

УДК 550.837.21

МАССИВ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ SMOLENSK: ИЗУЧЕНИЕ ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЫ ОБЛАСТИ ТРОЙНОГО СОЧЛЕНЕНИЯ КРУПНЕЙШИХ СЕГМЕНТОВ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Ив.М. Варенцов¹, П.В. Иванов¹, А.П. Ионичева², С.Ю. Колодяжный³, В.А. Куликов²,
М.Г. Леонов³, И.Н. Лозовский¹, П.Ю. Пушкарев², Т.А. Родина¹, Н.Л. Шустов²,
Н.В. Баглаенко¹, Е.И. Гамза¹, О.Ю. Тихомирова¹

¹ Центр геоэлектromагнитных исследований – филиал ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта. 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, а/я 30; e-mail: ivan_varentsov@mail.ru

² Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 119234, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы; e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

³ Геологический институт РАН. 119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 1; e-mail: kolod@ginras.ru

Аннотация. В 2018–2020 гг. в зоне тройного сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы (Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии) выполнен новый масштабный проект глубинных электромагнитных (ЭМ) зондирований литосферы, получивший название SMOLENSK. Исследования велись на территории Смоленской, Тверской и Псковской областей России, а также Витебской, Могилевской и Минской областей Белоруссии. Применялась современная технология синхронных магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) исследований с опорой на региональную сеть геомагнитных обсерваторий, эффективно подавляющая индустриальные ЭМ-помехи. За три года проведено более 50 длиннопериодных зондирований с глубиной, превышающей 100 км, и более 40 зондирований в разведочном диапазоне периодов с коровой глубиной. Новые данные, интегрированные с результатами предшествующих исследований, существенно расширили на северо-запад массив синхронных зондирований KIROVOGRAD, построенный в 2007–2015 гг. на Воронежской антеклизе и прилегающих территориях.

Главными задачами геофизического эксперимента SMOLENSK стали изучение корово-мантийной геоэлектрической структуры, сильно маскируемой ЭМ-откликами осадочных бассейнов, и определение региональных трендов распределения суммарной продольной проводимости осадков в пределах Оршанской впадины и юго-западной части Московской синеклизы.

В первой части статьи обсуждаются региональные особенности геолого-геофизического строения, результаты предшествующих ЭМ-наблюдений и методика проведения синхронных МТ/МВ-зондирований. Далее анализируется качество полученных передаточных операторов ЭМ-поля (импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика), представляются карты и псевдоразрезы их важнейших компонент и инвариантов, обсуждаются проявляющиеся аномалии приповерхностной и глубинной природы и сложный характер их интерференции. В завершающей части статьи формулируется стратегия дальнейшей интерпретации полученных данных с применением методов совместной инверсии МТ/МВ-откликов в профильных (2D), многоплечных площадных (квази-3D) и объемных (3D) моделях.

Ключевые слова. Восточно-Европейская платформа, Сарматия, Фенноскандия, Волго-Урاليا, осадочные бассейны, авлакогены, шовные зоны, аномалии электропроводности, магнитотеллурический и магнитовариационный методы, синхронные зондирования, оценивание передаточных операторов.

ARRAY OF MAGNETOTELLURIC SOUNDINGS SMOLENSK: A DEEP STRUCTURE STUDY OF THE TRIPLE JUNCTION ZONE OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM'S LARGEST SEGMENTS

Iv.M. Varentsov¹, P.V. Ivanov¹, A.P. Ionicheva², S.Yu. Kolodyazhny³, V.A. Kulikov², M.G. Leonov³,
I.N. Lozovsky¹, P.Yu. Pushkarev², T.A. Rodina¹, N.L. Shustov², N.A. Baglaenko¹, E.I. Gamza¹,
O.Yu. Tikhomirova¹

¹ Geoelectromagnetic Research Centre – branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. P.O.B. 30, Troitsk, Moscow, Russia, 108840; e-mail: ivan_varentsov@mail.ru

² Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Lenin Hills, GSP-1, Moscow, Russia, 119234; e-mail: pavel_pushkarev@list.ru

³ Geological Institute, Russian Academy of Sciences. Pyzhevsky lane 7, bld. 1, Moscow, Russia, 119017; e-mail: kolod@ginras.ru

Abstract. In 2018–2020, a new large-scale SMOLENSK project of deep electromagnetic (EM) soundings of the lithosphere was implemented in the triple junction area of the largest East European platform segments (Fennoscandia, Volga-Uralia, and Sarmatia). These measurements were carried out on the territory of Smolensk, Tver, and Pskov Russian regions, and Vitebsk, Mogilev, and Minsk regions of Belorussia. The modern technology of simultaneous magnetotelluric (MT) and magnetovariational (MV) surveying was applied, supported by the data from the geomagnetic observatories, providing the effective suppression of industrial EM noises. Over three years, more than 50 long-period soundings with a penetration depth exceeding 100 km and more than 40 broadband soundings with a crustal depth range were carried out. The new data were integrated with the results of previous studies and gave a valuable northwestern extension of the KIROVOGRAD array of simultaneous soundings, completed in 2007–2015 within the Voronezh Massif and adjacent territories.

The major objectives of the SMOLENSK geophysical experiment were to study the crust-mantle geoelectric structure, strongly masked by EM responses of sediments, and to clarify the regional trends of the sedimentary cover conductance within the Orsha depression and the southwestern part of the Moscow syncline.

The first section of the paper gives the overview of geological and geophysical regional structure, outlines the preceding EM observations and the methodology of simultaneous MT/MV soundings. Next, we analyze the quality of the obtained EM field transfer operators (impedance, tipper, and horizontal MV response), present the maps and pseudo sections of their most important components and invariants, and discuss the revealed near-surface and deep anomalies and the complex nature of their interference. The paper is concluded with a strategy of the joint interpretation of MT/MV responses using the inversion techniques within the profile (2D), multi-sheet (quasi-3D), and volume (3D) models.

Key words. East European platform, Sarmatia, Fennoscandia, Volgo-Uralia, sedimentary basins, aulacogens, suture zones, conductivity anomalies, magnetotelluric and magnetovariational methods, simultaneous soundings, transfer operator estimation.

ВВЕДЕНИЕ. Детальное исследование строения древних шовных зон и областей современной активизации платформенных структур позволяет выявить особенности их развития, сделать выводы о современной динамике деформирования геологической среды и оценить минерагенический потенциал региона. Одним из важнейших объектов такого анализа представляется зона тройного сочленения крупнейших сегментов земной коры Восточно-Европейской платформы (ВЕП) – Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии, расположенная на белорусско-русской территории западнее и севернее Смоленска (рис. 1) вдоль развитой системы авлакогенов [Гарецкий, 2007; Гарецкий, Каратаев, 2011, 2014; Bogdanova et al., 2016; Гарецкий, Леонов, 2018]. Обширная библиография геолого-геофизических исследований в пределах сходящихся сегментов этого сочленения представлена в монографии [Астапенко, 2012].

Ведущая роль геофизических методов в данном контексте связана с изучением состояния корово-мантийного вещества и выявлением его глубинных неоднородностей, а также прослеживанием сходств и различий в положении структур, связываемых с процессами сочленения, на различных этапах тектоносферы. Область исследований весьма неравномерно и в целом явно недостаточно изучена глубинными геофизическими методами [Астапенко, 2012]. Здесь отсутствуют геотраверсы ГСЗ и глубинные построения в большинстве случаев основаны на гравимагнитных данных и нескольких сейсмических разрезах МОВ. Тепловой поток на СВ Белоруссии (однородный и низкий – < 35 мВт/м²) ограничивает присутствие корово-мантийных неоднородностей термической природы.

В этих условиях важнейшим средством изучения глубинного строения литосферы стали МТ- и МВ-зондирования, обладающие высокой чувствительностью к аномальному флюидному, термическому и реологическому состоянию корово-мантийного вещества и формациям, насыщенным минералами с электронной проводимостью (графитом, сульфидами и т.п.). В начале 1990-х гг. более ста локальных МТ/МВ-зондирований было выполнено на востоке Белоруссии (рис. 2, мелкие значки), их результаты обобщены в работах [Астапенко, 2008, 2012; Астапенко, Дубаневич,

2017]. Несмотря на ограниченные возможности примененной технологии ЦЭС-2, полученные материалы оказались весьма информативными и позволили выделить ряд геоэлектрических аномалий в осадочном чехле, консолидированной коре и литосферной мантии. Наиболее плотные

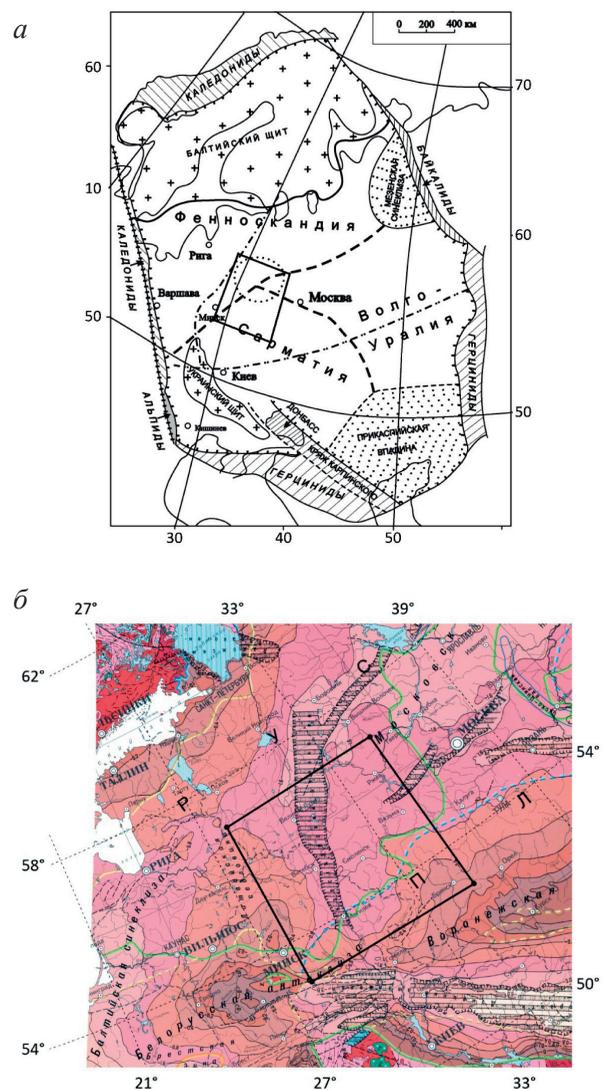


Рис. 1

Тектонические схемы зоны сочленения крупнейших сегментов ВЕП, черный контур – регион исследований проекта SMOLENSK: а – по [Гарецкий, 2007], кругом из точек показан Слободской геодинамический узел; б – фрагмент карты [Милановский, 2006], полосовая штриховка выделяет авлакогены

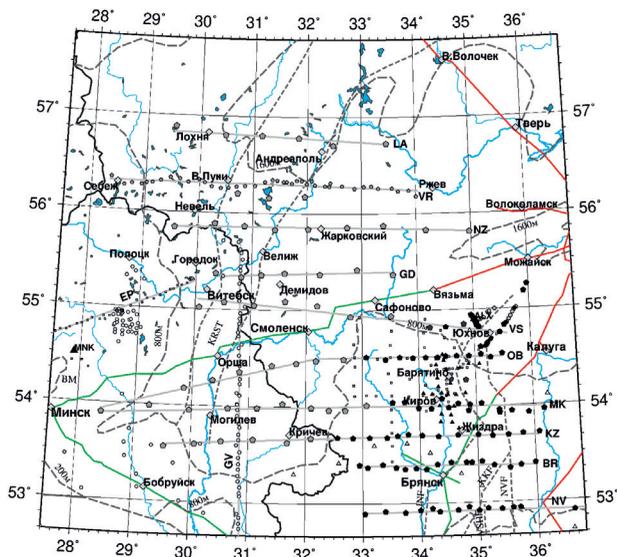


Рис. 2

Массив MT/MB-зондирований SMOLENSK и прилегающая часть массива KIROVOGRAD:

пятиугольники – синхронные MT/MB-зондирования (темно-серые – SMOLENSK, черные – KIROVOGRAD); большие черные треугольники – геомагнитные обсерватории, другие меньшие значки – локальные MT/MB-зондирования; пунктиры – изолинии мощности осадков (200, 800 и 1600 м) и границы Крестцовского авлакогена [Милановский, 2006], а также глубинные разломы (INF, KKF, VSHF, NVF [Варенцов и др., 2012]); зеленые линии – ж/д, электрифицированные на переменном токе, красные – на постоянном токе; серые линии – профили синхронных MT/MB-зондирований проекта SMOLENSK (с юга на север): Кричев – Жидра (KZ), Могилев – Киров (МК), Орша – Барятино (ОВ), Витебск – Сафоново (VS), Городок – Демидов (GD), Невель – Жарковский (NZ), Себеж – Великие Луки – Ржев (VR), Лохня – Андреаполь (LA)

данные получены вдоль профиля Гомель – Витебск (GV, рис. 2) [Астапенко, 2012]. Распределение кажущегося сопротивления в окрестности профиля GV на длинных (> 1000 с) периодах выявило проводящую Оршанскую аномалию (ОршА) в пределах одноименной впадины, представляющей заливом Московской синеклизы, очерчиваемым изолинией мощности осадков 800 м (рис. 1, б, 2). Одномерная инверсия MT-данных в пределах ОршА допустила наличие проводящих корово-мантийных структур [Астапенко, Дубаневич, 2017]. Присутствие корового проводника с суммарной продольной проводимостью ~1000 См в центре Оршанской впадины (в интервале 53,7–54,3°N вдоль меридиана 31°E) показала и квази-3D инверсия MB-данных, включавшая данные типпера на GV [Варенцов и др., 2017]. Построенная квази-3D модель выделила и вторую аномалию вдоль 31°E – севернее 54,7°N с продольной проводимостью 1000–3000 См. В работах [Рокитянский и др., 1982; Астапенко, 2008] по данным MB-зондирований советского

периода также предполагается северное продолжение ОршА в район восточнее оз. Ильмень.

Изучаемая зона сочленения сегментов ВЕП примыкает к СЗ-части массива MT/MB-зондирований международного проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012, 2013, 2017; Varentsov, 2015b; Куликов и др., 2018], реализованного в 2007–2015 гг. на западной части Воронежской антеклизы и прилегающих территориях с применением современных технологий синхронного наблюдения ЭМ-полей, помехоподавляющих процедур обработки данных и 2D/3D-методов их интерпретации. Исследования проекта были нацелены на изучение корово-мантийных аномалий электропроводности, связанных с докембрийскими шовными зонами и областями современной платформенной активизации, а также – региональных трендов суммарной продольной проводимости осадочных структур. Результаты более 200 новых синхронных зондирований были интегрированы с данными более 400 локальных наблюдений прошлых лет, что обеспечило достаточно равномерное покрытие обширной территории (49–55°N, 32–38°E) со сгущением наблюдений в окрестности выявленных коровых проводящих аномалий.

Опыт проведения глубинных зондирований проекта KIROVOGRAD позволил в 2017 г. поставить задачу его существенного расширения на СЗ в зону сочленения крупнейших сегментов ВЕП. Новый эксперимент глубинных геофизических зондирований SMOLENSK [Ivanov et al., 2018; Варенцов и др., 2020б] предполагал проведение синхронных площадных MT/MB-зондирований в области (53–57°N, 28–35°E, рис. 2), поддержанных сейсмологическими зондированиями методом приемных функций, а также спутниковыми магнитными и наземными структурно-кинематическими геодиническими наблюдениями.

Первостепенными целевыми объектами исследования стали раннепротерозойские шовные зоны с проводящими метаосадками, аналогичные выделенным на Воронежском кристаллическом массиве (ВКМ); особенности строения Вольно-Оршанской и Среднерусской систем позднепротерозойских авлакогенов и общая конфигурация осадочных бассейнов. На рис. 1, а цепь авлакогенов севернее Могилева показана в виде единой Крестцовской структуры [Милановский, 2006]. В современных построениях [Bogdanova et al., 2016; Колодяжный, 2018] в этой области, а также между ней и Рязано-Саратовским авлакогеном выделяется серия линейных грабенов меньшего масштаба, требующая детализации геофизическими методами. Планируемые ЭМ-зондирования позволяли изучать неоднородности литосферной мантии, в то время как выделение астеносферных структур было ограничено недостаточной длительностью и, соответственно, глубиной зондирований.

Методика синхронных МТ/МВ-зондирований эксперимента SMOLENSK

В 2018–2020 гг. длиннопериодными станциями LEMI-417V (ЛЦ ИКИ НАНУ, г. Львов) выполнены 54 глубинных МТ/МВ-зондирования проекта SMOLENSK – темно-серые пятиугольники (рис. 2) вдоль семи широтных профилей (с юга на север): Кричев – Жиздра (KZ), Могилев – Киров (МК), Орша – Бяратино (ОВ), Витебск – Сафоново (VS), Городок – Демидов (GD), Невель – Жарковский (NZ) и Лохня – Андреаполь (LA). Регистрация пяти компонент ЭМ-поля проводилась в течение двух суток с шагом дискретизации 1 с, используя феррозондовые магнитометры и электрические приемные линии (длиной 100 м) с графитовыми неполяризуемыми электродами. Горизонтальные датчики ориентировались по осям геомагнитных координат, дополнительно измерялось магнитное склонение.

Обработка данных выполнена по мульти-RRMC методике, основанной на оценивании передаточных операторов с использованием серии удаленных базовых пунктов, контроле горизонтальной изменчивости вариаций магнитного поля и многоуровневом робастном осреднении [Варенцов и др., 2003, 2020a; Varentsov, 2015b]. Используются секундные записи геомагнитных обсерваторий (KIV, BEL, BOX, HLP, MHV, NUR и UPS) и стационарного пункта ALX (геофизическая база МГУ, д. Александровка, Калужская обл.) и минутные записи самой близкой обсерватории MNK. Многоточечная обработка позволила получить качественные оценки передаточных операторов ЭМ-поля: импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика (относительно KIV) для периодов от 10–30 до 7 000–10 000 с [Варенцов и др., 2020б], характеризующие геоэлектрическую структуру тектоносферы на глубинах от сотен метров до 150–200 км. Итоговые передаточные операторы с учетом магнитного склонения представлены в географических координатах.

На рис. 3 представлены оценки импеданса в п. ОВ5, расположенном в центре Оршанской впадины. Результаты, полученные с использованием синхронных данных в различных удаленных пунктах, хорошо согласуются (рис. 3, а) и после робастного мульти-RRMC осреднения позволяют получить гладкие кривые для периодов 5–10 000 с (рис. 3, б). Кривые поперечного (yx) кажущего сопротивления, начиная с сотен секунд, показывают яркий эффект проводящей ОршА. Пункт ОВ5 лежит на пересечении профилей ОВ и GV (рис. 2). Кривые кажущего сопротивления и фазы импеданса, полученные по соседним новому (п. ОВ5) и старому (п. АГ39) зондированиям, вполне удовлетворительно совпадают, при этом доверительные интервалы новых данных значительно меньше (рис. 3, б).

Рис. 4 показывает в п. ОВ5 оценки горизонтального МВ-отклика относительно KIV.

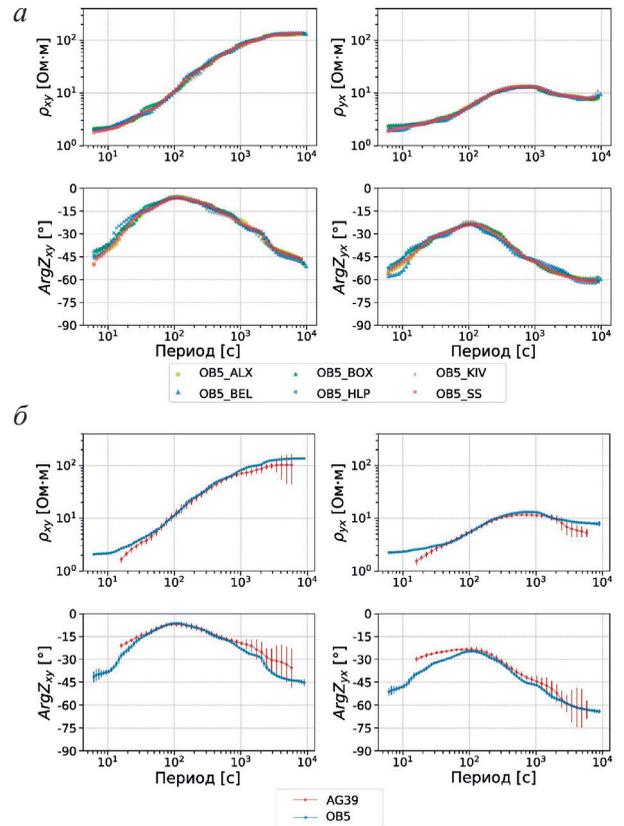


Рис. 3
Кривые кажущего сопротивления и фазы главных компонент импеданса: а – в п. ОВ5, расположенном в центре Оршанской впадины; кривые получены по синхронной RRMC-технологии с использованием различных удаленных баз (индексы ALX, BOX, KIV, BEL и HLP), индекс SS – одноточечная оценка; б – итоговые (мульти-RRMC) кривые в п. ОВ5 в сопоставлении с одноточечными оценками в ближайшем п. АГ39 профиля GV, выполненного в начале 1990-х гг.

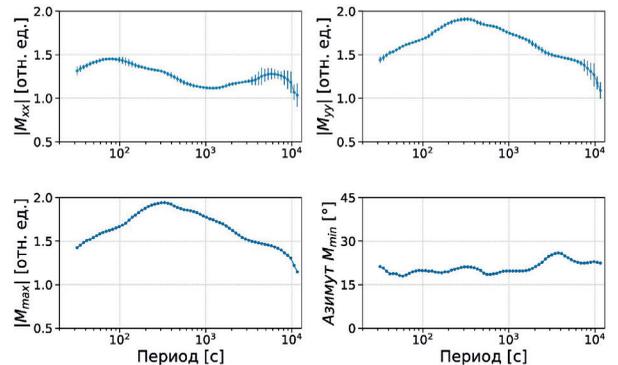


Рис. 4
Оценки горизонтального МВ-отклика в п. ОВ5 относительно обсерватории KIV: амплитуды главных компонент с погрешностями, максимальные амплитуды и азимуты минимальной амплитуды

Положительные аномалии амплитуды восточной (yy) компоненты и максимальной амплитуды [Varentsov, 2015b] превышают уровень 80% на периодах 200–500 с. Азимуты минимальной амплитуды показывают устойчивое ССВ-направление ($20\text{--}25^\circ$) доминирующих токов в окрестности пункта зондирования.

Дополнительно в 2020 г. вдоль широтного профиля Себеж – В. Луки – Ржев (VR) выполнено 41 МТ/МВ-зондирование в разведочном диапазоне периодов (рис. 2, малые темно-серые пятиугольники) [Куликов и др., 2021]. Регистрация пяти компонент ЭМ-поля проводилась новыми станциями МЭРИ-ПРО (ООО «Северо-Запад», г. Москва), электрические измерения велись с графитовыми электродами на линиях длиной 80 м, магнитные – индукционными датчиками IMS-10 (ООО «Вега», г. Санкт-Петербург). Станции ориентировались по магнитному меридиану, длительность зондирований составляла ~ 20 ч. В результате синхронной обработки получены гладкие оценки передаточных операторов для периодов от 0,001 до 2000–4000 с. Такой формат зондирования обеспечил повышенную плотность профильных наблюдений и позволил детальнее изучить осадочные структуры при снижении максимальной глубинности исследований до 100 км.

Верификация измерений с различными типами аппаратуры проведена в п. NV4 (в 25 км к ЮВ от Невеля, рис. 2). Достигнуто вполне удовлетворительное совпадение оценок всех получаемых передаточных операторов по суточным записям станций LEM1-417V и МЭРИ-ПРО в общем диапазоне периодов 10–4000 с.

Обзор МТ/МВ-данных расширенного массива KIROVOGRAD

Карты компонент и важнейших инвариантов передаточных операторов

Для расширенного массива зондирований KIROVOGRAD, включающего результаты проекта SMOLENSK, построены новые карты компонент и важнейших инвариантов МТ/МВ передаточных операторов. На рис. 5 приведена карта изолиний суммарной приповерхностной продольной проводимости S . Она основана на асимптотических оценках S по эффективному кажущемуся сопротивлению в пунктах МТ-зондирований на периодах 1–64 с. Полученные значения изменяются от первых единиц в пределах ВКМ и Белорусской антеклизы до ~ 3000 См в Днепровско-Донецкой впадине, Рязано-Саратовском и Крестцовском авлакогенах (рис. 1, б). Существенно уточнилась геоэлектрическая структура Оршанской впадины, особенности ее сочленения со структурами Московской, Припятской и Днепровско-Донецкой впадин, а также северный контур ВКМ.

Осадочный чехол Оршанской впадины включает два основных структурных этажа: фанерозойский – с мощностью до 500–700 м и средним

сопротивлением ~ 100 Ом·м и позднепротерозойский (вендско-рифейский) – с мощностью до 1–1,2 км и сопротивлением, падающим в пределах терригенных формаций до 1 Ом·м из-за присутствия соленых вод с концентрацией в центре впадины до 170 г/л. Максимальная мощность осадков приближается к 2 км. Приповерхностную продольную проводимость увеличивает верхняя измененная и содержащая концентрированные рассолы часть фундамента мощностью в сотни метров и сопротивлением ниже 10 Ом·м [Астапенко, 2012]. Приведенные оценки объясняют уровень S , превышающий 1000 См. Изолиния S в 300 См на рис. 5 хорошо соответствует изолинии 800 м мощности осадков. Севернее, на входе в Московскую синеклизу, мощности проводящих осадочных формаций растут – в центре профиля LA достигается $S \sim 3000$ См.

На рис. 6 представлены карты изолиний эффективной и поперечной (yx) компонент кажущегося сопротивления для периода 2500 с, обеспечивающего проникновение ЭМ-поля на глубину не менее 100 км. На рис. 7 для периодов 200 и 2500 с показаны карты изолиний максимальных амплитуд горизонтального МВ-отклика [Varentsov, 2015b]. Горизонтальные МВ-отклики, первично определенные относительно KIV, пересчитаны к интерпретационной базе BAVN, расположенной западнее Брянска вне заметных проводящих аномалий. На рис. 7 также вынесены повернутые на 90° эллипсы экстремальных амплитуд аномальной части горизонтального МВ-оператора, указывающие в пределах проводящих структур на их простирание и 2D/3D-размерность [Varentsov, 2015b], и действительные векторы индукции.

Представленные карты (рис. 6, 7) заметно уточняют структуру длиннопериодной ОршА. На картах кажущегося сопротивления отчетливо видна седловина на широте $55,5^\circ\text{N}$, отделяющая аномалию под Оршанской впадиной от более интенсивной северной, лежащей уже в пределах Московской синеклизы (к СВ от Великих Лук) и, вероятно, продолжающейся далее на север вдоль Крестцовского авлакогена (рис. 1, б). ОршА наиболее ярко проявляется в поперечной (yx) компоненте кажущегося сопротивления (рис. 6, б), отражающей вклад меридиональных токов, текущих через Оршанскую впадину.

Отметим сложность интерпретации представленных импедансных данных, связанную с существенной интерференцией приповерхностных откликов от проводящих осадочных структур с глубинными, определяемыми корово-мантийными проводниками. В такой ситуации необходимо в полной мере использовать свойство иммуности МВ-данных к приповерхностным искажениям [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Особое значение имеют амплитудные данные горизонтального МВ-отклика, прямо картирующие доминирующие субгоризонтальные токовые системы [Varentsov,

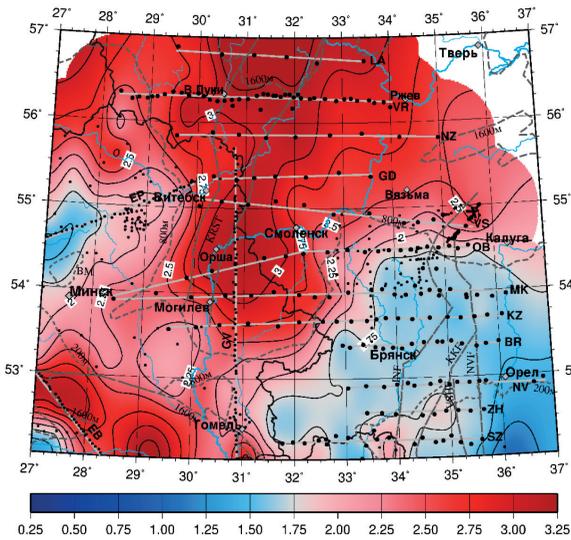


Рис. 5

Карта изолиний приповерхностной суммарной продольной проводимости (См, Ig-масштаб): большие черные кружки – синхронные зондирования, малые – локальные, прочая легенда, как на рис. 2

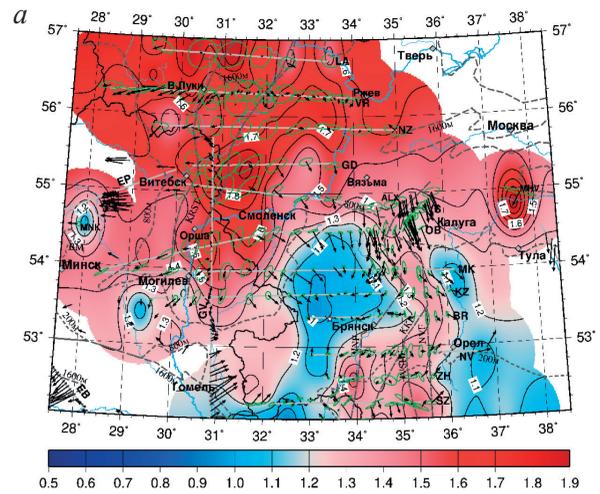


Рис. 7

Карты изолиний максимальной амплитуды горизонтального МВ-отклика (отн. базы BAVN, показанной белой звездочкой) для периодов 200 с (а) и 2500 с (б); на карты наложены зеленые эллипсы экстремальных амплитуд аномальной части горизонтального МВ-отклика (повернутые на 90°) и черные действительные векторы индукции; прочая легенда, как на рис. 2

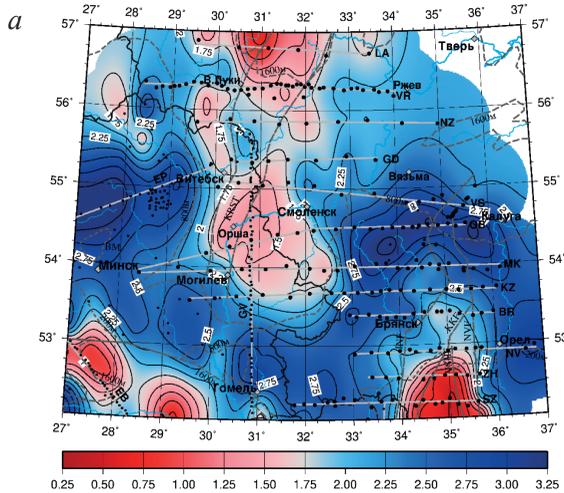
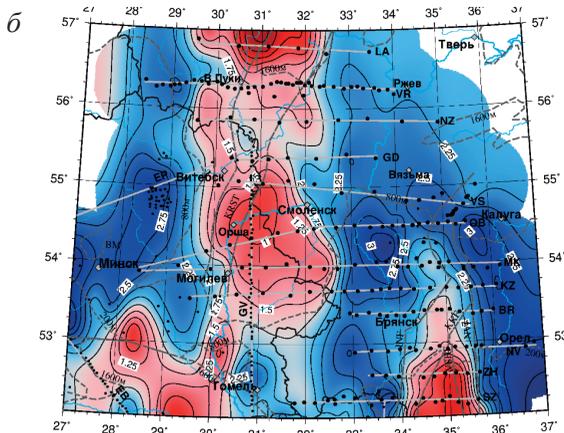


Рис. 6

Карты изолиний кажущегося сопротивления (Om-м, Ig-масштаб) для периода 2500 с: а – эффективное, б – ux; легенда, как на рис. 2



2015b]. Длинные тонкие эллипсы экстремальных амплитуд в пределах Оршанской впадины (рис. 7) указывают на присутствие квази-2D проводящих структур, простирающихся с отклонением от севера на восток до 10–15°. Более длинные, но широкие эллипсы севернее сохраняют данное простирание, но свидетельствуют о возросшей трехмерности откликов в результате веерного растекания аномальных токовых систем по Московской синеклизе. Двухмерность эллипсов на длинных периодах (2500 с, рис. 7, б) заметно выше, чем на средних (200 с, рис. 7, а), что указывает на вероятное присутствие линейных коровых проводящих структур вдоль Крестцовского авлакогена севернее Могилева. Индукционные векторы, ориентация которых в значительной степени обусловлена конфигурацией осадочных бассейнов, здесь направлены от квази-2D проводящих аномалий перпендикулярно их осям.

Псевдоразрезы компонент передаточных операторов вдоль широтных профилей

На рис. 8 показаны псевдоразрезы компонент МТ/МВ-данных вдоль профиля МК, используемых в ходе 2D-инверсии. Они включают кажущиеся сопротивления и фазы импеданса для двух поляризаций поля (компоненты x_y отвечают E -поляризации, а y_x – H -поляризации), компоненты W_{zy} типпера и M_{yy} горизонтального МВ-оператора. Импедансные фазы взяты из фазового тензора импеданса [Бердичевский, Дмитриев, 2009; Varentsov, 2015b], исключая независимые от периода гальванические искажения.

Псевдоразрез кажущегося сопротивления в H -поляризации демонстрирует в пределах Оршанской впадины проводящую структуру в виде «песочных часов», отражающую разделение короткопериодных и длиннопериодных откликов. Такой эффект, однако, может указывать и на особенности канализации приповерхностных токов, перетекающих из Днепрово-Донецкой и Припятской впадин через Оршанскую впадину в Московскую синеклизу. Кажущиеся сопротивления не показывают существенных приповерхностных гальванических искажений. Псевдоразрезы импедансных фаз не содержат явных эффектов разделения поверхностных и глубинных откли-

ков. Псевдоразрезы МВ-данных также выражают сложную суперпозицию этих откликов и в первую очередь отмечают профильное и глубинное положение центров доминирующих токовых систем, их интенсивность и пространственный масштаб. В целом все псевдоразрезы характеризуются квази-2D размерностью и хорошим качеством данных, позволяющим прояснить структуру глубинных проводящих объектов в ходе совместной 2D-инверсии всех компонент МТ/МВ-данных с учетом их погрешностей и степеней 3D-искаженности. Аналогичные псевдоразрезы вдоль профилей VS, GD, NZ, OB и KZ по структуре близки к показанным для профиля МК, однако по мере удаления от центра Оршанской впадины интенсивность аномалий на них возрастает к северу и снижается к югу.

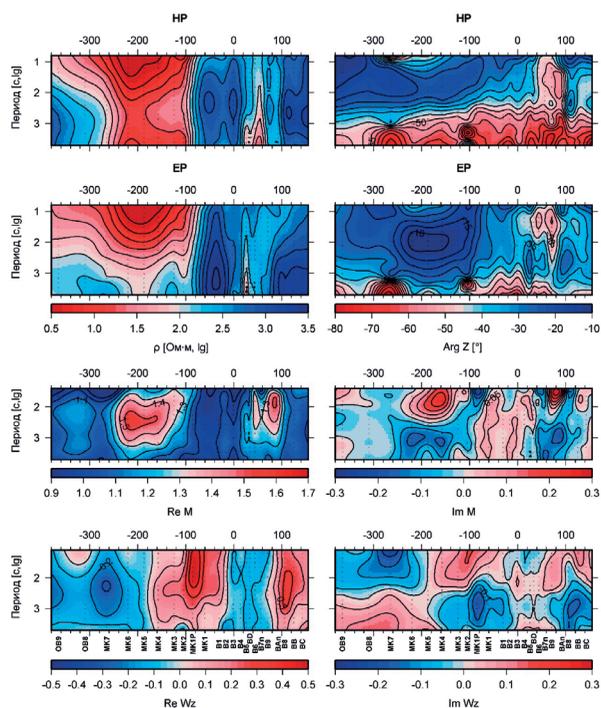


Рис. 8

Псевдоразрезы восьми компонент МТ/МВ-данных, подготовленных для совместной инверсии 2D+ на профиле МК (рис. 2), сверху вниз: кажущиеся сопротивления (ρ) и фазы импеданса (из фазового тензора, $Arg Z$) для двух поляризаций поля (HP и EP), горизонтальный МВ-отклик (M) и типпер (Wz). Начало профильных координат (в км) здесь и на рис. 9 – на меридиане 34°N, запад – слева, восток – справа

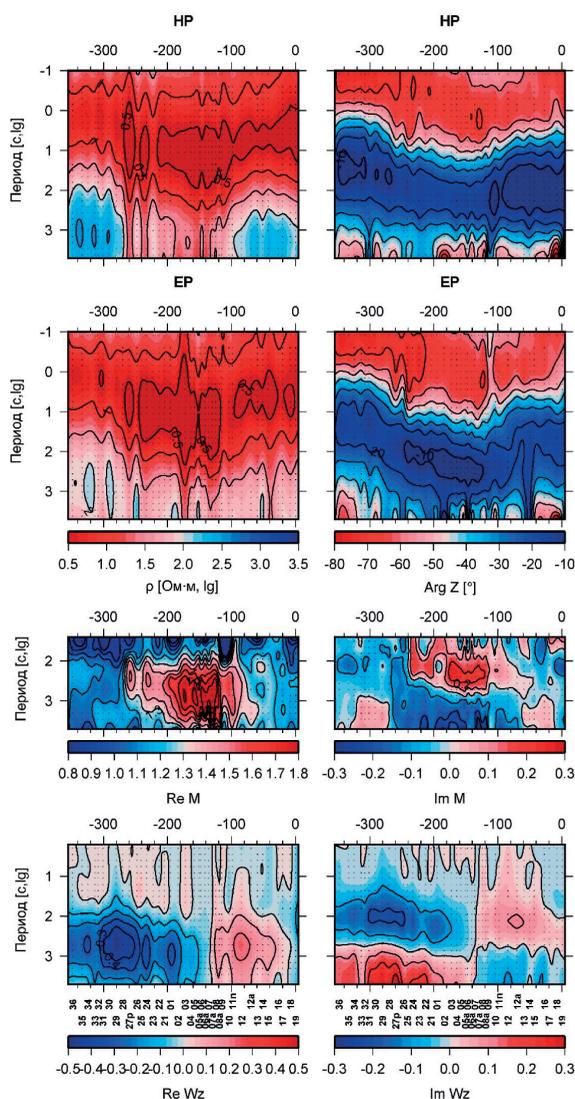


Рис. 9

Псевдоразрезы восьми компонент МТ/МВ-данных, подготовленных для совместной инверсии 2D+ на профиле VR (рис. 2), сверху вниз: кажущиеся сопротивления (ρ) и фазы импеданса (из фазового тензора, $Arg Z$) для двух поляризаций поля (HP и EP), горизонтальный МВ-отклик (M) и типпер (Wz)

Вид псевдоразрезов вдоль профилей VR и LA изменяется с учетом появления интенсивных широтных бортовых токов в Московской синеклизе. На рис. 9 представлена сводка псевдоразрезов вдоль профиля VR. Псевдоразрезы данных импеданса и типпера существенно расширены на коротких периодах. Области с кажущимися сопротивлениями $< 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ достигают больших периодов (200–300 с) по сравнению с рис. 8 и продолжают до восточного окончания профиля. При этом значения кажущегося сопротивления ниже $30 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ сохраняются вплоть до максимального периода 4000 с. Центры токовых систем на псевдоразрезах МВ-данных также смещаются на большие периоды (~ 500 с для типпера и 800–1000 с для горизонтального отклика). Все это указывает на возросшую мощность проводящих осадков и допускает присутствие корового проводника в центральной части профиля [Куликов и др., 2021]. Увеличение латеральной изменчивости данных связано с меньшей длительностью разведочных зондирований на VR по сравнению с длиннопериодными на ОВ и повышенным уровнем ЭМ-помех.

Стратегия дальнейшей интерпретации данных проекта SMOLENSK

Зондирования проекта SMOLENSK продолжили на запад и удвоили протяженность трех субширотных профилей массива KIROVOGRAD (рис. 2): ОВ, МК и КЗ, а также включили в анализ новый, более детальный профиль VR. Профильная интерпретация допустима и на других коротких широтных профилях VS, GD, NZ и LA. Получены первые результаты совместной инверсии 2D+ 8-компонентных ансамблей МТ/МВ-данных по методике [Varentsov, 2015a,b] для профилей КЗ, МК и ОВ. В моделях инверсии достигнуто адекватное описание осадочных структур на глубинах до 1,5–2,5 км с хорошим согласием модельных и наблюдаемых оценок приповерхностной S и подтверждена структура коровых аномалий, изученных на ВКМ [Варенцов и др., 2012, 2013]. Коровые проводники в Оршанской впадине проявляются лишь в бортовых зонах и не видны в центральной части. В то же время на профиле VR первые результаты 2D-инверсии показывают коровый проводник под областью максимальной мощности осадков [Куликов и др., 2021].

Устойчивость и разрешающая способность 2D-инверсии на профилях проекта SMOLENSK ограничены трехмерностью данных и сильной интерференцией поверхностных и глубинных откликов. Требуется тонкая настройка процедур 2D-инверсии с оптимальным взвешиванием компонент данных, лучшим контролем их 3D-искажений и учетом ряда априорных представлений (распределения приповерхностной S , глубинного нормального разреза, размеров изучаемых структур). Для учета 3D-искажений данных

неоднородностями осадочных структур ведется плечное квази-3D моделирование поверхностных МТ/МВ-откликов на основе распределения S , показанного на рис. 5. Анализ результатов этих расчетов станет важным фактором оптимальной настройки процедур 2D-инверсии.

Подготовлены данные для многоплечной квази-3D инверсии МВ-откликов в пределах всего расширенного массива KIROVOGRAD. При решении этой задачи в 1D-модель глубинного нормального разреза ВКМ и прилегающих территорий включаются две тонкие пленки с распределением аномальной продольной проводимости в пределах осадочного чехла и консолидированной коры. Приповерхностное распределение предполагается известным (рис. 5) и фиксируется, а распределение коровой продольной проводимости подбирается по массивам всех компонент типпера и горизонтального МВ-отклика, как при решении подобных задач на предшествующих этапах проекта KIROVOGRAD [Варенцов и др., 2012, 2013, 2017; Varentsov, 2015b].

В работе [Куликов и др., 2018] представлены результаты объемной 3D-инверсии импедансных данных для российской части массива KIROVOGRAD. Возможности объемной 3D-инверсии сводного ансамбля данных импеданса, типпера и горизонтального МВ-отклика для всего расширенного массива ограничены чрезвычайно высоким уровнем требуемых компьютерных ресурсов и трудностями достижения устойчивой сходимости итераций инверсии для разнородного набора компонент инвертируемых данных. На первом шаге в этом направлении готовится решение задачи многокомпонентной 3D-инверсии в ограниченном регионе проекта SMOLENSK.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Методом МТ/МВ-зондирований исследована геоэлектрическая структура области тройного сочленения крупнейших сегментов ВЕП. Проведено более 50 новых длиннопериодных зондирований и более 40 зондирований в разведочном диапазоне периодов. Уточнена структура суммарной приповерхностной продольной проводимости Оршанской и Московской впадин, позволяющая отчетливее представить связанную систему приповерхностных земных токов, обтекающих ВКМ. Выявлены приповерхностные и глубинные аномалии в пределах Оршанской впадины и определено их сложное продолжение на север. Соотношение приповерхностных и глубинных аномалий, наблюдаемых в осадочных бассейнах, проясняется по результатам квази-3D моделирования приповерхностных МТ/МВ-откликов, выполненного на основе построенной карты S . Получены первые результаты инверсии 2D+ данных для серии широтных профилей, но они требуют существенного уточнения в пределах консолидированной коры. Планируя уточнение коровых

структур, еще рано обсуждать геоэлектрические неоднородности литосферной мантии. Готовится квази-3D инверсия МВ-данных в пределах всего массива KIROVOGRAD и объемная 3D-инверсия полного ансамбля откликов массива SMOLENSK.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00733_А). Инструментарий обработки, анализа, моделиро-

вания и инверсии МТ/МВ-данных подготовлен в рамках бюджетных тем ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Благодарим всех участников рабочих групп проектов KIROVOGRAD и SMOLENSK. Глубоко признательны коллективам упомянутых геомагнитных обсерваторий (прежде всего, КИУ), а также сайтов www.intermagnet.org и geomag.gcras.ru за эффективный доступ к МВ-записям в процессе обработки данных наших синхронных зондирований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астапенко В.Н. Оршанско-Ильменская МВ-аномалия // Докл. НАН Беларуси. 2008. Т. 52(5). С. 102–106.
2. Астапенко В.Н. Земная кора и мантия территории Беларуси по МТ-данным. Минск: Экономпресс, 2012. 208 с.
3. Астапенко В.Н., Дубаневич М.А. Базисная 3D геоэлектрическая модель литосферы Беларуси // Литасфера. 2017. № 2(47). С. 80–92.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
5. Варенцов И.М., Гордиенко В.В., Гордиенко И.В. и др. Склон Воронежского кристаллического массива (геофизика, глубинные процессы). Киев: Логос, 2013. 118 с.
6. Варенцов И.М., Грачева Д.А., Лозовский И.Н. Массив синхронных МТ-зондирований EarthScore: методика многоточечного оценивания передаточных операторов в активном регионе Кордильер на северо-западе США // Геофизика. 2020а. № 4. С. 50–57.
7. Варенцов И.М., Иванов П.В., Колодяжный С.Ю. и др. Исследование аномалий электропроводности в области сочленения крупнейших сегментов Восточно-Европейской платформы методами синхронного МТ/МВ-зондирования // Материалы 47-й сессии Межд. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. Воронеж: Научная книга, 2020б. С. 52–56.
8. 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.
9. Варенцов И.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.
10. 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.
11. Гарецкий Р.Г. Особенности тектоники и геодинамики Восточно-Европейской платформы // Литасфера. 2007. № 2(27). С. 3–13.
12. 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.
13. Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Беларуская навука, 2014. 120 с.
14. Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г. «Структуры омота» – новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // ДАН. 2018. Т. 478(5). С. 546–550.
15. Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Строение кровли фундамента // Изв. ВУЗов. Сер. Геология и разведка. 2018. № 3. С. 5–14.
16. Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов И.М. и др. Брятинская коровая аномалия электропроводности по результатам площадных МТ-исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.
17. Куликов В.А., Ионичева А.П., Лубнина Н.В. и др. Новые МТ-данные для зоны сочленения Фенноскандии и Сарматии // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. № 2.
18. Милюновский Е.Е. (ред.). Тектоническая карта России, сопредельных территорий и акваторий. Масштаб 1: 4 000 000. М.: МГУ, 2006.
19. Рокитянский И.И., Кулик С.Н., Лозвинов И.М., Рокитянская Д.А. Аномалии геомагнитных вариаций на СЗ европейской части СССР // Физика Земли. 1982. № 11. С. 101–106.
20. Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EUROPE: East European Craton // Reference module in Earth systems and environmental sciences. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 1–18.
21. Ivanov P.V., Astapenko V.N., Goev A.G. et al. The deep structure of the triple junction of the East European Platform's segments based on MT and seismological data // 24th EM Induction Workshop (Extended Abstracts). Helsingør, Denmark. 2018. S4.1–P478. P. 1–4.
22. Varentsov I.V. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // EM sounding of the Earth's interior: Theory, modeling, practice. Amsterdam: Elsevier, 2015a. P. 271–299.
23. Varentsov I.V. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // EM sounding of the Earth's interior: Theory, modeling, practice. Amsterdam: Elsevier, 2015b. P. 191–229.

REFERENCES

1. Astapenko V.N. Orsha-Ilmenskaya MV anomaly. Dokl. NAS Belarus. 2008; 52(5): 102–106 (in Russian).
2. Astapenko V.N. The Earth's crust and mantle of the Belarus territory according to MT data. Minsk: Economypress, 2012. 208 p. (in Russian).
3. Astapenko V.N., Dubanevich M.A. Basic 3D geoelectric model of the Belarus lithosphere. *Litasfera*. 2017; 2(47): 80–92 (in Russian).
4. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. Berlin: Springer, 2008. 563 p.

5. Varentsov IvM, Gordienko VV, Gordienko IV et al. Slope of the Voronezh crystalline massif (geophysics, deep processes). Kiev: Logos, 2013. 118 p. (in Russian).

6. Varentsov IvM, Gracheva DA, Lozovsky IN. EarthScope array of simultaneous MT soundings: multi-site method to estimate transfer functions in the active Cordillera region (northwestern USA). *Geophysics*. 2020a; (4): 50–57 (in Russian).

7. Varentsov IvM, Ivanov PV, Kolodyazhnyy SYu et al. Study of electrical conductivity anomalies in the junction area of the largest East European Platform's segments by synchronous MT/MV soundings methods. Materials of the 47th session of the Uspensky – Strakhov Int. seminar. Voronezh: Scientific book, 20206. P. 52–56 (in Russian).

8. Varentsov IvM, Kovachikova S, Kulikov VA et al. Simultaneous MT and MV soundings at the western slope of the Voronezh Massif. *Geoph. J.* 2012; 34(4): 90–107 (in Russian).

9. Varentsov IM, Kovachikova S, Lozovskiy IN. Development of a quasi-3D inversion technique for MV data. Materials of the 44th session of the Uspensky Int. seminar. Moscow: IPE RAS, 2017. P. 84–89 (in Russian).

10. Varentsov IvM, Sokolova EYu, Martanus ER et al. System of EM field transfer operators for the BEAR array of simultaneous soundings: methods and results. *Izv. Phys. Solid Earth*. 2003; 39(2): 118–148 (in Russian).

11. Garetsky RG. Features of tectonics and geodynamics of the East European Platform. *Litasfera*. 2007; 2(27): 3–13 (in Russian).

12. Garetsky RG, Karataev GI. A tectonogeodynamic model for the junction zone between the Fennoscandian and Sarmatian segments of the East European Platform. *Geol and Geophys*. 2011; 52(10): 1228–1235.

13. Garetsky RG, Karataev GI. Suture zones of Fennoscandia, Sarmatia and Volga-Uralia. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2014. 120 p. (in Russian).

14. Garetsky RG, Leonov MG. Pool structures: a new type of interaction zones of lithospheric plate flows. *Dokl. Earth Sciences*. 2018; (478): 152–155.

15. Kolodyazhny SYu. Long-lived structural ensembles of the East European Platform. Article 2. The structure of the top of the basement. *Izv. VUZov. Geologia i Razvedka*. 2018; (3): 5–14 (in Russian).

16. Kulikov VA, Aleksanova ED, Varentsov IvM et al. Baryatinskaya crustal electrical conductivity anomaly based on the areal MT studies results. *Geophysics*. 2018; (1): 31–43 (in Russian).

17. Kulikov VA, Ionicheva AP, Lubnina NV et al. New MT data in the suture zone of Fennoscandia and Sarmatia. Moscow Univ. Geol. Bull. 2021. № 2 (in Russian).

18. Milanovsky EE (ed.). Tectonic map of Russia, adjacent territories and water areas. Scale 1: 4 000 000. Moscow: MSU, 2006 (in Russian).

19. Rokityansky II, Kulik SN, Logvinov IM, Rokityanskaya DA. Anomalies of geomagnetic variations in the NW of the USSR European part. *Izv. Phys. Solid Earth*. 1982; (11): 101–106 (in Russian).

20. Bogdanova SV, Gorbatshev R, Garetsky RG. EUROPE: East European Craton. Reference module in Earth systems and environmental sciences. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 1–18.

21. Ivanov PV, Astapenko VN, Goev AG et al. The deep structure of the triple junction of the East European Platform's segments based on MT and seismological data. 24th EM Induction Workshop (Extended Abstracts). Helsingor, Denmark. 2018. S4.1–P478. P. 1–4.

22. Varentsov IvM. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion. EM sounding of the Earth's interior: Theory, modeling, practice. Amsterdam: Elsevier, 2015a. P. 271–299.

23. Varentsov IvM. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets. EM sounding of the Earth's interior: Theory, modeling, practice. Amsterdam: Elsevier, 2015b. P. 191–229.

Положительная рецензия 11.01.21

ОБ АВТОРАХ



ВАРЕНЦОВ
Иван Михайлович

Кандидат физико-математических наук. Директор ЦГЭМИ ИФЗ РАН, заведует в нем лабораторией MT-исследований. Автор передовых методик моделирования, обработки и совместной интерпретации данных MT/MV-зондирования. Опубликовал более 150 научных работ.



ИВАНОВ
Павел Владимирович

Кандидат физико-математических наук. Старший научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончил геологический факультет МГУ в 2007 г. Занимается 2D/3D-инверсией данных MT/MV-зондирования. Автор более 30 научных работ.



ИОНИЧЕВА
Анна Павловна

Аспирант кафедры геофизики геологического факультета МГУ. Окончила МГУ в 2019 г. Занимается обработкой и интерпретацией MT-данных.



КОЛОДЯЖНЫЙ
Сергей Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук. Главный научный сотрудник ГИН РАН. Окончил геологический факультет Ростовского ГУ в 1985 г. Занимается изучением тектоники Восточно-Европейской платформы с использованием тектонофизических и дистанционных методов. Автор более 100 научных работ.



КУЛИКОВ
Виктор Александрович

Доктор геолого-минералогических наук. Профессор кафедры геофизики геологического факультета МГУ. Окончил МГУ в 1991 г. Разрабатывает инструментарий обработки и интерпретации низкочастотных ЭМ-зондирований, изучает частотные и временные характеристики вызванной поляризации. Автор более 80 научных работ.



ЛЕОНОВ
Михаил Георгиевич

Доктор геолого-минералогических наук. Главный научный сотрудник ГИН РАН. Специалист в области тектоники и геодинамики. В последние годы занимается проблемами тектоники консолидированной коры от ранних этапов ее формирования до новейшего времени. Автор 300 научных работ, в том числе 12 монографий.



ЛОЗОВСКИЙ
Илья Николаевич

Научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончил геологический факультет МГУ в 2012 г. и аспирантуру ИФЗ РАН в 2015 г. Занимается методическими и прикладными исследованиями в области обработки и интерпретации данных ЭМ-зондирований. Автор более 50 научных работ.



ПУШКАРЕВ
Павел Юрьевич

Доктор геолого-минералогических наук. Профессор кафедры геофизики геологического факультета МГУ. Окончил МГУ в 1998 г. Специалист в области ЭМ-зондирования Земли. Автор более 80 научных статей.



РОДИНА
Татьяна Андреевна

Научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончила геологический факультет МГУ в 2015 г. и аспирантуру ИФЗ РАН в 2019 г. Занимается обработкой данных МТ/МВ-зондирований. Автор более 10 научных работ.



ШУСТОВ
Николай Львович

Научный сотрудник геологического факультета МГУ. Занимается методикой проведения и аппаратно-программной поддержкой электроразведочных и магниторазведочных исследований. Опубликовал более 30 научных работ.



БАГЛАЕНКО
Наталья Вячеславовна

Старший научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончила физический факультет Воронежского ГУ в 1967 г. Занимается разработкой и применением методов 2D-инверсии ЭМ-данных. Автор более 30 научных работ.



ГАМЗА
Евгений Игоревич

Ведущий инженер ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончил геофизический факультет РГГРУ в 2017 г. Занимается разработкой программного обеспечения для моделирования магнитного поля Земли и интерпретации данных ЭМ-зондирований.



ТИХОМИРОВА
Ольга Юрьевна

Кандидат физико-математических наук. Ведущий научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Окончила геологический факультет МГУ в 1979 г. Занимается развитием и применением методов пленочного моделирования и инверсии ЭМ-данных. Автор более 10 научных работ.