

УДК 550.837.211

В.А. Куликов¹, А.П. Ионичева², Н.В. Лубнина³, Н.Л. Шустов⁴, А.Г. Яковлев⁵

НОВЫЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЗОНЫ СОЧЛЕНЕНИЯ ФЕННОСКАНДИИ И САРМАТИИ

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,**119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**ООО «Северо-Запад», 117545, Москва, 11-й Дорожный проезд, домовладение 9, стр. 1, офис 2**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**LLC «Noth-West», 117545, Moscow, 1-st Dorozhnyj proyezd, 9, bd. 1, ofis 2*

Представлены результаты работ методом магнитотеллурического зондирования, которые были проведены в 2020 г. по профилю г. Ржев—г. Великие Луки, в зоне сочленения трех сегментов докембрийской коры Восточно-Европейской платформы: Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. По результатам работ в центральной части профиля выявлена аномальная зона повышенной проводимости в коре. Коровый проводник слабо выражен на компонентах теллурического тензора за счет экранирующего влияния проводящего осадочного чехла, поэтому основной упор при качественном анализе данных и инверсии сделан на магнитовариационных параметрах.

По результатам двумерной инверсии, проведенной в программе А.Е. Каминского ZONDMT2D, на геоэлектрической модели выделена субвертикальная зона пониженных значений удельного сопротивления в коре, которая предположительно связана с зоной палеосубдукции Белорусской океанической плиты.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, коровые аномалии электропроводности, 2D обратные задачи.

Presents the results of magnetotelluric soundings acquired in 2020 along the profile Rzhev—Velikie Luki, in the suture zone of three parts of Precambrian crust of East European platform: Fennoscandia, Sarmatia and Volga—Ural. In the central part of the profile, anomaly zone of increased conductivity in the crust was revealed. The crust conductor is weakly expressed on the components of the telluric tensor due to the screening effect of the conductive sedimentary cover; therefore, the focus in the qualitative analysis of data and inversion was made on magnetovariational parameters.

According to the results of two-dimensional inversion carried out in the program of A.E. Kaminsky ZONDMT2D, on the geoelectric model a subvertical zone of low resistivity in the crust is identified, which is probably associated with the paleosubduction zone of the Belarusian Ocean Plate.

Key words: magnetotellurics, MT-surveys, crustal high-conductive anomalies, resistivity image, 2D inversion.

Введение. Согласно современным представлениям Восточно-Европейский кратон, представляющий собой фундамент одноименной платформы, состоит из трех сегментов — Фенноскандии, Волго-Уралии и Сарматии, имевших разные строение и историю формирования как в архее, так и в раннем протерозое [Gorbatshev, Bogdanova, 1993; Bogdanova et al., 2016]. Границы этих сегментов четко маркируются мезо-неопротерозойскими Волыно-Оршанским, Среднерусским и Пачелмским авлакогенами, которые определенно унаследовали главные коллизионные швы раннего протерозоя.

Они сходятся в центре кратона в районе Смоленска, где Среднерусский авлакоген замыкается Нелидовским (а также Торжокским) блоком, и распадаются на серию отдельных грабенов. Волыно-Оршанская впадина продолжает авлакоген на юго-запад.

Эти авлакогены четко выражены протяженными линейными аномалиями гравитационного [Wybraniec et al., 1998] и магнитного полей [Bogdanova et al., 1996], дискордантных на границах сегментов. Сегмент Фенноскандия выделяется сочетанием блоков и поясов с разными интенсивно-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail*: vic@nw-geophysics.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант; ООО «Северо-Запад», геофизик; *e-mail*: yaroslavtseva.anna@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии докт. геол.-минер. н., профессор; *e-mail*: natalia.lubnina@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, науч. с.; *e-mail*: nickshus@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, канд. физ.-мат. н., доцент; *e-mail*: mail@nw-geo.ru

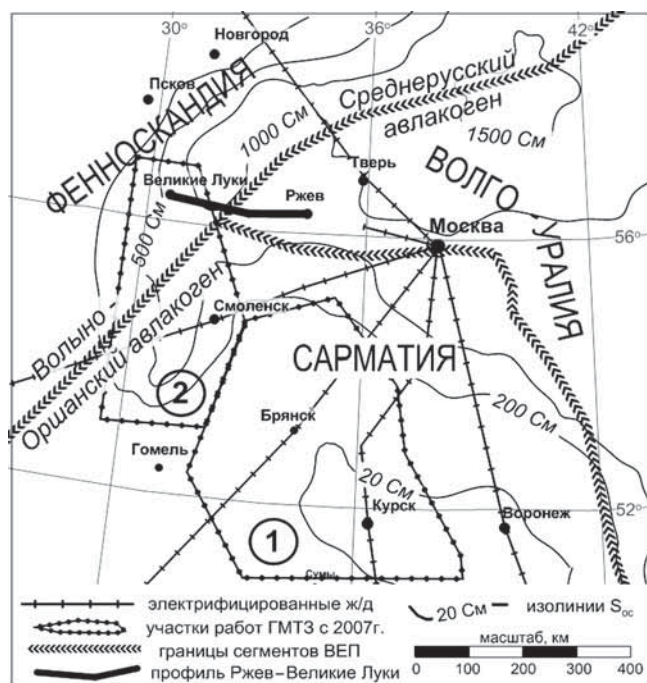


Рис. 1. Положение профиля ГМТЗ Ржев–Великие Луки

стью магнитного поля и простираением магнитных аномалий. Как правило, блоки с пониженной намагниченностью ограничены сравнительно узкими поясами высокоградиентных аномалий и связаны с палеопротерозойскими зонами деформаций [Bogdanova et al., 2016].

В качестве зоны сочленения Фенноскандии и Волго-Сарматии рассматривается Среднерусский или Центральнорусский складчатый пояс, который маркируется Среднерусским авлакогеном [Bogdanova et al., 1996]. Этот пояс выделен на основании геофизических данных [Erinchek, Milshtein, 1993] и перекрыт мощным осадочным чехлом (до 5 км) Московской синеклизы. До настоящего времени вопросы его строения и тектонических условий формирования остаются открытыми [Цыганов, 2002; Богданова и др., 2004; Гарецкий и др., 2018].

Зимой 2020 г. в рамках проведения факультативной практики со студентами-геофизиками геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в зоне сочленения Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии были выполнены пятикомпонентные магнитотеллурические/магнитовариационные (МТ/МВ) зондирования по 200-километровому профилю Ржев–Великие Луки (рис. 1). Для регистрации МТ-поля использованы современные отечественные магнитотеллурические станции МЭРИ–ПРО (производства ООО «Северо-Запад», Москва). Средняя продолжительность записи МТ-поля на точках измерений составляла 20–24 час, что в условиях изучаемого геоэлектрического разреза отвечает глубинности зондирования около 100 км. Синхронная регистрация МТ-поля одновременно на 4 точках, расположенных в разных концах профиля, позволила использовать обработ-

ку *remote* для борьбы с локальными электромагнитными помехами. Для расчета горизонтального магнитного тензора (ГМТ) использованы данные Киевской магнитной обсерватории и магнитной обсерватории, расположенной на учебно-научном полигоне геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в д. Александровка (Калужская область).

Обзор магнитотеллурических работ последних лет. Отдельные сегменты Восточно-Европейской платформы (ВЕП) слабо изучены или практически не изучены глубинными геофизическими методами, такими, как ГСЗ, МОВ–ОГТ или МТЗ, это относится и к зоне сочленения трех крупнейших сегментов ВЕП — Сарматии, Волго-Уралии и Фенноскандии. В рассматриваемом районе работы выполняли по отдельным профилям МОВ–ОГТ еще во времена СССР, а магнитотеллурические измерения до середины 2000-х гг. были представлены низкочастотными МТ-исследованиями, выполненными на территории Белоруссии по профилю Лоев–Усвяты (в объеме 105 фактических точек), а также по опорному профилю 1–ЕВ.

В последнее десятилетие работы методом ГМТЗ на ВЕП активизировались. В период с 2007 по 2014 г. группой KIROVOGRAD, объединившей ученых из МГУ имени М.В. Ломоносова, ЦГЭМИ ИФЗ РАН, Института геофизики имени Субботина УАН, были проведены площадные работы ГМТЗ на северо-западном склоне Воронежской антеклизы (рис. 1). Объектами исследования группы KIROVOGRAD были коровые Кировоградско-Баятинская и Курская аномалии электропроводности, связанные с шовными зонами, разделяющими крупные архейские и протерозойские блоки Сарматии. К этим сутурным зонам приурочены крупнейшие железорудные и урановые месторождения Криворожской и Курской рудных провинций. По итогам 3D-инверсии ГМТ-данных построена трехмерная геоэлектрическая модель северного склона Воронежской антеклизы, оценены глубина залегания, суммарная проводимость проводника [Куликов и др., 2018; Варенцов, 2011].

В 2018 г. сотрудниками ЦГЭМИ ИФЗ РАН, ГИН РАН и МГУ имени М.В. Ломоносова была организована рабочая группа SMOLENSK для продолжения в северном и северо-западном направлениях работ ГМТЗ, выполненных в рамках изучения Кировоградско-Баятинской аномалии. За 2018 и 2019 гг. выполнено (рис. 1) 39 синхронных МТ/МВ зондирований [Варенцов, 2020], планируется выполнить еще до 20 синхронных зондирований на периферии Оршанской глубинной аномалии.

Материалы и методы исследований. Геоэлектрическая обстановка и помехи. Чувствительность магнитотеллурических параметров к коровым неоднородностям удельного сопротивления коренным образом зависит от суммарной продольной проводимости осадочного чехла (S_{oc}). Наличие

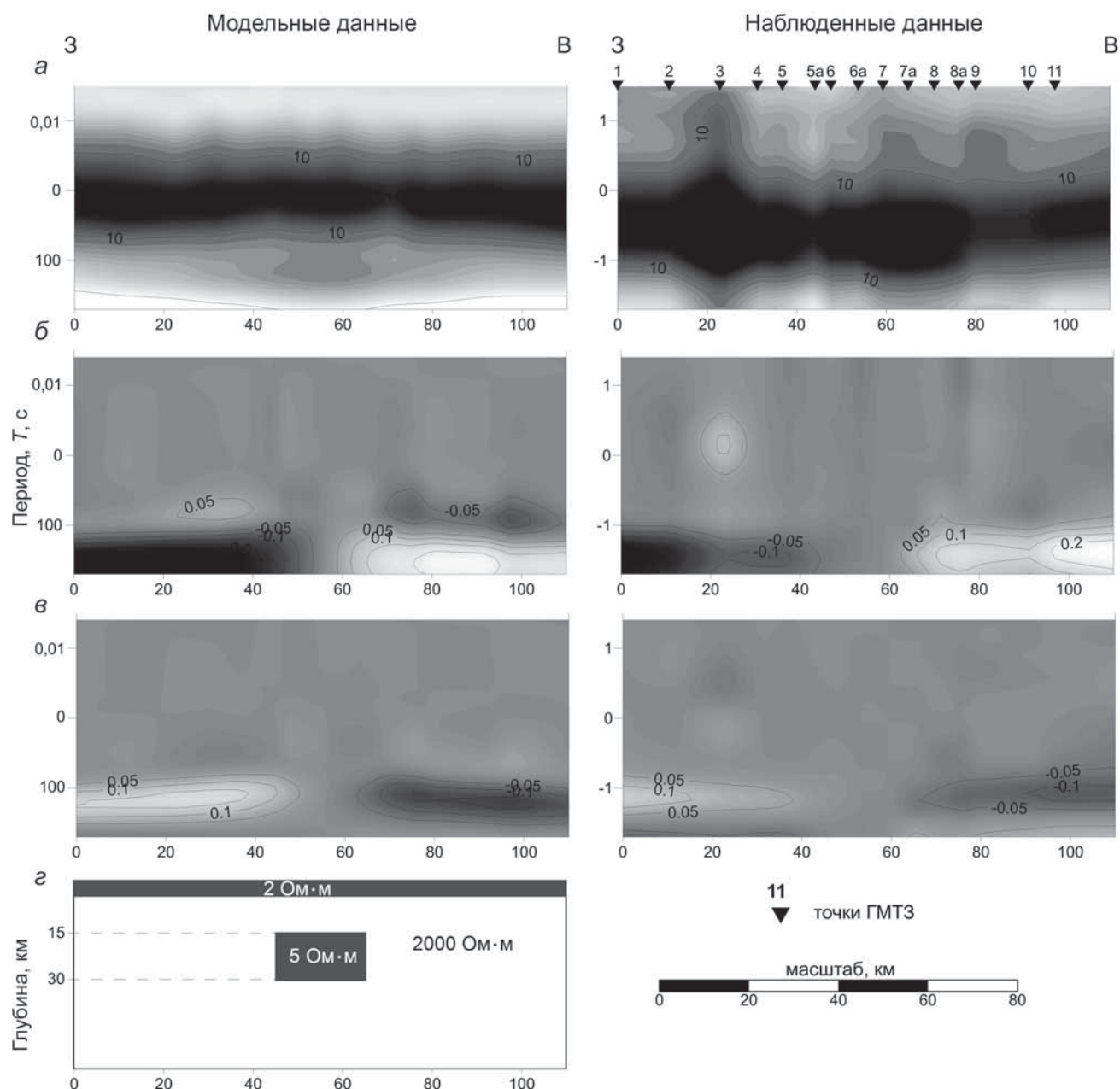


Рис. 2. Псевдоразрезы: *а* — продольной компоненты ρ_k ; *б* — реальной части W_{zy} ; *в* — мнимой части W_{zy} по модельным и экспериментальным данным; *г* — модель № 1

мощного проводящего чехла препятствует изучению геоэлектрической структуры консолидированной коры.

Высокое качество результатов, полученных при изучении Кировоградско-Брятинской аномалии коровой электропроводности на северо-западном склоне Воронежской антеклизы (ВА), во многом обеспечено низкими значениями S_{oc} на площади работ (30–80 См). Профиль Ржев–Великие Луки находится на границе Московской синеклизы и Оршанской впадины в менее благоприятной обстановке, где мощность осадочных отложений составляет 200–1500 м, а их суммарная проводимость превышает 1000 См (рис. 1). При таких условиях акцент необходимо делать на магнитовариационных параметрах — компонентах

матрицы Визе (W_{zx} , W_{zy}) и горизонтального магнитного тензора (M), которые меньше подвержены экранированию приповерхностным проводником, что ярко иллюстрируют простые модельные расчеты (рис. 2).

Модель № 1 (рис. 2, *г*) — проводящее прямоугольное тело размером 15×20 км ($\rho=5$ Ом·м), имитирующее коровый проводник, расположенный в высокоомной литосфере ($\rho=1000$ Ом·м). В модели присутствует приповерхностный слой осадочных пород с низким сопротивлением ($\rho=2$ Ом·м).

Над моделью № 1 приведены псевдоразрезы трех рассчитанных МТ-параметров: продольной компоненты кажущегося сопротивления ρ_k^{\parallel} , наиболее чувствительной к проводнику (рис. 2, *а*); а также реальной (рис. 2, *б*) и мнимой (рис. 2, *в*)

составляющих поперечной компоненты матрицы Визе ($\text{Re } W_{zy}$, $\text{Im } W_{zy}$).

Компоненты матрицы Визе ярко реагируют на присутствие в разрезе глубинного проводника, создавая положительные и отрицательные контрастные аномалии по его разные стороны на периодах >100 с. Характер псевдоразреза ρ_k^{\parallel} определяется параметрами приповерхностного проводника и отражает практически горизонтальнослоистый разрез. Рядом с модельными расчетами приведены экспериментальные данные в виде псевдоразрезов тех же компонент, которые показывают, что на профиле Ржев–Великие Луки мы имеем дело именно с такой геоэлектрической моделью (рис. 2).

Наиболее интенсивные помехи в электрическом поле, носящие региональный характер на территории ВЕП, связаны с электрифицированными железными дорогами. Практически все железные дороги, расходящиеся от Москвы по радиальным направлениям, электрифицированы на расстояние до 500–600 км от столицы, за исключением дороги Москва–Рига. Ее электрифицированная часть заканчивается в районе г. Волоколамск (на расстоянии 120 км от Москвы). Это создает благоприятную, с точки зрения уровня помех, обстановку для проведения магнитотеллурических работ вдоль дороги Москва–Рига (рис. 1). Менее интенсивные помехи локального характера связаны в районе г. Ржев с пересечением крупнейшего газопровода Ямал–Европа, находящегося под катодной защитой, а также с высоковольтными и местными линиями электропередач и с городской инфраструктурой. Все точки измерений были расположены вдоль автомобильной трассы М-11 (Москва–Рига) на расстоянии не менее 1 км от дороги для уменьшения влияния вибрации на индукционные датчики. Расстояние между точками ГМТЗ составляло около 10 км. На участке г. Нелидово–г. Западная Двина, где выявлено аномальное поведение МТ-параметров, шаг между точками зондирования составил около 5 км.

Аппаратура, методика, обработка материалов.

Для регистрации МТ-поля в диапазоне частот от 0,0001 до 1000 Гц использована аппаратура «МЭРИ–ПРО» производства ООО «Северо-Запад» (Москва). Индукционные датчики магнитного поля IMS-10 разработаны в компании ВЕГА (Санкт-Петербург). Приемные линии MN длиной 40 м и датчики поля раскладывались по магнитному меридиану и широте. Обработку записей МТ-поля осуществляли с помощью программы EPI-KIT, разработанной в ООО «Северо-Запад». Суточную запись проводили синхронно 4 станции, которые были расположены на разных участках профиля. Это позволило использовать обработку *remote* для борьбы с локальными электромагнитными помехами. Для расчета горизонтального магнитного тензора М использованы данные

Киевской магнитной обсерватории и магнитной обсерватории, расположенной на учебно-научном полигоне геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в д. Александровка (Калужская область).

Качество полученных данных оценивали в программе QC–QA (ООО «Северо-Запад»). Удовлетворительное качество наблюдается на восточном и западном краях профиля при приближении к городам Ржев и Великие Луки. В центре профиля качество данных преимущественно хорошее (рис. 3).

Обработка на соседние рядовые точки позволила в отдельных случаях повысить качество частотных зависимостей компонент импеданса, особенно в области высоких значений частоты и мертвого магнитотеллурического диапазона (рис. 3).

Результаты исследований и их обсуждение.

Качественный анализ данных. Типичные кривые кажущегося сопротивления, фазы импеданса и компоненты матрицы Визе в виде сплайнов приведены на рис. 4. На флангах профиля кривые ρ_k имеют тип НК, а значения модуля W_{zy} (широтная компонента, чувствительная к проводникам субмеридионального азимута) не превышают 0,2, с максимумом на периоде около 850 с. Суммарная продольная проводимость осадков (S_{oc}), оцененная по асимптотам эффективных кривых ρ_k , увеличивается от 750 до 1250 См в западном направлении от г. Ржев до г. Великие Луки.

В центре профиля, в районе городов Западная Двина и Нелидово, на кривых ρ_k наблюдается появление широтного минимума с неярко выраженными двумя экстремумами, а суммарная проводимость S_{oc} увеличивается до 2000 См (рис. 4, а). На псевдоразрезах кажущегося сопротивления и фаз импеданса наблюдается практически горизонтальнослоистый разрез с незначительными колебаниями мощности верхнего проводника (рис. 2).

Минимум на кривых $\text{Re } W_{zy}$ на точках 06, 06а и 07 и смена знака низкочастотного максимума (рис. 4, в) свидетельствуют о пересечении на этом участке глубинного субмеридионального проводника. Максимальные положительные (+0,25) и отрицательные (–0,26) значения $\text{Re } W_{zy}$ на периоде 600 с фиксируются на точках ГМТЗ № 12 и 01 соответственно. Смена знака на вещественной и мнимой компонентах W_{zy} хорошо иллюстрируется псевдоразрезами этих компонент (рис. 2).

Еще один наглядный способ представления компонент матрицы Визе — вещественные и мнимые индукционные векторы (типперы), которые направлены от проводящих структур. Основное направление векторов на периоде 500 с — южное (рис. 5). Это связано с тем, что к северу от линии профиля находятся крупные отрицательные структуры ВЕП, характеризующиеся большими значениями суммарной продольной проводимости

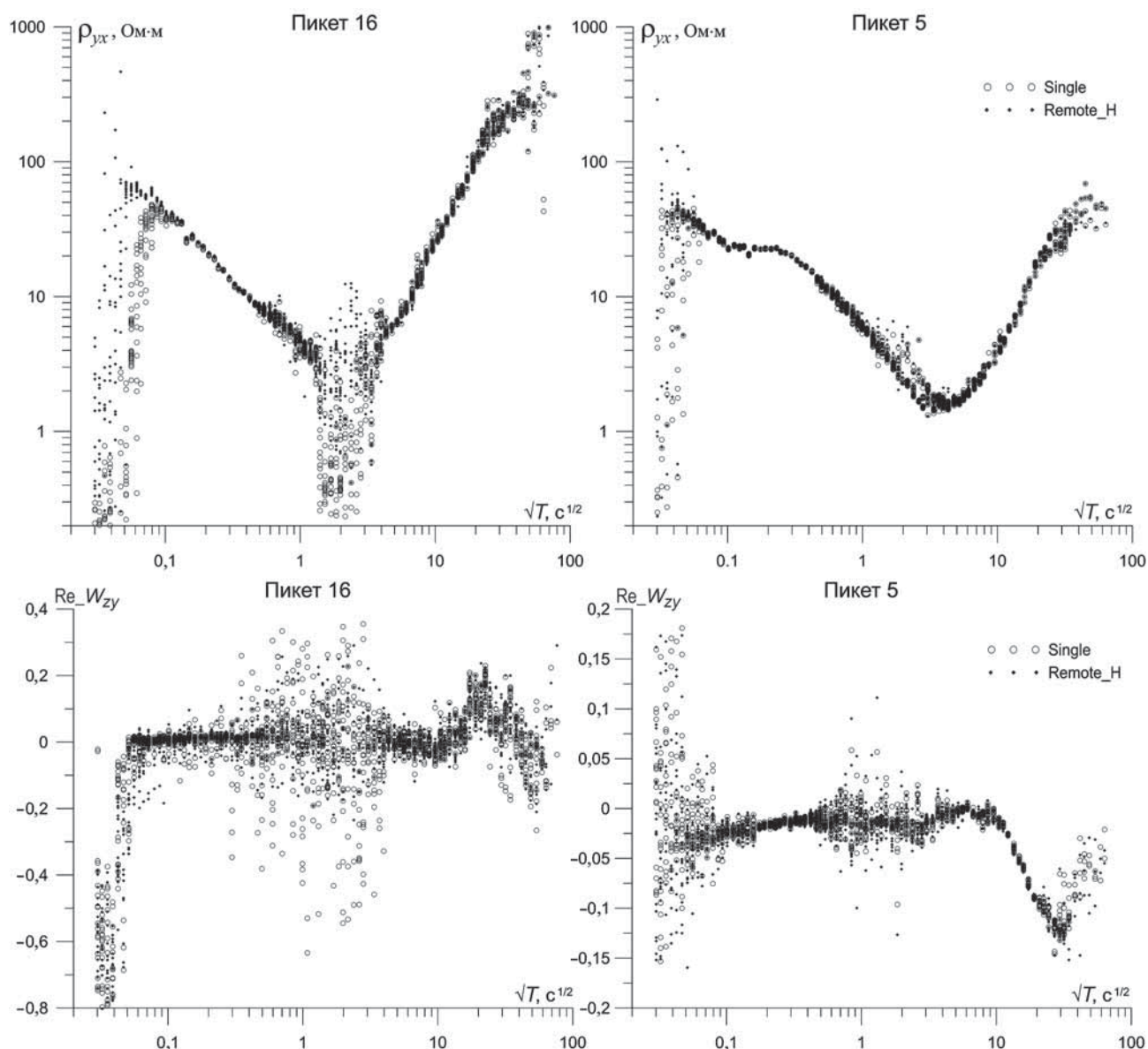


Рис. 3. Результаты обработки *single* и *remote* на точках № 5 (хорошее качество данных) и № 16 (удовлетворительное качество данных)

осадочного чехла. Однако на отдельных участках профиля у векторов появляется широтная составляющая, которая отвечает присутствию в разрезе проводящих структур субмеридионального направления. Смена азимута векторов с юго-западного (точки № 1–6) на юго-восточное (точки № 7–10) подтверждает наличие меридиональной проводящей структуры с осью между точками № 6 и 7. Азимут простираения проводника хорошо читается по фазовым полярным диаграммам импеданса и составляет около 30° на северо-восток.

Количественная интерпретация. Инверсия данных MTЗ осуществлялась в программе А.Е. Каминского ZONDMT2D. Инвертировали четыре компоненты тензора импеданса и две компоненты типпера. В качестве стартовой модели выступала модель однородного полупространства с фиксированным значением удельного электрического сопротивления (УЭС).

Выполнено несколько вариантов инверсии, при которых изменяли следующие параметры: вертикальную сетку разбиения, УЭС стартовой модели, число итераций, вес отдельных компонент инверсии. На рис. 6 приведена геоэлектрическая модель, полученная в результате осреднения нескольких альтернативных 2D-решений обратной задачи. Для более наглядного представления результата во всем диапазоне глубины модель УЭС показана в двух вертикальных масштабах.

На разрезе до глубины 10 км (рис. 6, б) мы наблюдали двухслойный разрез. Верхний проводящий слой — осадочный чехол. Средние значения удельного сопротивления пород осадочного чехла низкие (1 Ом·м), что связано с высокой минерализацией грунтовых вод в девонских и вендских горизонтах. Мощность осадочного чехла увеличивается с востока на запад приблизительно от 1500 до 2000 м.

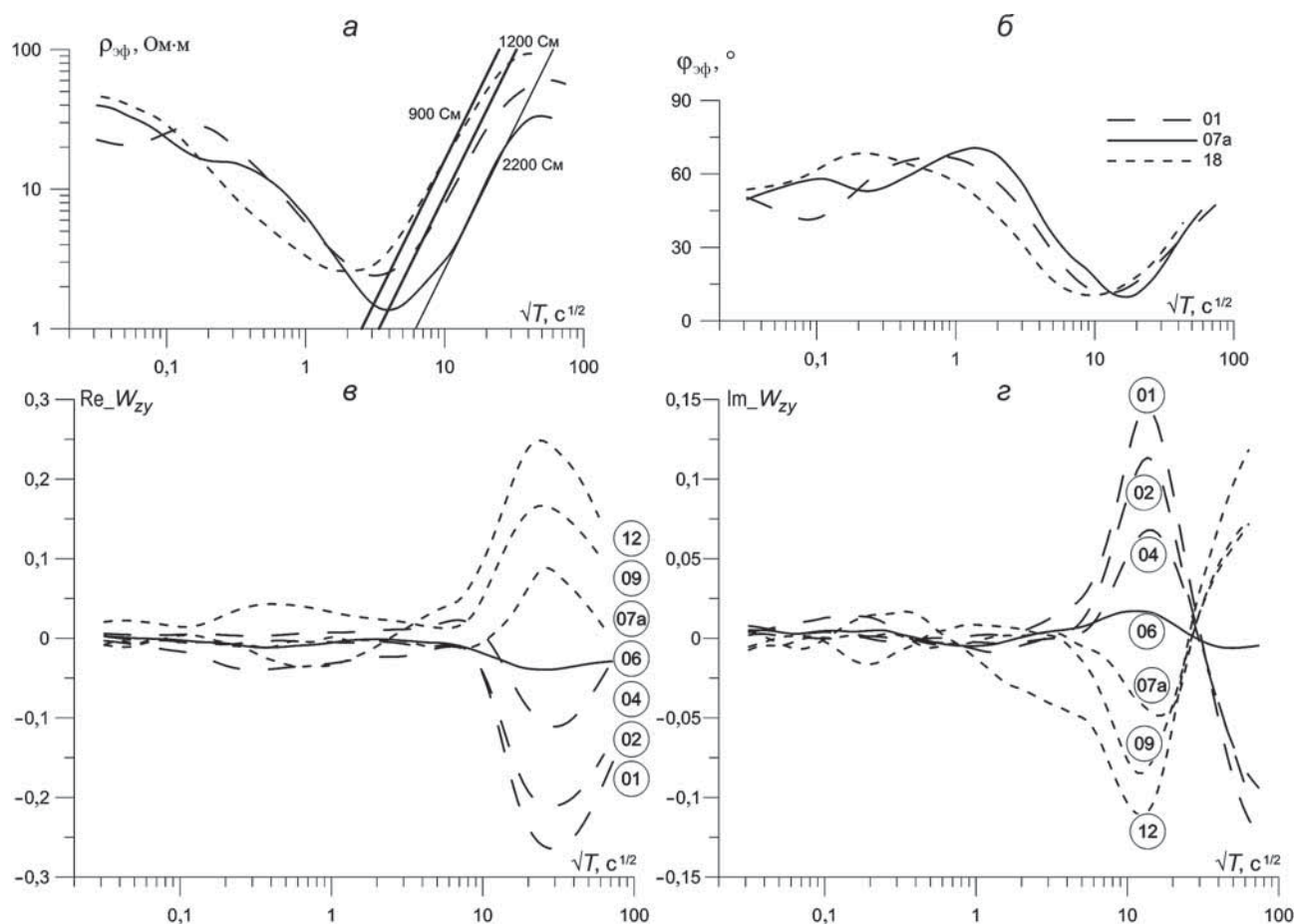


Рис. 4. Типичные кривые кажущегося сопротивления (а), фазы импеданса (эффективные компоненты) (б), реальной (в) и мнимой (з) частей компоненты матрицы Визе W_{zy}

Между точками МТЗ № 5-6а и № 8а-11 в верхних горизонтах земной коры фиксируются отрицательные проводящие структуры типа грабена или авлакогена. На участке профиля между точками № 5а-7а выделяется субвертикальная область пониженных значений сопротивления (рис. 6, в), которая прослеживается до глубоких горизонтов земной коры. Ширина аномальной зоны составляет около 25 км, максимум проводимости приходится на глубину 15–30 км. Непосредственно над аномальной зоной наблюдаются минимумы аномального магнитного и гравитационного полей (рис. 6, а).

Таким образом, на геоэлектрической модели, полученной по данным магнитотеллурических зондирований вдоль профиля Ржев–Великие Луки, мы выделяем две аномальные зоны — восточную, отражающую наличие грабена или авлакогена до глубины 3–4 км в основании осадочного чехла, и западную зону, представленную субвертикальной проводящей областью, которая прослеживается через всю кору.

Геологическая интерпретация результатов. Яркая проводящая зона глубинного заложения, вероятно, служит границей двух крупных блоков докембрийского основания ВЕП — Сарматии на востоке и Фенноскандии на западе. Двумерная

инверсия дает в большинстве случаев крутой наклон проводника в восточном направлении. Коровый проводник сопровождается региональными минимумами магнитного и гравитационного полей, что может свидетельствовать о повышенной трещиноватости и проницаемости пород верхней и средней коры в зоне сочленения двух крупных сегментов ВЕП.

В раннем палеопротерозое (2,0–1,95 млрд лет назад) между Волго-Сарматией и Фенноскандией существовал широкий океан (остатки которого представлены комплексами Белорусской океанической плиты, по [Гарецкий, Каратаев, 2014]). Процесс постепенной субдукции Белорусской океанической плиты в юго-восточном направлении под континентальный сегмент новообразованной Волго-Сарматии привел к образованию Осницко-Микашевичско-Московского магматического пояса.

Еще один вывод, полученный по результатам интерпретации магнитотеллурических данных: под Фенноскандией мощность высокоомного блока, отождествляемого нами с континентальной корой, меньше, чем под Сарматией.

Заключение. Работы методом глубинного магнитотеллурического зондирования, выполненные группой преподавателей и студентов геологиче-

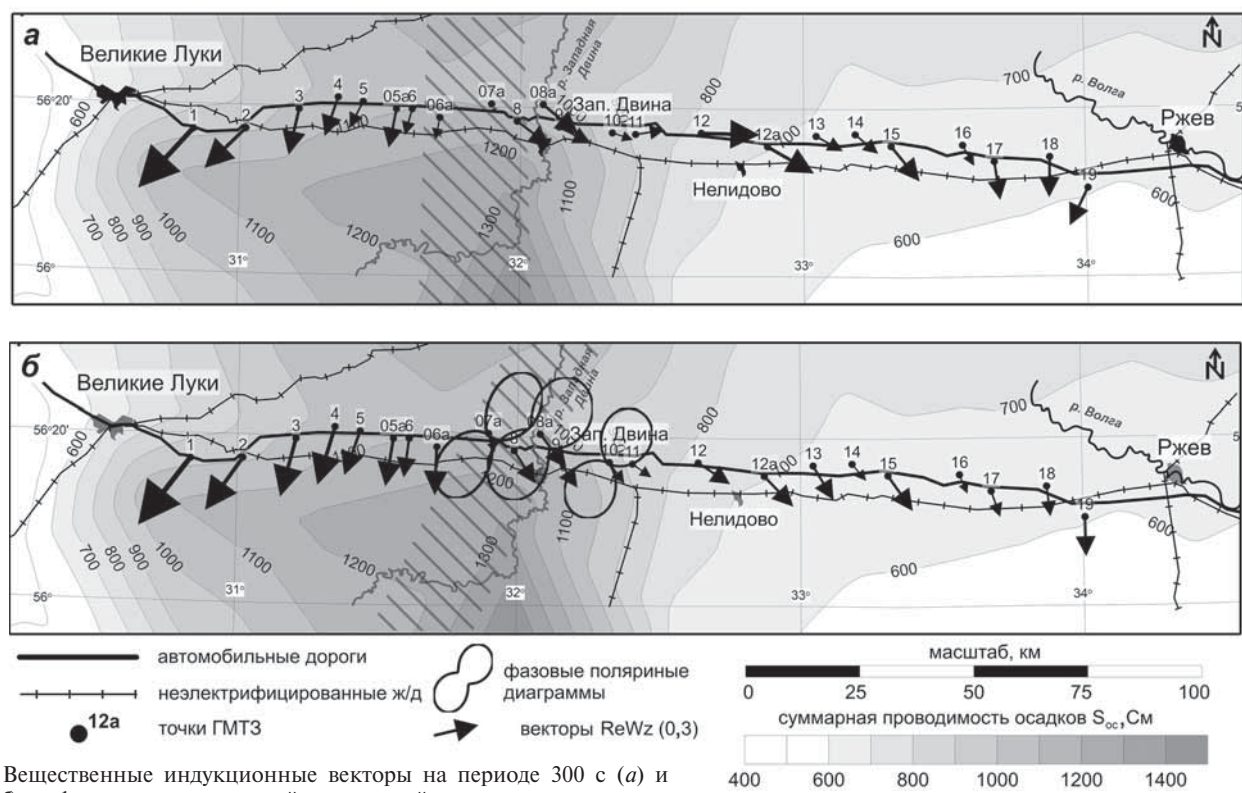


Рис. 5. Вещественные индукционные векторы на периоде 300 с (а) и 1500 с (б) на фоне карты суммарной продольной проводимости осадочного чехла S_{oc}

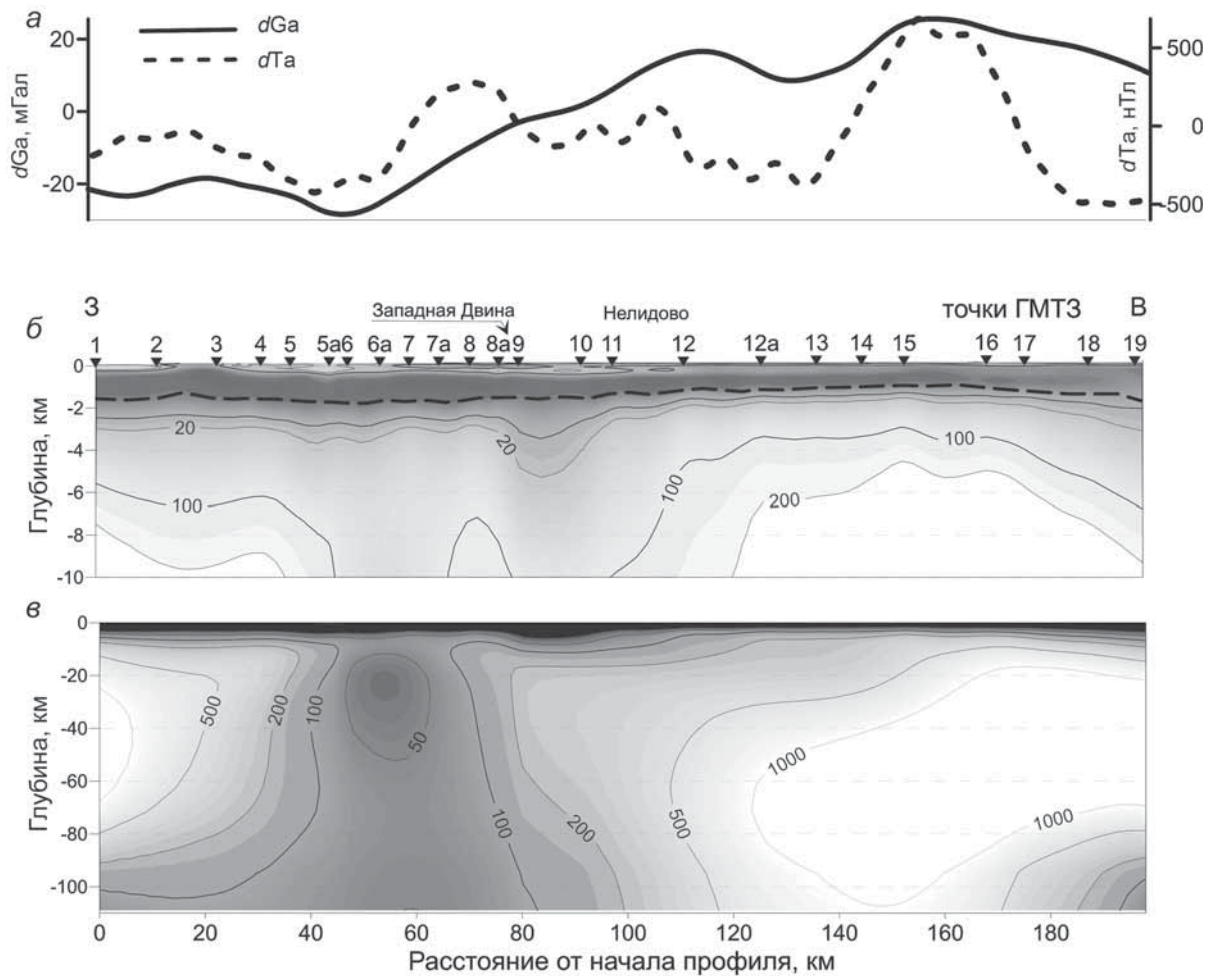


Рис. 6. Результаты интерпретации GMT3 на профиле Ржев–Великие Луки: а — графики аномального магнитного и гравитационного полей вдоль профиля; б — геоэлектрическая модель до глубины 10 км; в — геоэлектрическая модель до глубины 110 км

ского факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках факультативной зимней практики, позволили получить новые важные данные о строении осадочного чехла и коровой проводимости в зоне сочленения крупных блоков земной коры ВЕП. Граница между Сарматией и Фенноскандией отмечается на геоэлектрических моделях, построенных по результатам 2D-инверсии МТ-данных, субвертикальной зоной пониженных значений удельного сопротивления в земной коре. Максимальная

проводимость в аномальной зоне отмечена в средней коре на глубине 20–30 км. В осадочном чехле выделяются две отрицательные структуры, которые, предположительно, представляют собой авлакогены рифейского возраста.

Для уточнения геоэлектрических параметров глубинной части модели: нижней коры — верхней мантии необходимо увеличение длины профиля и продолжительности записи на точках зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богданова С.В., Бибикова Е.В., Постников А.В., Таран Л.Н. Раннепротерозойский магматический пояс под Москвой // Докл. РАН. 2004. Т. 395, № 3. С. 376–380.

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 // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей // Мат-лы 47-й сессии Междунар. науч. семинара Д.Г. Успенского—В.Н. Страхова. Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга Воронеж», 2020. С. 52–56.

Варенцов И.М., Ковачикова С., Куликов В.А. и др. Коровые аномалии электропроводности на западном склоне Воронежской антеклизы // Мат-лы междунар. конф. памяти В.Е. Хаина «Современное состояние наук о Земле». М., 2011. С. 290–295.

Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И. Шовные зоны Фенноскандии, Сарматии и Волго-Уралии. Минск: Беларуская навука, 2014. 120 с.

Гарецкий Р.Г., Леонов М.Г. «Структуры омота» — новая категория зон взаимодействия литосферных плитопотоков // Докл. РАН. 2018. Т. 478, № 5. С. 546–550.

Куликов В.А., Алексанова Е.Д., Варенцов И.М. и др. Барятинская коровая аномалия электропроводности по

результатам площадных МТ-исследований // Геофизика. 2018. № 1. С. 31–43.

Цыганов В.А. Геолого-тектоническое строение верхней части разреза кристаллического фундамента центральной части Восточно-Европейской платформы и его отражение в структурах верхней части осадочного чехла // Георесурсы. 2002. № 4 (12). С. 38–45.

Bogdanova S.V., Gorbatschev R., Garetsky R.G. EUROPE. East European Craton // Reference module in Earth systems and environmental sciences. Elsevier, 2016. P. 1–18.

Bogdanova S.V., Pashkevich I.K., Gorbatschev R., Orlyuk M. Riphean rifting and major Palaeoproterozoic boundaries in the East European craton: geology and geophysics // Tectonophysics. 1996. Vol. 268. P. 1–22.

Erinchek Y.M., Milshtein E.D. The Middle Russian transplatform palaeorift system // Doklady (Transactions) of the Russian Academy of Sciences. 1993. Vol. 329, N 1. P. 82–86.

Gorbatschev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic shield // Precambrian Research. 1993. Vol. 64. P. 3–21.

Wybraniec S., Zhou S., Thybo H. et al. New map compiled of Europe's gravity field. EOS Transactions // American Geophysical Union. 1998. Vol. 79. P. 437–442.

Поступила в редакцию 08.06.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2021