступных компонент данных методом REBOCC во многих случаях [Иванов, Пушкарев, 2010], в том числе на профилях массива KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2013; Бойченко и др., 2014; Logvinov, Tarasov, 2018], порождала неадекватное растягивание проводящих аномалий на большие глубины – при правильном определении их верхних кромок нижние границы проявлялись в разы глубже. Многочисленные вычислительные эксперименты [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Бердичевский и др., 2010] показали перспективность схемы последовательной инверсии ансамблей МТ/МВ данных, в которой на первом этапе инвертировались одни лишь данные типпера, иммунные к приповерхностным искажениям, далее полученная модель уточнялась с прибавлением продольных (TE) импедансных данных и на завершающем этапе дальнейшее уточнение велось с подключением поперечных (TM) импедансных данных. В такой схеме на начальных этапах инверсии удается ограничить влияние приповерхностных 3D-неоднородностей и сосредоточиться на разрешении глубинных структур, а на заключительном этапе – воспользоваться повышенной чувствительностью ТМ данных для детализации верхнего этажа разреза и строения областей высокого сопротивле-

ния, разделяющих приповерхностные и глубинные проводящие структуры. Эффективность применения такого подхода продемонстрирована в деталях на примере инверсии МТ/МВ данных на профиле НАРЫН в Киргизии [Бердичевский и др., 2010].

Здесь следует отметить, что самый первый опыт успешной последовательной 2D-инверсии двух мод импеданса и типпера был получен при интерпретации зондирований эксперимента EMSLAB в зоне субдукции Хуан-де-Фука на западе США [Варенцов и др., 1996; Ваньян и др., 2002], хотя в то время такой подход и был вынужденным в силу ограничений вычислительных ресурсов того времени, не позволявших выполнить параллельную инверсию. В этих работах использовался ранний прототип метода инверсии [Варенцов, 2002].

В данной статье продолжено исследование возможностей схем параллельной и последовательной 2D-инверсии МТ/МВ данных в рамках метода REBOSS. Важным элементом этого исследования стало изучение этих схем с использованием синтетических данных, рассчитанных в моделях, имитирующих изучаемые геоэлектрические разрезы и структуры реальных систем сбора МТ/МВ данных. Такой подход дает возможность оценки качества получаемых решений обратных задач не только по невязкам модельных и наблюдаемых данных, но и, прежде всего, по невязкам их модельных параметров (сопротивлений ячеек инверсии) относительно параметров истинной модели [Варенцов, 2002; Varentsov et al., 2007; Varentsov, 20156]. Он позволяет эффективно настраивать стратегию применения методов инверсии в конкретных геофизических обстановках.

ВЫРАБОТКА СТРАТЕГИИ ИНВЕРСИИ МТ/МВ ДАННЫХ НА ПРОФИЛЕ МК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Структура имитационных моделей

Рассматривается серия имитационных моделей (рис. 3) вдоль среднего профиля МК, включающая имеющиеся представления и возможные предположения о геоэлектрических структурах разреза (приповерхностных и глубинных). Синтетические данные для 2D-инверсии, рассчитанные в этих моделях, отражают реальное положение пунктов зондирований (рис. 2) и диапазон периодов для различных компонент данных. Фоновая геоэлектрическая структура моделей отражает нормальный горизонтально-слоистый разрез (НР), характерный для центральной части ВЕП. Его первый слой мощностью 100 км имеет сопротивление 1000 Ом · м, два следующих слоя имеют мощности 100 и 150 км и сопротивления

400 и 100 Ом · м, в основании разреза лежит полупространство с сопротивлением 30 Ом · м.

Неоднородное строение верхнего (осадочно-го) структурного этажа моделей отражает априорные представления о мощности осадочной толщи (рис. 1б) с учетом проводящей зоны в верхней части фундамента мощностью 300 м. Значения сопротивлений верхнего структурного этажа заданы по результатам предшествующих геолого-геофизических исследований [Астапенко, 2012] с учетом распределения суммарной приповерхностной продольной проводимости S (рис. 2), определенного по эффективным кривым кажущегося сопротивления в пунктах зондирований массивов SMOLENSK и KIROVOGRAD.

В нижнем (коровом) структурном этаже моделей заданы различные гипотетические представления о глубинном строении региона (рис. 3, верхние панели). Модель № 1 не содержит коровых аномалий электропроводности и используется только для оценки интенсивности и структуры приповерхностных МТ/МВ откликов. В восточной части моделей № 2 и № 3 задано коровое проводящее тело с однородным сопротивлением 50 Ом · м, шириной 100 км, мощностью 14–28 км и верхней кромкой на глубине 12 км, имитирующее Кирово-Баятинскую аномалию электропроводности, подробно изученную в рамках проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012; 2013; Куликов и др., 2018]. В западной части моделей № 2 и № 3 под Оршанской впадиной представлены различные варианты коровых структур: в модели № 2 – два коровых проводника, латерально разделенных интервалом в 92.5 км, с сопротивлениями 75 Ом · м, шириной (с запада на восток) 80 и 40 км, мощностью 14 и 8 км, глубинами верхних кромок 10 и 12 км, в модели № 3 – один сплошной коровый проводник в пределах всего осадочного бассейна с сопротивлением 75 Ом · м, шириной 210 км, мощностью 14 км и глубиной верхней кромки 10 км. Модель № 4 повторяет структуру модели № 3, за исключением глубины верхней кромки корового проводника под Оршанской впадиной, измененной с 10 на 40 км. Суммарная продольная проводимость структуры Баятинской аномалии не превышает 600 См, а для проводников под Оршанской впадиной лежит в пределах 100–200 См.

Все модели в конечно-разностной аппроксимации включали 147 ячеек по горизонтали и 69 по вертикали, в т.ч. 12 – в атмосфере. Горизонтальные размеры ячеек в области задания данных для инверсии составляли 3–5 км. Вертикальные размеры ячеек в пределах осадочных структур составляли 100–200 м, а в пределах коровых проводников – 2 км.

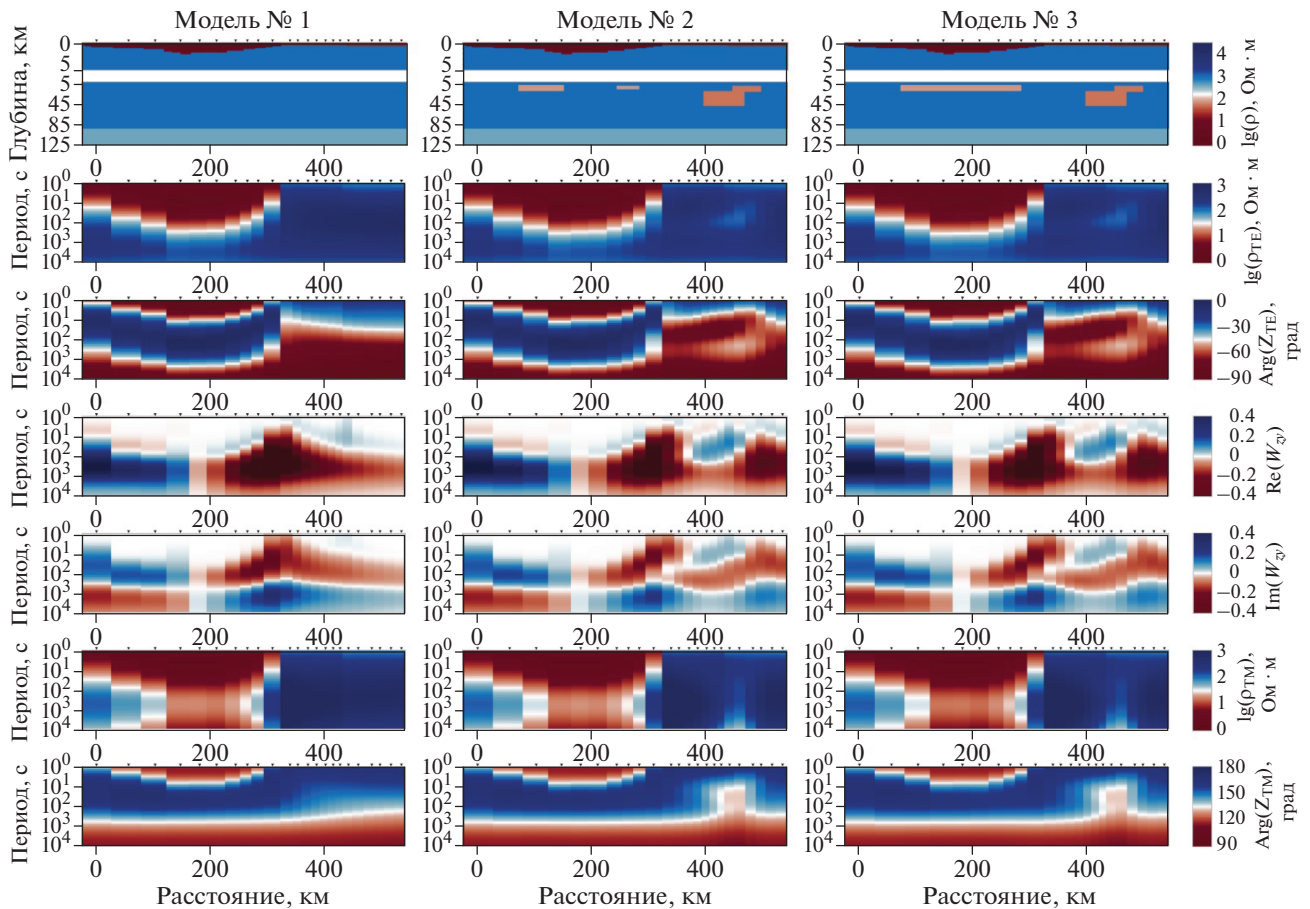


Рис. 3. Имитационные модели № 1, 2 и 3 (верхние панели, первые 5 км глубины даны в более детальном масштабе), созданные вдоль профиля МК (рис. 2), и соответствующие им псевдоразрезы 6 компонент МТ/МВ данных.

Структура синтетических наборов данных

Для всех моделей методом конечных разностей в рамках алгоритма REBOCC решена прямая задача для 23 пунктов наблюдения, отражающих положение зондирований, выполненных на профиле МК, на 60 периодах (возрастающих геометрически с множителем 1.16) в диапазоне 1–8600 с. Синтетические данные для инверсии задавались без добавления каких-либо шумов.

На рис. 3 представлены псевдоразрезы кажущихся сопротивлений и фаз импеданса (продольных и поперечных), а также действительной и мнимой частей типпера. Восточные (правые) части псевдоразрезов для моделей № 2 и № 3 практически не различаются в силу совпадения приповерхностных и глубинных проводящих структур и достаточного удаления от коровых проводников под Оршанской впадиной. Они, однако, сильно отличаются от псевдоразрезов для модели № 1, в которой не отражена Кирово-Баятинская аномалия электропроводности.

Другая ситуация наблюдается в западной (левой) части псевдоразрезов — здесь их различия для всех трех моделей проявляются в весьма тонких деталях, поскольку суммарная продольная проводимость коровых аномалий в 5–10 раз меньше приповерхностной суммарной продольной проводимости. Важно отметить, что на u_x -компоненте кажущегося сопротивления осадочный бассейн проявляется в виде аномалии, имеющей форму “песочных часов”, что может ошибочно трактоваться как эффект разделения откликов от приповерхностных проводящих осадков и глубинных коровых проводников. Компоненты типпера, которые принято считать менее подверженными влиянию приповерхностных структур, также очень близки друг к другу для всех трех моделей. Представленные особенности МТ данных для модели № 1 повторяют выводы, сделанные для модели грабена в рельефе фундамента в работе [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

В связи с отсутствием в псевдоразрезах заметных откликов от коровых структур в западной части моделей № 2 и № 3 с суммарной продольной

проводимостью порядка 100–200 См возникли определенные сомнения в возможности их обнаружения при инверсии комплекса МТ/МВ данных. Предстояло прояснить, какая методика инверсии позволит выделить эти коровые аномалии под мощной толщей проводящих осадков.

Схемы параллельной и последовательной инверсии МТ/МВ данных

Эффективность параллельной инверсии многокомпонентных наборов данных исследована нами в сопоставлении с рядом схем последовательной инверсии, начиная с классического трехэтапного подхода, представленного в работах [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Бердичевский и др., 2010]. При инверсии синтетических данных (рис. 3), в которых импедансные отклики не подвержены приповерхностным 3D-искажениям, характерным для данных натуральных МТ зондирований, оказалось целесообразным объединить первые два этапа классической схемы и начинать инверсию всех четырех компонент данных TE моды, а затем полученную модель использовать на втором этапе в качестве стартовой в инверсии полного 6-компонентного ансамбля МТ/МВ данных. Во всех использованных схемах инверсии возникла проблема выбора оптимальных решений в процессе итераций инверсии. Она решалась на основе анализа невязок данных и визуального контроля изменчивости получаемых моделей.

На начальном этапе решения обратной задачи большое значение имеет выбор стартовой модели. Это в равной степени относится к схемам параллельной и последовательной инверсий. Чаще всего, в качестве стартовой модели используется однородное полупространство, в более содержательных случаях — горизонтально-слоистый нормальный разрез региона исследований, в исключительных случаях стартовые модели включают хорошо известные неоднородные структуры. Стартовые модели с априорными представлениями, близкими к изучаемым структурам, позволяют ускорить сходимость итераций инверсии и повысить устойчивость получаемых результатов. С другой стороны, существенные ошибки в учитываемой априорной информации могут исказить результаты и нарушить сходимость итераций. Примеры важности учета в стартовой модели априорной информации показаны для ряда синтетических наборов данных в работах [Иванов, Пушкарев, 2010; 2012].

При инверсии МТ/МВ данных для профиля МК, нацеленной на разрешение глубинных проводящих структур, важнейшая априорная информация связана со структурой осадочного комплекса, достаточно хорошо изученного в окрестности Оршанской впадины. В наших исследованиях как в параллельной, так и на пер-

вом этапе последовательной инверсии, рассматривались два варианта стартовых моделей. В первом варианте задавалась только горизонтально-слоистая нормальная структура (НР) имитационных моделей, во втором варианте на нее накладывалась точная модель осадочного структурного этажа (НР + ОЧ).

Алгоритм REBOCC позволяет различным образом использовать стартовую и априорную модели. Процесс инверсии начинается со стартовой модели, а априорная модель учитывается при формировании функционала-стабилизатора [Siripunvaraporn, Egbert, 2000]. Второй вариант стартовой модели учитывался и как априорная модель, в то время как при использовании ее первого варианта априорная модель не задавалась. На втором этапе последовательной инверсии модель, полученная в результате первого этапа, использовалась как стартовая и априорная.

Во всех схемах инверсии погрешности данных задавались на следующих уровнях: 10% для кажущихся сопротивлений, 5% для фаз импеданса и 0.02 для действительной и мнимой частей типпера. Важные параметры REBOCC, контролирующие гладкость моделей в ходе инверсии, во всех случаях определялись по вертикали глубиной ячейки инверсии, а по горизонтали составляли 100 км.

Для всех полученных решений рассчитывались (в метрике L_2) нормы абсолютных (ABS, в единицах соответствующих компонент данных) и относительных (RMS, отн. ед.) невязок отдельных компонент данных. Для кажущихся сопротивлений здесь и далее используются lg-величины. Кроме того, оценивалась L_2 норма расхождения (невязки) lg-сопротивлений между итоговой моделью инверсии и истинной геоэлектрической структурой. После деления на норму lg-сопротивлений истинной модели оценки расхождения становились относительными и представлялись в %. Они были получены в двух вариантах: для всего разреза и только для его глубинной части (в интервале глубин ниже 5 км).

Результаты 2D-инверсии синтетических данных в модели № 2

На рис. 4 представлены результаты параллельной и двух этапов последовательной 2D-инверсии данных, рассчитанных в модели № 2 (рис. 3, центральная колонка). Параллельная инверсия всех шести компонент МТ/МВ данных (рис. 4, верхняя левая панель) не позволила восстановить коровые проводники в бортовых зонах Оршанской впадины. Даже использование в стартовой модели истинной структуры осадочного чехла (НР + ОЧ) не способствовало их выявлению (рис. 4, верхняя правая панель). При этом структура Кирово-Барятинской аномалии электропроводно-

сти в восточной части профиля, где осадки имеют малую мощность, восстановлена с хорошей точностью.

Результаты первого этапа последовательной инверсии (рис. 4, средние панели), где инвертировались четыре компонента TE моды, уже дают достаточно хорошее восстановление западных коровых проводников, поскольку именно эти компоненты обладают повышенной чувствительностью к глубинным проводящим структурам. При этом геометрия Кирово-Барятинской аномалии также ближе к истинной по сравнению с результатами параллельной инверсии.

На втором этапе последовательной инверсии, когда используются все шесть компонент данных, а стартовой и априорной моделью является результат предыдущего этапа, итоговая модель уточняется совсем незначительно (рис. 4, нижние панели). Использование стартовой модели НР + ОЧ (рис. 4, правая нижняя панель) дает пониженные значения невязок как в пространстве данных, так и в пространстве модели, по сравнению со случаем стартовой модели НР (рис. 4, левая нижняя панель) — здесь наблюдается существенное завышение мощности осадочного чехла.

Инверсия синтетических данных в модели № 2 показала, что восстановить методом REBOSS умеренно контрастные коровые проводники под мощной толщей осадочного чехла возможно, но только в случае проведения последовательной 2D-инверсии. Учет в стартовой модели НР + ОЧ истинной структуры осадков позволяет более точно восстанавливать коровые структуры, не затрудняя при этом сходимость итераций инверсии. Следует, однако, отметить, что итоговые модели первого и второго этапов последовательной инверсии очень близки как визуально, так и по приведенным невязкам. Этот факт предполагает возможность лучшей настройки параметров инверсии и весов данных на втором, заключительном этапе.

Результаты 2D-инверсии синтетических данных в моделях № 3 и № 4

Выводы, сделанные по результатам 2D-инверсии синтетических данных в модели № 2, подтвердились при инверсии данных для модели № 3, в которой задан один коровый проводник в пределах всей ширины осадочного бассейна (рис. 3, правая колонка). Параллельная инверсия и здесь не справляется с восстановлением истинной геоэлектрической структуры (рис. 5). Результат параллельной инверсии со стартовой моделью НР (рис. 5, слева) не позволяет разделить проводящие объекты верхнего и нижнего структурных этажей и сильно (до 10 км) завышает мощность осадочного чехла. Использование стартовой мо-

дели НР + ОЧ (рис. 5, справа) позволяет выявить коровую структуру, но неверно восстанавливает ее параметры, опуская проводник ниже нижней кромки истинной структуры.

Результат второго этапа последовательной инверсии, полученный с использованием стартовой модели НР + ОЧ, представлен на левой панели рис. 6. Истинная модель восстановлена достаточно хорошо, а нормы невязок данных и модельных параметров имеют меньшие значения по сравнению с соответствующими результатами для модели № 2 (рис. 4, внизу справа), что объясняется большими размерами корового проводника в модели № 3 и, соответственно, его более существенным вкладом в компоненты МТ/МВ данных.

Дополнительно было исследовано влияние глубины залегания коровой структуры на результаты последовательной 2D-инверсии. В модели № 4 положение верхней кромки корового проводника смещено по сравнению с моделью № 3 с 10 на 40 км. Очевидно, что чувствительность МТ/МВ данных к более глубокому коровому проводнику уменьшается, и результат двухэтапной последовательной инверсии в модели № 4 (рис. 6, правая панель) не так хорошо восстанавливает истинную модель по сравнению с результатом в модели № 3 (рис. 6, левая панель), что отражается и в повышении значений рассматриваемых норм невязок. При этом важно отметить, что положение верхней и нижней кромок корового проводника при инверсии синтетических данных в модели № 4 определяется корректно.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВДОЛЬ ТРЕХ СВОДНЫХ ПРОФИЛЕЙ МАССИВОВ ЗОНДИРОВАНИЙ SMOLENSK И KIROVOGRAD

Методика двухэтапной последовательной инверсии с учетом априорных сведений об осадках в стартовой модели, выработанная с использованием синтетических данных для построенных имитационных моделей, была применена для интерпретации натуральных МТ данных, полученных на трех субширотных, самых длинных профилях объединенных массивов зондирований SMOLENSK и KIROVOGRAD: KZ, MK и OB (рис. 1, рис. 2). Структура данных в пунктах зондирования этих двух массивов несколько различалась. На восточных частях профилей данные получены преимущественно с аппаратурой Phoenix MTU5 в диапазоне периодов 1–4096 с, а на западных — с длиннопериодной аппаратурой LEMI-417V в диапазоне периодов от 8–16 до 4096–8192 с. В ходе инверсии использовались значения погрешностей данных, определенные в результате многоточечного синхронного оценивания передаточных операторов [Варенцов и др.,

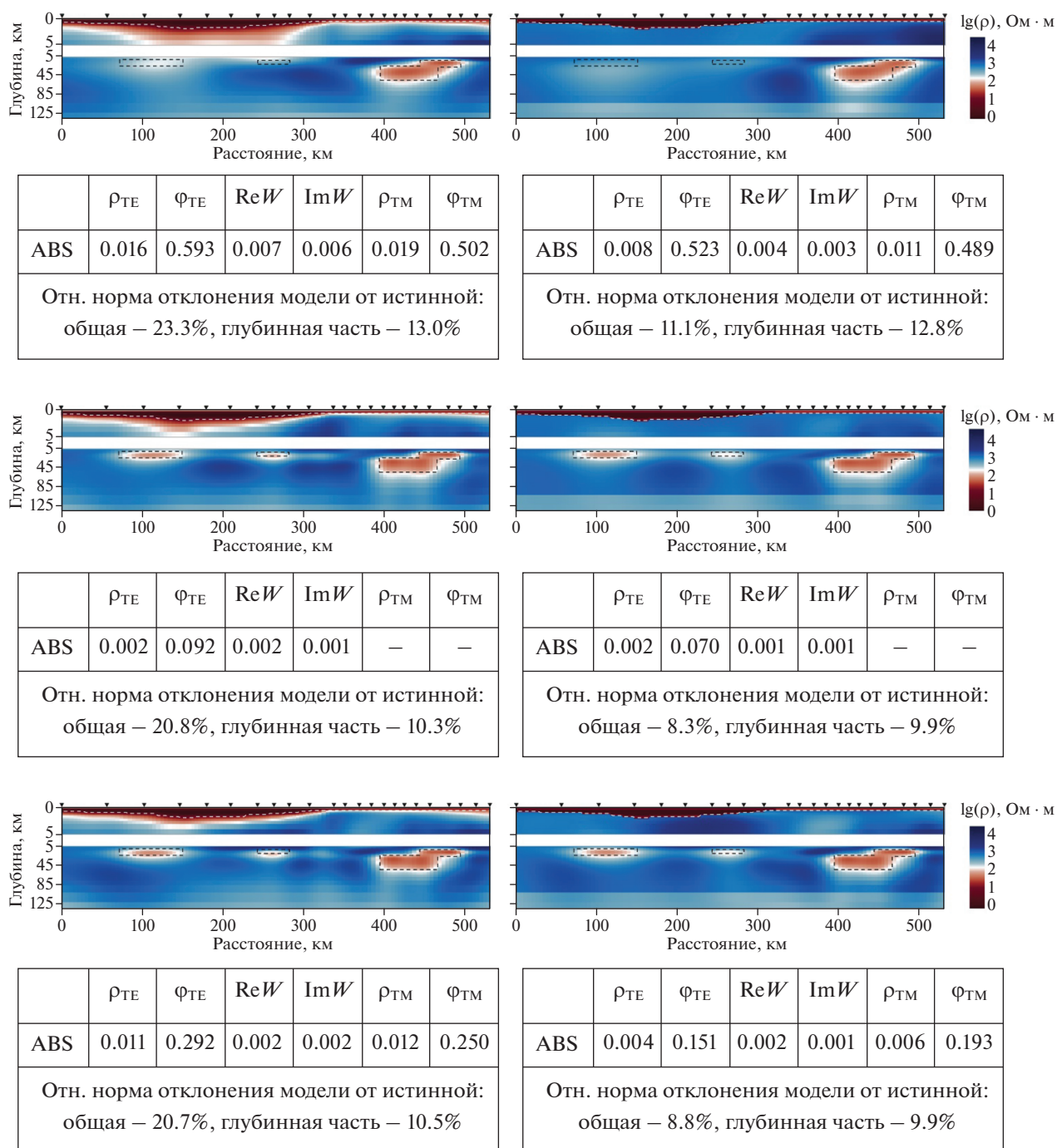


Рис. 4. Результаты 2D-инверсии синтетических МТ данных в модели № 2 (рис. 3, средняя колонка), выполненные по схемам параллельной (верхняя панель) и последовательной инверсии (средняя панель – первый этап, нижняя панель – второй этап); верхние 5 км даны в более детальном масштабе; пунктиром показаны истинные контуры осадочного чехла и коровых проводников; стартовые модели инверсии: слева – слоистый нормальный разрез (НР), описанный в тексте с первым слоем мощностью 100 км и сопротивлением 1000 $\text{Ohm} \cdot \text{m}$, справа – этот же разрез с наложенной истинной 2D-структурой осадочного чехла (НР + ОЧ); каждый результат инверсии сопровождается компонентами нормами невязок данных (абсолютных, ABS) и двумя нормами модельных невязок – по всему разрезу и только для его глубинной части.

2003; 2012; 2020; 2021] и ограниченные снизу пороговыми величинами (*error floors*): 10% для кажущихся сопротивлений, 5% для фаз и 0.02 для действительной и мнимой частей типпера.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 5 2022

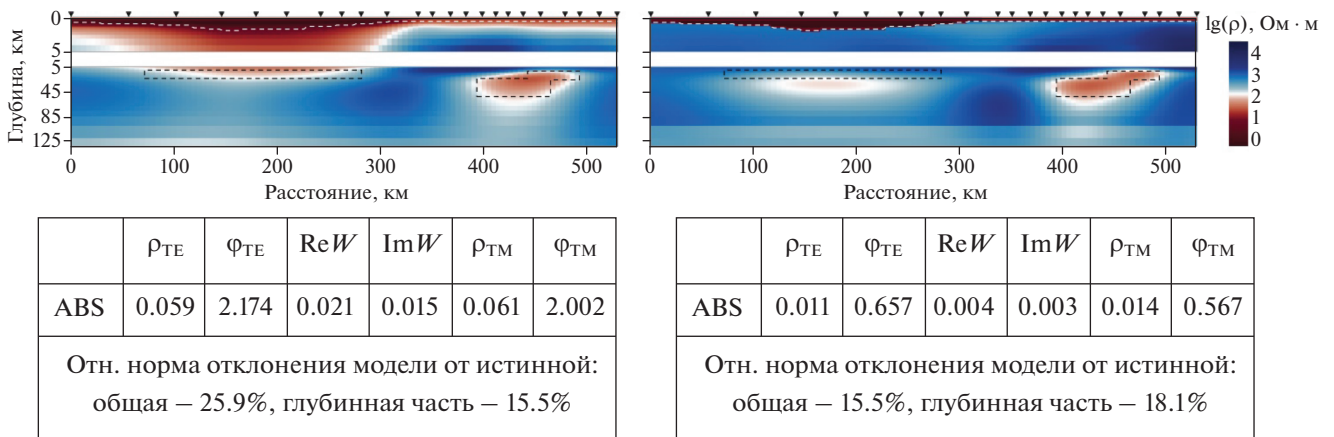


Рис. 5. Результаты параллельной 2D-инверсии синтетических МТ/МВ данных в модели № 3 (рис. 3, правая колонка); стартовые модели: слева – НР, справа – НР + ОЧ.

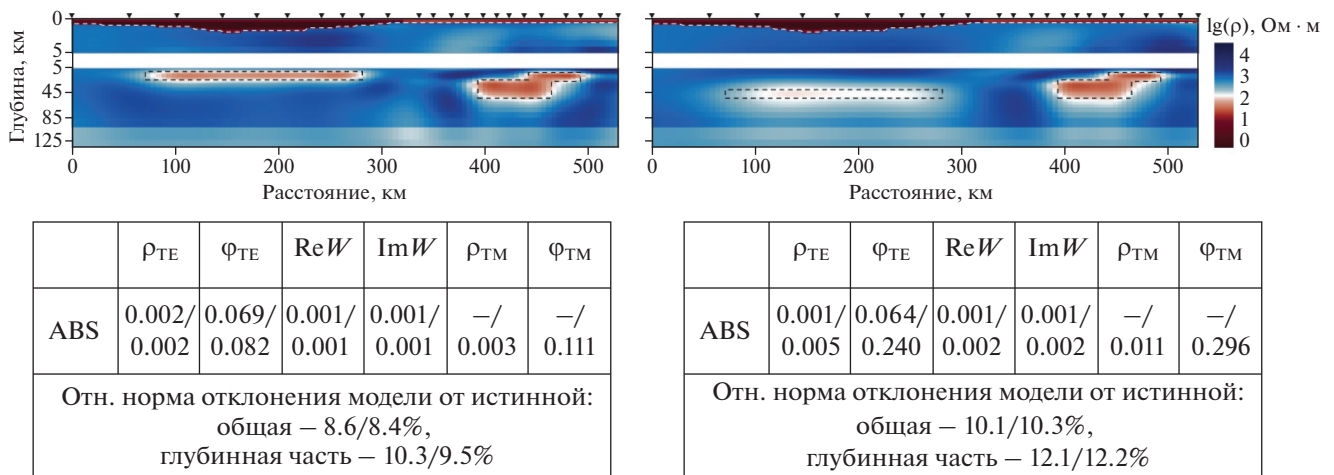
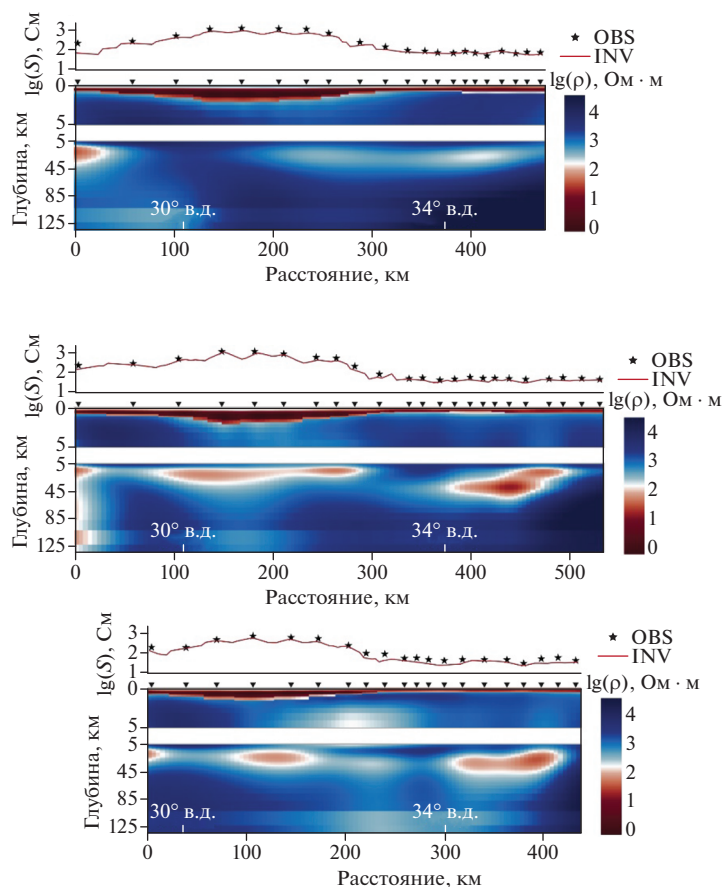


Рис. 6. Результаты второго этапа последовательной 2D-инверсии синтетических МТ/МВ данных в модели № 3 (слева) и № 4 (справа) со стартовой моделью НР + ОЧ; в таблицах абсолютные невязки для первого и второго этапов инверсии разделены косой чертой.

На рис. 7 представлены итоговые геоэлектрические модели вдоль профилей KZ, МК и ОВ, полученные после второго этапа последовательной 2D-инверсии. Нормы невязок данных демонстрируют достаточно удовлетворительный подбор всех компонент. Однако они заметно увеличиваются при движении от южного профиля KZ к северному ОВ, что может быть связано с возрастающей на север трехмерностью среды, более сложной (отклоняющейся от широтной) траекторией профиля ОВ и повышенным уровнем ЭМ шумов вдоль электрифицированной железной дороги Смоленск–Орша–Минск и близкой к ней системе магистральных трубопроводов. Также на рис. 7 над каждым геоэлектрическим разрезом показаны графики наблюдаемой и модельной

(рассчитанной для верхних 3 км) суммарной продольной проводимости S , демонстрирующие хорошее совпадение в пунктах зондирования. На рис. 8 представлено сопоставление псевдоразрезов наблюдаемых и модельных компонент всех данных для профиля МК. Здесь видно, что в недостаточной степени подобраны длиннопериодные фазы импеданса, особенно в случае TM моды, что отражается и в нормах невязок данных, приведенных на рис. 7.

В восточной части профилей KZ и МК (рис. 7) подтверждена структура Кирово-Баятинской аномалии электропроводности, подробно исследованной в рамках проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012; 2013; Куликов и др., 2018]. Оценки суммарной продольной проводимости



	ρ_{TE}	φ_{TE}	ReW	ImW	ρ_{TM}	φ_{TM}
RMS	11.87/ 12.46	6.12/ 7.08	4.99/ 5.50	3.20/ 3.15	—/ 4.76	—/ 4.89
ABS	0.53/ 0.55	9.35/ 10.96	0.10/ 0.11	0.06/ 0.06	—/ 0.21	—/ 8.02

	ρ_{TE}	φ_{TE}	ReW	ImW	ρ_{TM}	φ_{TM}
RMS	7.02/ 7.56	4.60/ 5.02	3.55/ 3.54	2.37/ 2.18	—/ 4.11	—/ 4.51
ABS	0.31/ 0.33	7.16/ 7.69	0.07/ 0.07	0.05/ 0.04	—/ 0.18	—/ 8.29

	ρ_{TE}	φ_{TE}	ReW	ImW	ρ_{TM}	φ_{TM}
RMS	5.50/ 5.81	2.99/ 3.09	3.93/ 3.79	2.15/ 2.03	—/ 3.19	—/ 3.94
ABS	0.24/ 0.25	4.39/ 4.53	0.08/ 0.08	0.04/ 0.04	—/ 0.14	—/ 7.56

Рис. 7. Геоэлектрические модели вдоль профилей: ОВ (вверху), МК (посередине) и КЗ (внизу), полученные после второго этапа последовательной 2D-инверсии наблюдаемых МТ/МВ данных; верхние 5 км даны в более детальном масштабе; над каждым разрезом представлены графики наблюдаемой и модельной (рассчитанной для верхних 3 км) суммарной продольной проводимости S ; в таблицах рядом с каждой моделью приведены нормы компонентных невязок: относительных (RMS) и абсолютных (ABS) для первого и второго этапов инверсии (разделены косой чертой); на разрезах показано положение меридианов 30° в.д. и 34° в.д.

этой структуры достигают 600 и 1000 См соответственно. А вот на профиле ОВ можно видеть лишь остаточное проявление этой аномалии, обрывающейся здесь на южном борту Московской синеклизы, что согласуется с 3D-моделями проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2017; Куликов и др., 2018].

Сложная структура аномалий наблюдается в коре под Оршанской впадиной. В модели вдоль профиля МК на глубинах 10–30 км проявляются два горизонтально вытянутых, близко расположенных коровых проводника с сопротивлением ниже 100 Ом · м. Их суммарная продольная проводимость растет с востока на запад, составляя ~130 и ~200 См соответственно. Южнее, на профиле КЗ из этих двух проводников остается ярко выраженным только один (с продольной проводимостью ~200 См), принимающий более изометричную форму; восточнее, на борту впадины намечается мало контрастная проводящая область, продолжающаяся на меньшие глубины.

На самом северном профиле ОВ яркие проводники под Оршанской впадиной не выделяются, лишь на ее восточном борту заметна мало контрастная область с сопротивлением ~300 Ом · м. Поскольку в рамках проекта SMOLENSK имеются зондирования на профилях севернее ОВ (рис. 2), для которых предварительно выделяются коровые проводящие структуры, можно предположить, что на широте профиля ОВ коровый проводник разрывается. Предпосылки продолжения коровых аномалий, выявленных в пределах Оршанской впадины, далее на север более детально рассмотрены в предшествующей работе [Варенцов и др., 2021]. С другой стороны, коровые структуры на профиле ОВ могут теряться в результате усиления их экранирования возрастающей мощностью осадков, а также в силу более низкого качества представленного решения обратной задачи, выраженного в заметно повышенных невязках данных. Проводники на самом западном краю всех трех профилей представляются

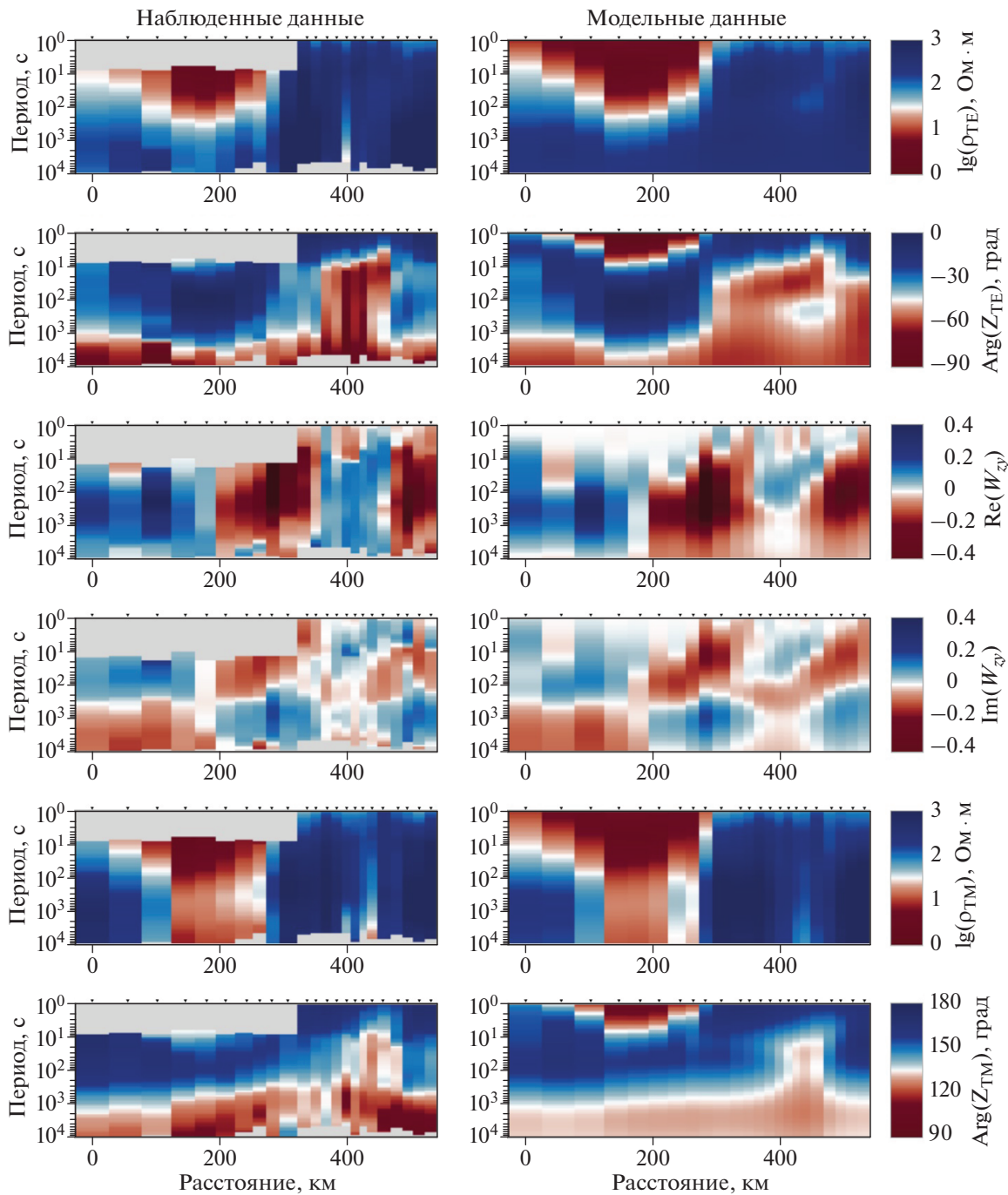


Рис. 8. Псевдоразрезы 6 компонент наблюдаемых (левая колонка) и модельных (правая колонка) МТ/МВ данных на профиле МК.

в данный момент краевыми артефактами инверсии, для прояснения их природы там необходима более плотная сеть зондирований.

ПРИРОДА ВЫЯВЛЕННЫХ АНОМАЛИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

Современные представления о природе глубинных проводников в земной коре древних

платформ включают две основные альтернативы: электронно-проводящую и флюидную. В рассмотренном нами случае (три геоэлектрических разреза в южной части Оршанской впадины) на разных глубинных уровнях земной коры можно рассматривать обе альтернативы и их комбинацию.

Изолиния наиболее высокой суммарной продольной проводимости (2.75 в lg-масштабе, рис. 2)

осадков протоплатформенного и плитного чехла Оршанской впадины хорошо очерчивает области их максимальной мощности (до 1.8 км) и, соответственно, участки наибольшего погружения поверхности фундамента (рис. 16). Детализация МТ наблюдений в регионе исследования показала, что контуры этой максимальной изолинии хорошо соответствуют плановому положению верхнепротерозойского комплекса Оршанской впадины. Это указывает на доминирующий вклад протоплатформенных рифей-ранневендских формаций в величину суммарной продольной проводимости осадков до глубин ~2 км. Наличие большого объема терригенных отложений с высокой пористостью (песчаников) и степенью дезинтеграции (диамиктитов, брекчий, трещиноватых пород) в составе этих формаций предполагает их существенную насыщенность высокоминерализованными водами, что способствует понижению сопротивления до ~1 Ом · м. Также имеются предположения, что верхние несколько сотен метров фундамента в центральной части впадины представлены зоной тектонической дезинтеграции, содержащей концентрированные рассолы и поэтому увеличивающих мощность приповерхностной проводящей толщи [Кудельский, 2005; Астапенко, 2012]. Вероятно, высокой степени концентрации флюидов в осадочных толщах Оршанской впадины способствовали проявления новейшей сейсмической активности в центральной части Слободского узла, обусловившие раскрытие трещин и активизацию поровых растворов, испытывавших динамически направленное перераспределение в больших объемах трещиноватых пород [Колодяжный и др., 2021]. Таким образом, для верхних структурных этажей разрезов рассмотренных профилей вполне оправдано использование флюидной модели электропроводности осадочного чехла и подстилающего его тектонически дезинтегрированного фундамента, общая мощность которых достигает, а возможно и несколько превышает 2 км.

Флюидная природа глубинных аномалий электропроводности, представленных в виде разрозненных линз на глубинах 10–30 км под Оршанской впадиной на западных частях профилей КЗ и МК, маловероятна – при отсутствии аномально высокого теплового потока здесь трудно обосновать поступление и сохранение необходимых объемов минерализованных вод [Астапенко, Файнберг, 1999; Астапенко, 2012]. В этом случае, как и в случае Кирово-Барятинской аномалии, более вероятно электронно-проводящая природа, обусловленная присутствием сульфидно-углеродных образований в толщах палеопротерозойских метаосадков [Жамалетдинов, Кулик, 2012; Варенцов и др., 2012; 2013; Куликов и др., 2018].

Анализ разрезов сейсмических геотраверсов Евробридж'96–97 показывает, что в основании

западной окраины Сарматии, пересекаемой всеми тремя изучаемыми профилями МТ/МВ зондирований, располагается палеопротерозойская зона субдукции, представленная реликтами слэба Белорусского палеоокеана [Гарецкий, Каратаев, 2011; Bogdanova et al., 2015]. На основании этого можно предположить, что рассматриваемые нами аномалии электропроводности связаны с графитизированными и сульфидизированными метаосадками, накопленными в палеопротерозое в пределах желоба и континентального склона Сарматии. Их появление на больших глубинах объясняется процессами субдукции, когда кора Белорусского палеоокеана в процессе погружения увлекла за собой на большие глубины осадочные толщи, насыщенные органикой и карбонатными отложениями. Эти осадки испытали глубокий метаморфизм и в больших объемах трансформировались в сульфид- и графитсодержащие бластомилониты. На заключительных этапах развития в процессе коллизии литосферных плит произошло “перемешивание” графитсодержащих метаосадков с метаморфизованными комплексами океанической коры, а также магматическими образованиями активной окраины Сарматии (Осницко–Микашевичско–Московского пояса) и коллизионными интрузиями. Тектоническое “перемешивание” различных комплексов пород в результате коллизионных событий может объяснять изменчивость, а иногда и полное исчезновение аномалий на смежных геоэлектрических разрезах.

Восточные сегменты всех трех профилей пересекают выступ Курского блока в составе Сарматии. Здесь выявлены сечения Кирово-Барятинской коровой аномалии, являющейся северным продолжением Курской аномалии электропроводности, выделяемой вдоль Курской магнитной аномалии. Отмеченное изменение структуры Кирово-Барятинской аномалии с юга на север с существенным снижением ее интенсивности (рис. 7) на профиле ОВ указывает на близкое положение (под южным бортом Московской синеклизы) тектонического ограничения (сутуры) северной окраины Сарматии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье дано обобщение геолого-геофизических построений для области сочленения трех крупнейших сегментов ВЕП, учитывающее новые результаты, полученные за последние два десятилетия, и дающее значимую априорную информацию для получения и геологического истолкования новых результатов ЭМ зондирований в этой области.

Важнейшим результатом выполненных исследований стало формирование и приложение в регионе исследований эффективной стратегии при-

менения метода REBOCC для интерпретации комплекса МТ и МВ данных в сложных моделях с сильной интерференцией откликов поверхностных и глубинных проводящих структур. В рамках данного метода показаны преимущества последовательной схемы 2D-инверсии по сравнению с параллельным решением обратной задачи для всей совокупности МТ/МВ данных. Также показано, что использование априорных представлений о приповерхностной геоэлектрической структуре разреза (мощности проводящих осадков и их суммарной продольной проводимости) способствует лучшему разрешению глубинных проводящих структур, не затрудняя сходимость итераций инверсии. На нескольких синтетических наборах данных продемонстрировано, что схема последовательной 2D-инверсии МТ/МВ откликов, в которой на первом этапе инвертируются данные одной лишь TE моды, а на втором к инверсии добавляются данные TM моды, позволяет уверенно выявлять проводящие коровые аномалии под мощными осадочными структурами, преодолевая характерное для многих приложений метода REBOCC существенное размазывание коровых проводников на большие глубины [Иванов, Пушкарев, 2010; Варенцов и др., 2013; Бойченко и др., 2014; Logvinov, Tarasov, 2018].

Выполненные исследования показывают, что стратегия последовательной 2D-инверсии данных заслуживает дальнейшей апробации и развития с использованием различных методов инверсии и схем ее реализации. Приоритетным направлением таких исследований несомненно будет анализ синтетических данных (в том числе, осложненных разного рода помехами, как в работах [Варенцов, 2002; Varentsov et al., 2007; Varentsov, 2015b]) для моделей, имитирующих геоэлектрические обстановки различной сложности. Такой анализ весьма полезен при настройке методов профильной интерпретации для данных, полученных в специфических условиях конкретных регионов.

Полученные по методике последовательной 2D-инверсии геоэлектрические модели вдоль трех наиболее представительных профилей объединенных массивов зондирований SMOLENSK и KIROVOGRAD подтверждают структуру выявленной ранее Кирово-Барятинской коровой аномалии электропроводности и дают предварительное представление о коровых проводниках под Оршанской впадиной и изменениях их пространственной структуры между смежными профилями. Разрешение коровых проводящих структур на западном борту впадины ограничено низкой плотностью пунктов наблюдения. На самом северном профиле ОВ дополнительные трудности связаны с изменением его направления в пределах впадины вследствие смещения пунктов наблюдения на юг от электрифицированной желез-

ной дороги Смоленск–Орша–Минск и параллельных ей магистральных трубопроводов.

Степень 3D-искажений МТ/МВ данных в окрестности Оршанской впадины выше, чем на восточных частях рассмотренных профилей в пределах ВКМ. Соответственно, здесь целесообразен учет интенсивности этих искажений в процедурах 2D-инверсии [Varentsov, 2015a; 2015b] и особенно актуальна необходимость продолжения инверсии данных в 3D-моделях. Масштаб таких моделей должен быть достаточно большим для учета эффектов канализации приповерхностных токовых систем, связывающих Днепровско-Донецкую впадину с Московской синеклизой через Припятский и Оршанский осадочные бассейны. Такая работа разворачивается нами по представленной в данной статье схеме, начиная с анализа синтетических данных в имитационных моделях, включающих аппроксимацию реальной 3D-структуры проводящих осадков. Стратегии 3D-интерпретации будут вырабатываться на основе результатов инверсии серии синтетических ансамблей МТ/МВ данных. Ансамбль инвертируемых данных в ходе 3D-инверсии будет дополнен еще одним передаточным оператором – горизонтальным магнитным откликом [Варенцов и др., 2012; 2020; Varentsov, 2015a,b], не использованным в представленной работе в силу ограничений программы REBOCC.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования были поддержаны грантом РФФИ № 18-05-00733 и продолжены в рамках завершившейся темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН № 0144-2019-0021 и новой темы госзадания № FMWU-2022-0023, открытой в 2022 г., а также тем госзаданий ГИН РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают признательность академику РАН М.Г. Леонову, инициировавшему изучение геоэлектрического строения зоны тройного сочленения сегментов ВЕП в рамках проекта SMOLENSK и принявшему в нем активное участие. Авторы благодарят Рабочие группы SMOLENSK и KIROVOGRAD, включая наших коллег в Белоруссии, Украине и Чехии, за выполнение качественных синхронных МТ наблюдений, участие в их обработке и интерпретации, ценные обсуждения. Мы признательны МСЦ РАН за предоставленные вычислительные ресурсы для исследований по упомянутым выше проектам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксаментова Н.В. Магматизм и палеогеодинамика раннепротерозойского Осницко-Микашевичского вулcano-плутонического пояса. Минск: ИГН НАН Беларуси. 2002. 175 с.

- Алексанова Е.Д., Варенцов Ив.М., Куликов В.А. и др.* Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // *Геофизика*. 2013. № 2. С. 32–38.
- Астапенко В.Н.* Земная кора и мантия территории Беларуси по МТ-данным. Минск: Экономпресс. 2012. 208 с.
- Астапенко В.Н., Дубаневич М.А.* Базисная 3D-геоэлектрическая модель литосферы Беларуси // *Літасфера*. 2017. Т. 47. № 2. С. 80–92.
- Астапенко В.Н., Файнберг Э.Б.* Природа коровой аномалии электропроводности Белорусской антеклизы // *Физика Земли*. 1999. № 5. С. 54–60.
- Белявский В.В., Бухарович Т.К., Кулик С.Н., Сухой В.В.* ЭМ методы при изучении Украинского щита и Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Знание. 2001. 228 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. 680 с.
- Бердичевский М.Н., Голубцова Н.С., Варенцов Ив.М. и др.* Геоэлектрический разрез Центрального Тянь-Шаня: последовательная инверсия МВ и МТ данных вдоль профиля НАРЫН // *Физика Земли*. 2010. № 8. С. 54–61.
- Бойченко Д.А., Пушкарев П.Ю., Алексанова Е.Д. и др.* Одномерная и двумерная инверсия МТ данных на западном склоне Воронежской антеклизы // *Георазрез*. 2014. № 1-2014(14). С. 1–17.
- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю., Романюк Т.В.* Геоэлектрическая модель Каскадной зоны субдукции // *Физика Земли*. 2002. № 10. С. 23–53.
- Варенцов Ив.М.* Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // *Физика Земли*. 2002. № 11. С. 11–33.
- Варенцов Ив.М., Голубев Н.Г., Гордиенко В.В., Соколова Е.Ю.* Исследование глубинной геоэлектрической структуры вдоль профиля Линкольн Лайн (эксперимент EMSLAB) // *Физика Земли*. 1996. № 4. С. 124–144.
- Варенцов И.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др.* Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). К.: Логос. 2013. 118 с.
- Варенцов И.М., Грачёва Д.А., Лозовский И.Н.* Массив синхронных МТ-зондирований EarthScore: методика многоточечного оценивания передаточных операторов в активном регионе Кордильер на северо-западе США // *Геофизика*. 2020. № 4. С. 50–57.
- 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.
- Варенцов И.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др.* Синхронные МТ- и МВ-зондирования на западном склоне Воронежского массива // *Геоф. журн.* 2012. Т. 34. № 4. С. 90–107.
- Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Лозовский И.Н.* Развитие методики квази-3D инверсии МВ данных. Материалы 44-й сессии Межд. семинара им. Д.Г. Успенского. М.: ИФЗ РАН. 2017. С. 84–89.
- Варенцов И.М., Соколова Е.Ю., Мартанус Е.Р. и др.* Методика построения передаточных операторов ЭМ-поля для массива синхронных зондирований BEAR // *Физика Земли*. 2003. № 2. С. 30–61.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И.* Слободский тектоно-геодинамический узел Восточно-Европейской платформы // *Літасфера*. 2009. Т. 31. № 2. С. 50–66.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И.* Тектоногеодинамическая модель сочленения Фенноскандинавского и Сарматского сегментов Восточно-Европейской платформы // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 10. С. 1557–1566.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И.* Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Белорусская наука. 2014. 120 с.
- Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Голобоков С.В., Данкевич И.В.* Глубинное строение Центрально-Белорусской шовной зоны по геофизическим данным // *Літасфера*. 2006. Т. 24. № 1. С. 101–112.
- Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г.* “Структуры омота” – новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // *Докл. РАН*. 2018. Т. 478. № 5. С. 546–550. <https://doi.org/10.7868/S0869565218050110>
- Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и ТАТСЕЙС: В 2 т. / А.Ф. Морозов (гл. ред.). М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС. 2010. Т. 2. 400 с.
- Жамалетдинов А.А., Кулик С.Н.* Крупнейшие аномалии электропроводности мира // *Геофиз. журнал*. 2012. Т. 34. № 4. С. 22–39.
- Иванов П.В., Пушкарёв П.Ю.* Возможности интерпретации МТ-данных, полученных на одиночном профиле, при изучении 3D-неоднородной среды // *Физика Земли*. 2010. № 9. С. 3–10.
- Иванов П.В., Пушкарёв П.Ю.* 3D-инверсия рассчитанных на одиночном профиле МТ-данных // *Физика Земли*. 2012. № 11–12. С. 91–96.
- 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>
- 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>
- Кудельский А.В.* Высокоминерализованные воды и рассолы в верхнепротерозойских отложениях и кристаллическом фундаменте древних платформ (на примере Восточно-Европейской платформы и территории Беларуси) // *Літасфера*. 2005. Т. 2(23). С. 9–21.

- Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов И.М. и др. Баятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных МТ-исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.
- Миц М.В. Объемная модель глубинного строения раннедокембрийской коры Восточно-Европейского кратона, палеогеодинамические следствия // Геотектоника. 2011. № 4. С. 3–29.
- Нагорный М.А. Тектоника Оршанской впадины // Литасфера. 2009. № 2(31). С. 67–74.
- Разломы земной коры Беларуси / Под ред. Айзберга Р.Е. Минск: Красико-Принт. 2007. 372 с.
- Роктянский И.И. Геофизические методы магнитовариационного зондирования и профилирования. Киев: Наукова думка. 1972. 226 с.
- Роктянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наукова думка. 1975. 296 с.
- Bogdanova S., Gorbatshev R., Skridlaite G. et al. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna // Precambrian Res. 2015. V. 259. P. 5–33.
https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.023
- Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbachev R., Orlyuk M.I. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic crustal boundaries in the basement of the East European Craton: geology and geophysics // Tectonophysics. 1996. V. 268. P. 1–21.
https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00232-6
- Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic shield // Precambrian Res. 1993. V. 64. P. 3–21.
https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90066-B
- Logvinov I.M., Tarasov V.N. Electric resistivity distribution in the Earth's crust and upper mantle for the southern East European Platform and Crimea from area-wide 2D models // Acta Geophys. 2018. V. 66. P. 131–139.
https://doi.org/10.1007/s11600-018-0125-2
- Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data // Geophysics. 2000. V. 65(3). P. 791–803.
https://doi.org/10.1190/1.1444778
- Varentsov I.V. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion / Spichak V.V. (ed.) Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior. V. 40. Amsterdam: Elsevier. 2015a. P. 271–299.
https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00010-6
- Varentsov I.V. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets / Spichak V.V. (ed.) Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior, V. 40. Amsterdam: Elsevier. 2015b. P. 191–229.
https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00008-8
- Varentsov I.V., Baglaenko N., Sokolova E., EMTESZ-Pomerania WG. 2D inversion resolution in the EMTESZ-Pomerania project: data simulation approach. Protokoll über das 22. Kolloquium "EM Tiefenforschung" / O. Ritter, H. Brasse (eds.) Potsdam: Dtsch. Geophys. Ges. 2007. P. 143–150.

Deep Electrical Conductivity in the Vicinity of the Orsha Depression: 2D REBOCC Inversion of the Synthetic and Measured Magnetotelluric Data

P. V. Ivanov^{a, *}, I. V. M. Varentsov^{a, **}, S. Yu. Kolodyazhnyi^{b, ***}, I. N. Lozovsky^a,
P. Yu. Pushkarev^c, and T. A. Rodina^a

^a*Geoelectromagnetic Research Center, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

^b*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: pavel.vl.ivanov@gmail.com

**e-mail: ivan_varentsov@mail.ru

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

The geoelectric structure of the junction between the three largest segments of the East European Platform (EEP)—Volga—Uralia, Sarmatia, and Fennoscandia—is investigated. The main study object is the electrical conductivity anomalies within the Orsha depression. The technique of synchronous areal magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) sounding of the Earth's crust is used. The study is based on the data of deep MT/MV soundings obtained in 2018–2020 in the SMOLENSK experiment in the vicinity of the Orsha depression and the materials of the similar studies collected since 2007 in the previous KIROVOGRAD experiment east of this region, on the slope of the Voronezh crystalline massif (VCM). The data were interpreted in the class of two-dimensional (2D) geoelectrical models which are constructed along the large latitudinal profiles combining the soundings of the SMOLENSK massif in the western part and the KIROVOGRAD massif to the east. The joint 2D inversion of the MT and MV responses is conducted using a widely known REBOCC program. The interpretation of the MT/MV data within the Orsha depression is substantially challenged by intricate interference of deep and near-surface responses. The latter are determined by current systems within the conductive sedimentary cover whose thickness reaches ~2 km in the central part of the depressions and the total longitudinal conductance is ~1000 S. The quasi-three-dimensional (3D) near-surface effects mask the responses from crustal conductive structures in a wide range of periods and seriously obstruct their study in the 2D interpretation of impedance data. A significant role in overcoming these difficulties is played by the MV tipper data which are immune to near-surface distortions. To develop a strategy of joint in-

interpretation of the combination of MT/MV data, we carried out the experiments with the inversion of synthetic data calculated in a series of 2D models simulating probable geoelectric structure of the study region. The numerical experiments have shown the efficiency of using the REBOCC inversion in the two-stage scheme of the successive 2D-inversion in which at the first stage only the electric (TE) mode of the MT/MV data are considered, and then at the second stage, the impedance data of the magnetic (TM) mode are involved. This technique reliably identifies deep conductive structures beneath thick sedimentary strata. The importance of using the a priori information about the geoelectric structure of the sedimentary cover when constructing the starting model of the inversion is demonstrated. The strategy of the joint 2D inversion developed on the synthetic MT/MV data was used to interpret the observations along three composite profiles covering the SMOLENSK and KIROVOGRAD massifs. The interpretation refined the structure of the Kirov–Baryatino crustal anomaly on the VCM western slope, revealed the complex architecture of crustal anomalies beneath the Orsha depression, and allowed preliminary conclusions about the nature of these conductivity anomalies and their connection with ancient and recent geodynamic processes.

Keywords: East European platform, Slobodskii tectono-geodynamic knot, Sarmatia, Fennoscandia, suture zones, Orsha depression, geoelectrics, magnetotellurics, 2D modeling and inversion, crustal conductivity anomalies, starting and a priori electrical conductivity models