

УДК 550.837.211

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-136-144

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЛУБИННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОФИЛЮ ПУШКИНСКИЕ ГОРЫ — АНДРЕАПОЛЬ

Виктор Александрович Куликов¹, Иван Михайлович Варенцов²,
Павел Владимирович Иванов³, Анна Павловна Ионичева⁴✉,
Сергей Юрьевич Колодяжный⁵, Илья Николаевич Лозовский⁶,
Татьяна Андреевна Родина⁷, Григорий Евгеньевич Слинчук⁸,
Андрей Георгиевич Яковлев⁹

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

² Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; varentsov@mail.ru

³ Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; pavel.vl.ivanov@gmail.com

⁴ Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; yaroslavtseva.anna@gmail.com ✉

⁵ Геологический институт РАН, Москва, Россия; kolod63@mail.ru

⁶ Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; i.n.lozovsky@yandex.ru

⁷ Центр геоэлектроманнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; whittakeresq@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; slin4ukgr@yandex.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mail@nw-geo.ru

Аннотация. В январе-феврале 2022 гг. были выполнены глубинные магнитотеллурические зондирования по региональному профилю Пушкинские Горы — Андреаполь, протяженностью 300 км. В состав полевой экспедиции входили преподаватели, аспиранты и студенты кафедры геофизики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также научные сотрудники лаборатории Магнитотеллурических зондирований Центра геоэлектроманнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН). В статье представлен анализ полученных результатов, а также геоэлектрические двумерные модели, полученные в ходе инверсии магнитотеллурических данных в программе ZONDMT2D.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, двумерная инверсия

Для цитирования: Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В., Ионичева А.П., Колодяжный С.Ю., Лозовский И.Н., Родина Т.А., Слинчук Г.Е., Яковлев А.Г. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований по профилю Пушкинские Горы — Андреаполь // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 136–144.

RESULTS OF DEEP MAGNETOTELLURIC SURVEYS ALONG THE PUSHKINSKIYE GORY — ANDREAPOL PROFILE

Victor A. Kulikov¹, Ivan M. Varentsov², Pavel V. Ivanov³, Anna P. Ionicheva⁴✉,
Sergey Yu. Kolodyazhny⁵, Ilya N. Lozovsky⁶, Tatyana A. Rodina⁷,
Grigoriy E. Slinchuk⁸, Andrey G. Yakovlev⁹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, vic@nw-geophysics.ru

² Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, varentsov@mail.ru

³ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, pavel.vl.ivanov@gmail.com

⁴ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia, yaroslavtseva.anna@gmail.com ✉

⁵ Geological Institute of RAS, Moscow, Russia; kolod63@mail.ru

⁶ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia; i.n.lozovsky@yandex.ru

⁷ Center of Geoelectromagnetic research IPE RAS, Troitsk, Russia; whittakeresq@gmail.com

⁸ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; slin4ukgr@yandex.ru

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mail@nw-geo.ru

Abstract. In January–February of 2022 deep magnetotelluric soundings (DMTS) were carried out along the regional (300 km) profile Pushkinskie Gory — Andreapol. The field expedition included professors, graduates and students of the Geophysical department of the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University, as well as scientists from the Laboratory of Magnetotelluric Soundings of the Center of Geoelectromagnetic Research IPE RAS. The article presents an analysis of the results, as well as geoelectric two-dimensional models obtained during the inversion of magnetotelluric data in the ZONDMT2D program.

Keywords: magnetotelluric soundings, crustal high-conductive anomalies, two-dimensional inversion

For citation: Kulikov V.A., Varentsov I.M., Ivanov P.V., Ionicheva A.P., Kolodyazhny S.Yu., Lozovsky I.N., Rodina T.A., Slinchuk G.E., Yakovlev A.G. Results of deep magnetotelluric surveys along the Pushkinskiye Gory — Andreapol profile. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 136–144. (In Russ.).

Введение. Согласно современным представлениям, фундамент Восточно-Европейской платформы (ВЕП) состоит из трех главных сегментов — Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии, которые разделены крупными сутурными зонами и орогенными поясами, сформировавшимися в конце палеопротерозоя в результате коллизии одноименных микроконтинентов [Минц и др., 2010; Bogdanova et al., 2015; Gorbatshev, Bogdanova, 1993]. Коллизионные швы и контуры палеорогенов отражаются на картах потенциальных полей цепочками линейных магнитных и гравитационных аномалий, которые ориентированы радиально и сходятся в центральной части ВЕП. Эта же закономерность повторяется в особенностях распределения систем рифей — ранневендских палеорифтов (авлакогенов).

В качестве единого центра сближения Фенноскандинавского, Волго-Уральского и Сарматского сегментов докембрийской коры выделяют Слободской геодинамический узел [Гарецкий, Леонов, 2018; Гарецкий, Каратаев, 2019].

В январе-феврале 2022 года силами группы ученых, представляющих кафедру геофизики Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и Центр геоэлектромагнитных исследований (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), были проведены глубинные магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования по субширотному профилю Пушкинские горы — Андреаполь (рис. 1), который пересекает северную часть Слободского узла, а также Центрально-Белорусскую шовную зону [Гарецкий и др., 2006; Гарецкий, Каратаев, 2009, 2011].

Основная цель исследований — изучение корово-мантийных аномалий электропроводности, приуроченных к докембрийским шовным зонам центральной части ВЕП, обнаруживающих признаки современной активизации, а также региональных трендов в распределении суммарной продольной проводимости осадочных бассейнов.

Изучение коровой электропроводности в центральной части ВЕП группой ученых из МГУ и ЦГЭМИ проводилось в течение последних 15 лет, начиная с 2007 г. На первом этапе работы в рамках проекта KIROVOGRAD были сконцентрированы в северной и западной частях Воронежского массива, где по итогам глубинного магнитотеллурического зондирования (ГМТЗ), выполненного на территории Калужской, Брянской, Орловской и Курской областей, были изучены Барятинская и Курская аномалии электропроводности [Варенцов и др., 2012; Алексанова и др., 2013; Куликов и др., 2018]. В 2018 г. была образована рабочая группа SMOLENSK, и имеющиеся массивы синхронных МТ/МВ зондирований были расширены на запад и север, вдоль линий Волыно-Оршанского и Крестцовского (Среднерусского) мезо-неопротерозойских авлакогенов [Варенцов и др., 2021; Иванов и др., 2022]. Северные профили проекта SMOLENSK пересекали Слободской узел, но редкая сеть точек зондирования на данном участке

работ, а также отсутствие высокочастотной ветви кривых МТЗ, не позволили в полной мере учесть влияние проводящих осадков и получить детальную геоэлектрическую модель важного тектонического узла ВЕП.

Организация и проведение работ. Глубинные магнитотеллурические исследования в районе Слободского узла проводятся с 2020 г. За прошедший период измерения были выполнены по трем профилям: «Себеж-Ржев», «Пушгоры-Андреаполь», «Остров-Осташков» (рис. 1) и совмещались с проведением зимних факультативных и производственных практик кафедры геофизики Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Куликов и др., 2020]. За это время в полевых работах приняли участие не менее десяти студентов и аспирантов Геологического факультета МГУ, которые получили базовые навыки работы с современной магнитотеллурической (МТ) аппаратурой, освоили принципы методики и обработки МТ-данных, принимали участие в интерпретации и геологическом истолковании результатов.

Измерения по профилю «Пушгоры-Андреаполь» были проведены зимой 2022 года объединенным отрядом Геологического факультета МГУ и Лаборатории МТ-исследований ЦГЭМИ ИФЗ РАН. Средний шаг между точками МТЗ на профиле «Пушгоры-Андреаполь» составил 10 км и был увеличен до 15 км на участках с низкой транспортной доступностью.

Аппаратура и методика работ. Измерения проводились МТ-станциями «МЭРИ-ПРО», разработанными в компании ООО «Северо-Запад» (г. Москва). Пятикомпонентная съемка ЭМ поля велась с использованием приемных линий MN=80 м и индукционных датчиков IMS-010 производства ООО «Вега» (г. Санкт-Петербург). При измерении горизонтальных компонент ЭМ поля датчики ориентировались на магнитные север и восток. Средняя длительность записи составила 20 часов. Измерения выполнялись одновременно несколькими станциями, разнесенными по профилю, в синхронном режиме, что позволило использовать обработку по технологии Remote Reference [Gamble et al., 1979] для борьбы с локальными ЭМ помехами. Обработка данных осуществлялась в программе EPI-KIT, разработанной в ООО «Северо-Запад».

В районе работ отсутствуют региональные электрифицированные железные дороги, которые являются наиболее интенсивным источником помех для метода МТЗ. Это позволило нам получить данные высокого качества почти на всех пикетах профиля. Кроме того, начиная с 2020 года происходит постепенное увеличение солнечной активности (рис. 2, а), которая сказывается на повышении качества МТ данных (рис. 2, б).

В процессе обработки были получены компоненты тензора импеданса, матрицы векторов Визе, горизонтальный магнитный тензор (ГМТ). Для рас-

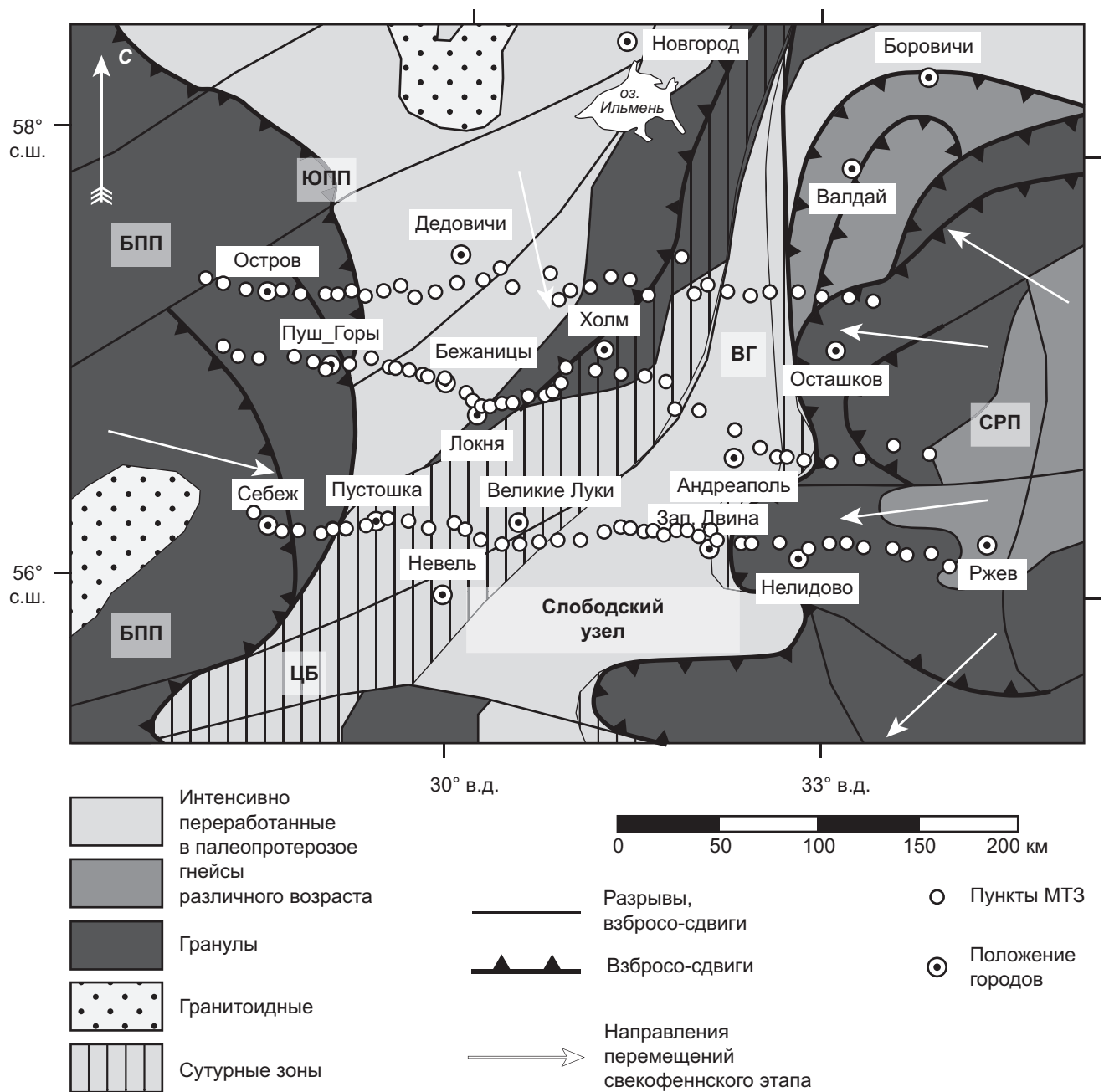


Рис. 1. Структурная схема фундамента района Слободского узла (с изменениями по [Колодяжный, 2018a]) и положение точек МТЗ; ЮПП — Южно-Прибалтийский пояс (БПП — Белорусско-Прибалтийский пояс), СРП — Среднерусский пояс, ЦБ — Центрально-Белорусская шовная зона, ВГ — Валдайский грабен; стрелками показаны направления перемещений свекофеннского коллизионного этапа 1,9–1,8 млрд лет [Минц и др., 2010]

чета ГМТ использовались магнитные наблюдения геофизической обсерватории «Борок» (ГО «Борок» ИФЗ РАН), расположенной в Ярославской области, взятые из открытых источников (www.intermagnet.org).

Анализ магнитотеллурических данных. Задачей первого этапа интерпретации МТ-данных является оценка степени геоэлектрической неоднородности среды, на основе которой формируются подходы к решению обратной задачи. Этот этап включает в себя качественный анализ и определение следующих параметров: главных значений и главных направлений амплитудных и фазовых компонент

тензора импеданса, представленных в виде кривых от периода, псевдоразрезов, карт или полярных диаграмм; расчет параметров неоднородности и асимметрии среды [Бердичевский, Дмитриев, 2009]; анализ компонент фазового тензора и компонент матрицы Визе-Паркинсона.

На рис. 3 приведены типичные кривые кажущегося сопротивления для профиля «Пушгоры — Андреаполь». Светлыми оттенками показаны кривые, полученные на западном фланге профиля, пересекающего Белорусско-Прибалтийский пояс. Суммарная продольная проводимость осадков на данном участке не превышает 250 См. В центральной части про-

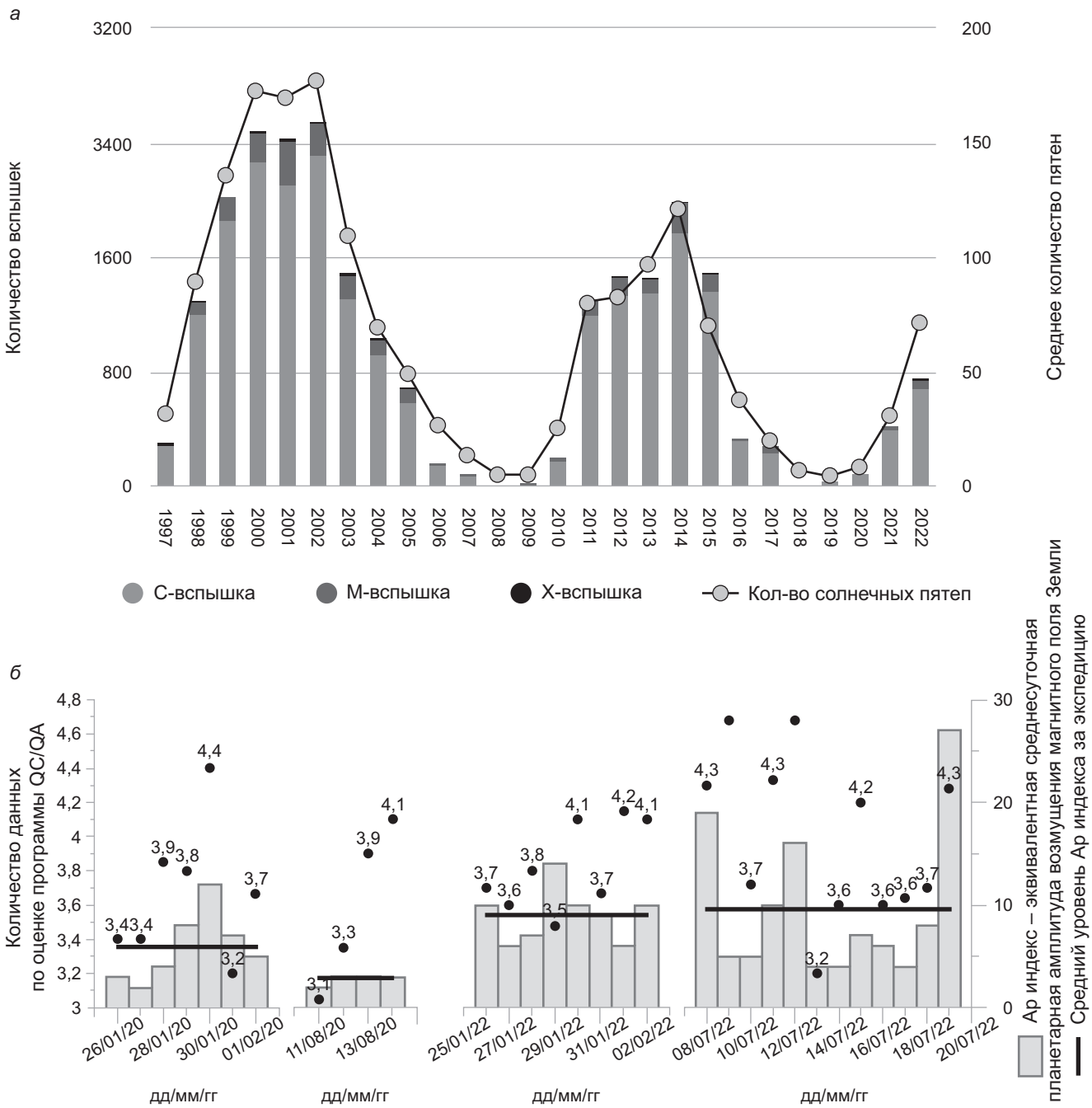


Рис. 2. Количество солнечных вспышек С, М и Х-класса, которые произошли в течение года (а) (с сайта <https://www.spaceweatherlive.com>) и оценка среднего качества МТ-данных за день в зависимости от солнечной активности в разные периоды проведения измерений (б)

филя, на широтных кривых (ρ_{yx}) МТЗ № 8-12 (рис. 3, б) в виде перегиба на восходящей ветви проявляется коровая проводящая зона. Максимальные значения суммарной продольной проводимости осадочного чехла (S_{oc}) фиксируются на кривых МТЗ № 19-21 и составляют 2000–2300 См (рис. 3).

На рис. 4 приведены карты широтной компоненты кажущегося сопротивления ρ_{yx} на периоде 100 с и 1000 с с вынесенными на них типперами Визе-Паркинсона для периодов 1000 с и 70 с соответственно. Белыми пунктирными линиями указаны возможные оси проводящих структур.

На периоде 100 с (рис. 4, а) в поле кажущихся сопротивлений выделяется одна обширная отрица-

тельная аномалия, направление которой меняется с северо-западного в южной части на северо-восточное в северной части площади.

На периоде 1000 с вся центральная область изучаемой площади характеризуется субмеридиональной зоной пониженных значений ρ_k (рис. 4, б). В границах этой области выделяются два локальных минимума. Центр восточного минимума проходит через следующие точки МТЗ: № 2-7 на профиле «Себеж-Ржев», № 21-25 на профиле «Пушгоры-Андреаполь», № 22-30 на профиле «Остров-Осташков».

Наличие регионального проводника в восточной части площади подтверждается поведением действительных частей векторов Визе на низких

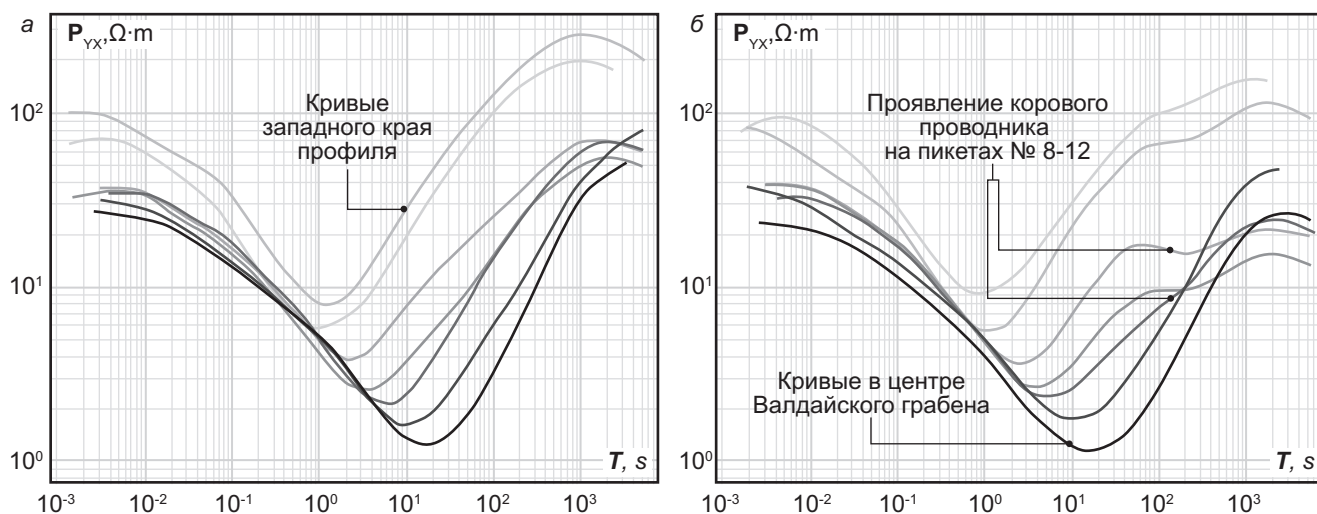


Рис. 3. Типичные кривые кажущегося сопротивления на профиле РА: ρ_{xy} — меридиональные (а); ρ_{yx} — широтные (б)

частотах (рис. 4, а). На профиле «Остров-Осташков» изменение направления векторов с юго-западного на восточное происходит между точками МТЗ № 23 и 25. На профиле «Пушгоры-Андреаполь» изменение направления векторов Визе с северо-западного на юго-восточное происходит между точками МТЗ № 23 и 24. На профиле «Себеж-Ржев» изменения в поведении индукционных векторов выражены менее ярко, потому что происходят на фоне преобладающего направления север-юг, показывающего, что региональный максимум проводимости расположен севернее линии профиля, и заключаются в развороте векторов с юго-западного на юго-восточное направление между точками № 6а и 7.

Второй минимум кажущегося сопротивления на периоде 1000 с (рис. 4, б) проходит через точки и МТЗ: № 24–26 профиля «Себеж-Ржев», № 9–15 профиля «Пушгоры-Андреаполь», № 14–16 профиля «Остров-Осташков». Существование неоднородности на данном участке незначительно отражается в поведении действительных частей векторов Визе на частотах до 100 с (рис. 4, б). На более низких частотах поведение индукционных векторов полностью обусловлено влиянием восточного проводника.

Анализ фазового тензора по профилю «Пушгоры — Андреаполь» показывает, что до периодов 10–50 с геоэлектрические разрезы характеризуются размерностью 1D, за исключением отдельных точек, вероятно, подверженных влиянию трехмерных локальных неоднородностей (рис. 5). На периодах больше 50 с можно выделить участки, где устойчиво определяются направления главных значений фазового тензора. В частности, на профиле «Пушгоры-Андреаполь», можно выделить два участка с ярко выраженной двумерностью на больших периодах: № 10–15 и № 22–27. Направление минимального значения импеданса для обоих участков составляет 50–60° СВ (рис. 5).

Качественный анализ МТ-данных показал следующее. Верхняя часть разреза, отвечающая осадочному чехлу, укладывается в модель гори-

зонтально-слоистой среды. На периодах более 100 с в первичных данных проявляются две аномалии, характеризующиеся направлением близким к меридиональному. Контрастная восточная аномалия, по предварительной гипотезе, связана с увеличением мощности проводящих осадков в центре Валдайского грабена. Западная аномалия, вероятно, имеет коровую природу. Оценки тензора импеданса показывают, что направление максимальной проводимости данных аномалий составляет 50–70° СВ.

Преобладающее направление индукционных векторов на профиле «Себеж-Ржев» южное, что обусловлено влиянием более проводящей части осадочного чехла Валдайского грабена. На профилях «Пушгоры-Андреаполь» и «Остров-Осташков» региональный фон в поведении типперов отсутствует и более ярко проявляются субмеридиональные проводящие структуры.

Для полученных данных наиболее подходящим вариантом интерпретации является сочетание одномерного подбора для верхних горизонтов осадочного чехла и трехмерной инверсии для глубинной части модели. Однако, полученных по трем профилям данных недостаточно для проведения 3D инверсии.

Геоэлектрическая модель по профилю «Пушгоры-Андреаполь». Для поиска оптимального подхода к проведению 2D инверсии в условиях больших значений суммарной проводимости осадков было выполнено имитационное моделирование магнитотеллурических данных с использованием программы ZONDMT2D (<http://zond-geo.com>) для геоэлектрических структур, включающих неоднородности как осадочного чехла, так и консолидированной коры. Моделирование показало, что наиболее близкий результат к истинной модели дает двухэтапная инверсия с последовательным увеличением числа инвертируемых компонент, а также при задании в стартовых моделях реальных мощностей и удельных сопротивлений осадочного чехла. Эта методика была использована при инверсии экспериментальных МТ-данных на профиле «Пушгоры-Андреаполь».

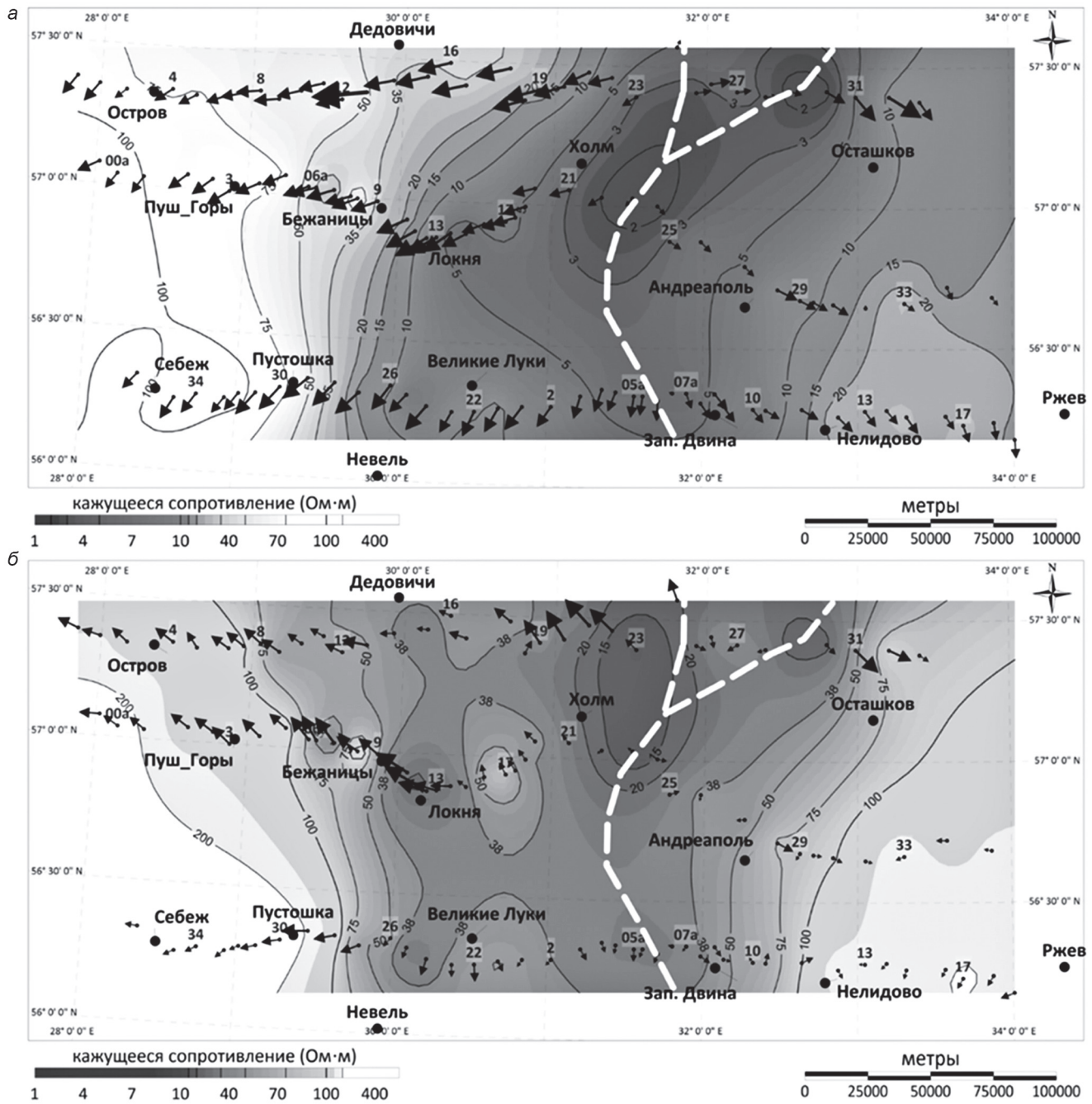


Рис. 4. Карты широтной компоненты кажущегося сопротивления на периоде 100 с (а) и 1000 с (б) с дополнительно вынесенными векторами индукции (Re , конвенция Визе) на периоде 1000 с (а) и 70 с (б) и возможными осями проводящих структур (белый пунктир)

Нормализация амплитудных кривых МТЗ, направленная на подавление приповерхностного S-эффекта, была выполнена в программе Inversio (ООО «Северо-Запад») со следующими параметрами: период нормализации — 1 с, радиус нормализации — 20 км.

При проведении бимодальной инверсии мы использовали оригинальные данные, где в качестве продольных выступали меридиональные, а в качестве поперечных — широтные кривые, с учетом магнитного склонения соответствующие азимутам 10° СВ и 100° ЮВ.

При проведении инверсии использовалась следующая сетка: размер первой вертикальной ячейки — 50 м, общая глубина модели — 100 км; размер горизонтальной ячейки — 3 км.

Мощность осадочного чехла задавалась на основании карты кровли фундамента [Нагорный, 2009; Колодяжный, 20186; Иванов и др., 2022]. Среднее значение удельного сопротивления осадков рассчитывалось с учетом карты S (рис. 6).

Результат двухэтапной 2D инверсии по профилю «Пушгоры-Андреаполь» в виде глубинных моделей УЭС приведен на рис. 7. Модели представ-

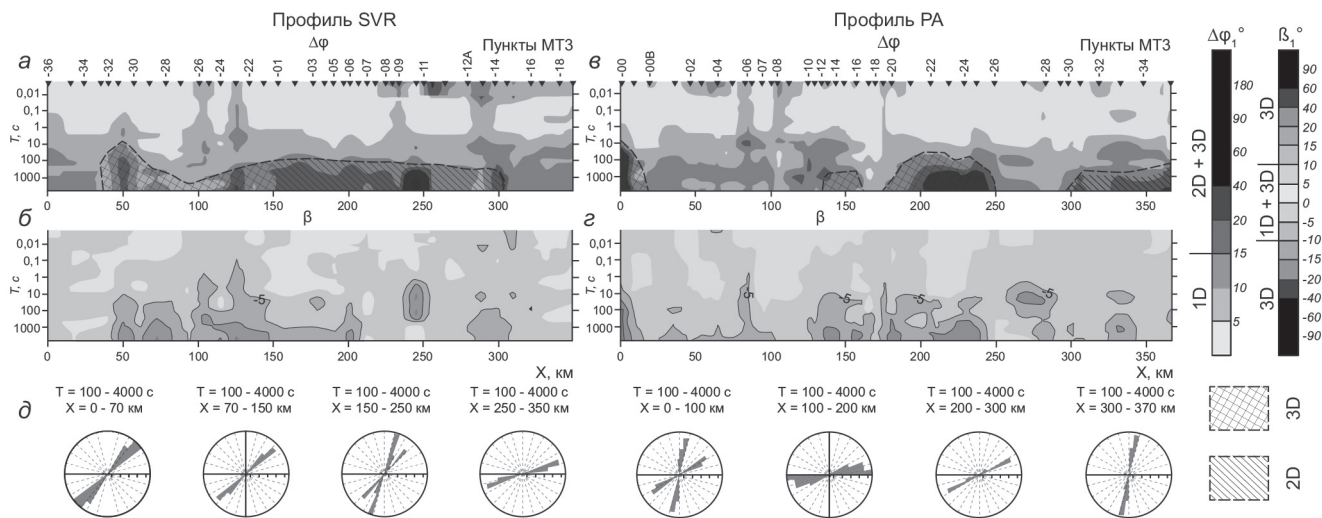


Рис. 5. Псевдоразрезы инвариантных параметров неоднородности $\Delta\varphi$ (а, в) и асимметрии β (б, г) фазового тензора импеданса для профилей SVR и РА с диаграммами направлений его экстремальных фаз, отвечающих минимальным сопротивлениям (д)

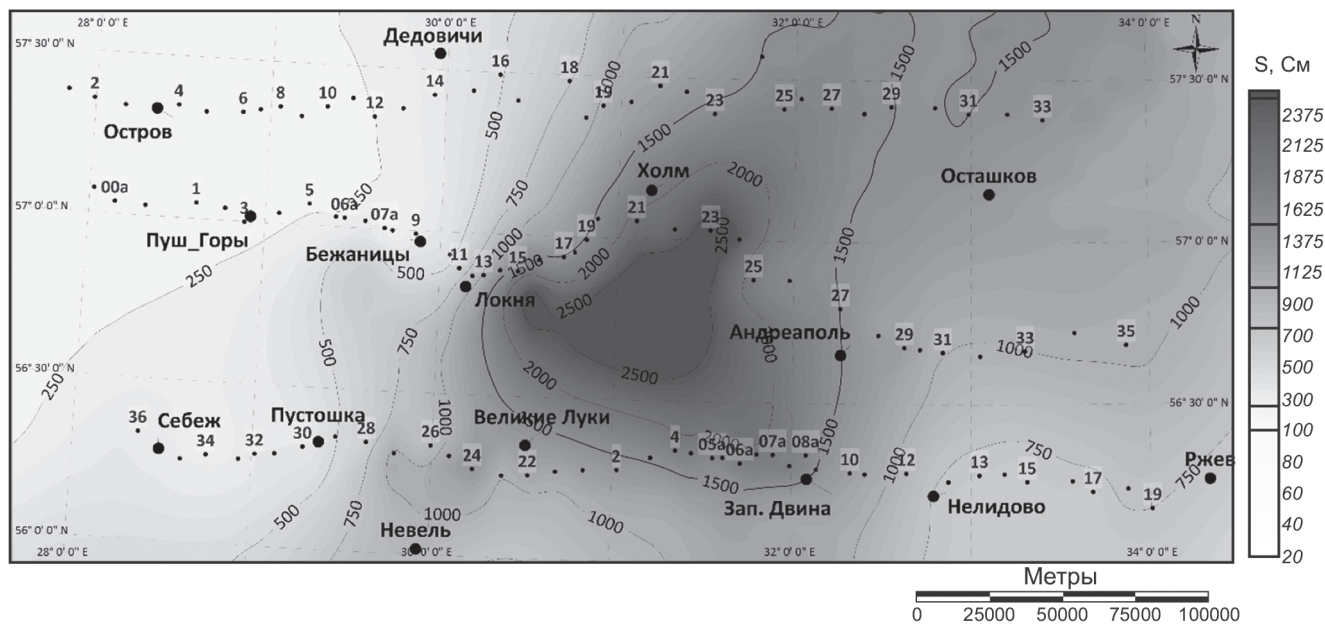


Рис. 6. Карта изолиний приповерхностной суммарной продольной проводимости S (см, lg-масштаб), основанная на асимптотических оценках S по эффективному кажущемуся сопротивлению в пунктах МТ зондирования на профилях РА и SVR, зондирования проекта SMOLENSK и прочих локальных зондирований прошлых лет

лены в двух вертикальных масштабах: до глубины 6 км соотношение горизонтального/вертикального масштаба составляет 1/10, до глубины 80 км — 1/1.

По итогам интерпретации мы получили двухъярусную геоэлектрическую модель с проводящим осадочным чехлом ($УЭС = 1\text{--}3\text{ Ом}\cdot\text{м}$), мощность которого принимает максимальные значения в центре Валдайского грабена (точки МТЗ № 21–25), и высокоомным основанием — породами кристаллического фундамента.

По результатам инверсии, в районе точек МТЗ № 1–16 выявлена широкая транскоровая проводящая структура в земной коре. До глубины 15 км ось

проводника имеет угол наклона близкий к вертикальному. Ниже глубины 20 км, на уровне верхней — средней коры, проводящая зона характеризуется пологим залеганием с незначительным погружением в восточном направлении.

Выявленная аномалия электропроводности, вероятно, является продолжением зоны Ильменского корового проводника, описанного ранее по результатам одиночных магнитовариационных зондирований в районе одноименного озера И.И. Рокитянским [Рокитянский и др., 1982].

Закключение. По результатам качественного анализа и количественной интерпретации МТ-данных

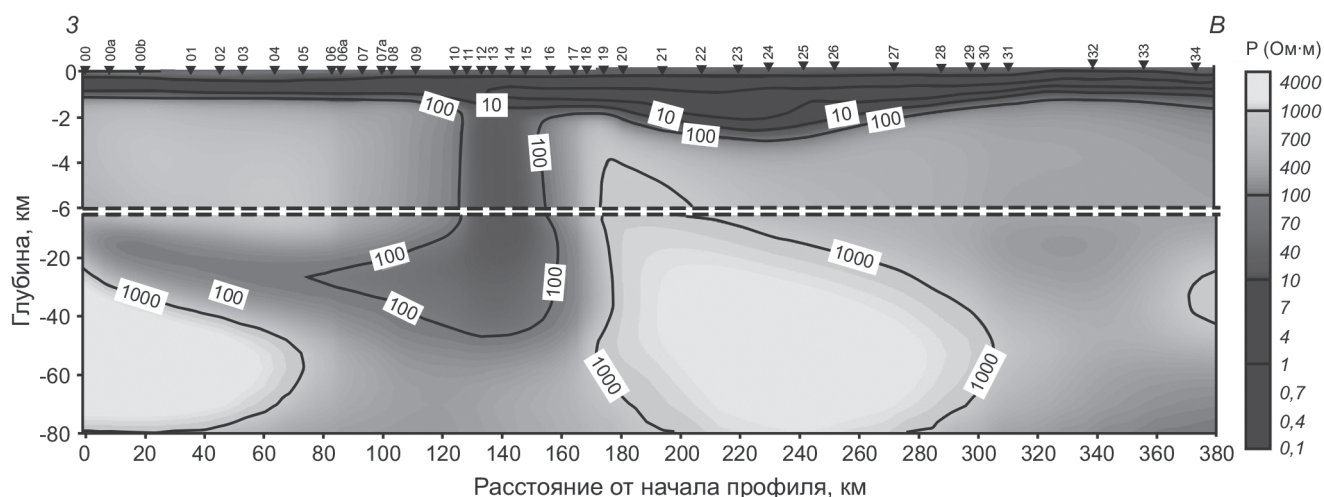


Рис. 7. Разрезы сопротивления (Ом·м, lg-масштаб) вдоль профиля РА, полученные с использованием алгоритма ZondMT2D в результате последовательной двухэтапной 2D инверсии данных импеданса и типпера

можно констатировать, что профиль «Пушгоры-Андреаполь» пересекает две аномалиеобразующие структуры, относящиеся к разным гипсометрическим уровням.

Глубинный проводник, ось которого проходит в районе г. Локня, слабо проявляется в первичных данных, и представляет собой на результатах 2D инверсии сочетание двух зон пониженного сопротивления — верхнекоровой субвертикальной зоны шириной 30–40 км и полого залегающего проводника, локализованного в средней коре на глубинах 15–30 км.

Есть основания полагать, что выделенная зона является южным продолжением Ильменской аномалии электропроводности [Рокитянский и др., 1982] и отвечает региональной Центрально-Белорусской сутурной зоне, разделяющей крупные сегменты коры ВЕП.

Высокая проводимость зоны может быть связана с сульфид- и углеродсодержащими метаосадками, которые накопились в пределах желоба и континентального склона Сарматии. Их появление на больших глубинах объясняется процессами субдукции, когда кора Белорусско-Прибалтийского палеоокеана в процессе погружения увлекала за собой на большие глубины (до 80 км) осадочные толщи, насыщенные

органикой и карбонатными отложениями. В результате этого осадки испытали глубокий термодинамический метаморфизм и в больших объемах трансформировались в сульфид- и графитсодержащие бластомилониты.

В процессе коллизии литосферных плит первичная позиция зоны субдукции была сильно нарушена. В анализируемом сечении профиля «Пушгоры-Андреаполь» сохранился крутопадающий сегмент сутурной зоны, апикулярная часть которой раздавлена и пережата между системами конвергентных надвигов и взбросов, ограничивающих смежные геоблоки (рис. 7).

Ось второго аномалиеобразующего объекта, ярко проявленного в первичных МТ-полях, проходит в районе п. Бологово на профиле «Пушгоры-Андреаполь». Аномалия является малоглубинной и связана с увеличением мощности проводящих осадков в Валдайском грабене.

Наличие большого объема терригенных отложений с высокой пористостью и степенью дезинтеграции в строении Валдайского авлакогена позволяет предполагать их высокую флюидонасыщенность, в частности, высокоминерализованной водой, что способствует повышенной электропроводности осадочной призм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексанова Е.Д., Варенцов И.М., Куликов В.А. и др. Глубинные аномалии электропроводности в северной части Воронежской антеклизы // Геофизика. 2013. № 2. С. 32–38.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

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 // Геофизический журнал. 2012. Т. 34(4). С. 90–107.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический омутообразный узел в центре Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2019. № 2 (51). С. 165–178.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Слободский тектоно-геодинамический узел Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2009. № 2(31). С. 50–66.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Тектоно-геодинамическая 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., Голобоков С.В., Данкевич И.В. Глубинное строение Центрально-Белорусской шовной зоны по геофизическим данным // Литасфера. 2006. № 1, вып. 24. С. 101–112.

Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г. «Структуры омута» — новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478(5). С. 546–550.

Иванов П.В., Варенцов И.М., Колодяжный С.Ю. и др. Исследование глубинной электропроводности в окрестности Оршанской впадины: двухмерная инверсия синтетических и наблюдаемых магнитотеллурических данных методом REBOSS // Физика Земли. 2022. № 5. С. 26–44.

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

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.

Куликов В.А., Соколова Е.Ю., Ионичева А.П. и др. Электропроводность фундамента Восточно-Европейской платформы в юго-восточном Приладожье по данным магнитотеллурических зондирований // Физика Земли. 2020. № 6. С. 66–85.

Минц М.В., Сулейманов А.К., Бабаянц П.С. и др. Глубинное строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы: Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. М.: Геокарт; ГЕОС, 2010. Т. 1. 408 с.; Т. 2. 400 с.

Нагорный М.А. Тектоника Оршанской впадины // Литасфера. 2009. № 2(31). С. 67–74.

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

Bogdanova S., Gorbatshev R., Skridlaite G., et al. Trans-Baltic Palaeoproterozoic correlations towards the reconstruction of supercontinent Columbia/Nuna // Precambrian Res. 2015. Vol. 259. P. 5–33.

Gamble T.D., Goubau W.M., Clarke J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference // Geophysics. 1979. Vol. 44(1). P. 53–68.

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

Статья поступила в редакцию 29.12.2022,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 13.05.2024