

УДК 550.837.211

Результаты магнитотеллурических исследований литосферы Карело-Кольского региона

А. А. Скороходов*, А. Н. Шевцов, А. Е. Ганнибал, Т. Г. Короткова

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: a.skorokhodov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-8844>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
30.01.2026;

получена
после доработки
23.03.2026;

принята
к публикации
30.03.2026

Ключевые слова:
магнитотеллурические
зондирования,
электропроводность
литосферы,
двумерная инверсия,
Карельский геоблок,
эксперимент FENICS

Для цитирования

В работе рассмотрены результаты магнитотеллурических зондирований в Восточной части Фенноскандинавского щита, на территории Мурманской области и Республики Карелия, выполненных в рамках серии экспериментов FENICS 2014, 2019, 2024 годов. В ходе этой серии экспериментов по глубинному электромагнитному зондированию получен массив магнитотеллурических данных с применением современных измерительных станций. Точки наблюдений были представлены в виде трех профилей. На основе полярных диаграмм, а также параметров Свифта и Бара произведен отбор данных естественного поля в АМТ-МТ диапазоне, соответствующих двумерному приближению. В процессе исследований выявлен общий характер кривых кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса. Выполнена двумерная инверсия магнитотеллурических зондирований по трем профилям с помощью программы MARE2DEM. При этом выделены две зоны пониженного удельного сопротивления, которые согласуются с предыдущими магнитотеллурическими исследованиями по профилю SVEKA в районе Ладожской аномалии электропроводности, а также с общим характером региональных геологических структур.

Скороходов А. А. и др. Результаты магнитотеллурических исследований литосферы Карело-Кольского региона. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 2. С. 237–252. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-237-252>.

The results of magnetotelluric studies of the lithosphere of the Karelian-Kola region

Alexey A. Skorokhodov*, Alexandr N. Shevtsov,
Andrey E. Hannibal, Tamara G. Korotkova

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: a.skorokhodov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-8844>

Article info

Received
30.01.2026;

received
in revised form
23.03.2026;

accepted
30.03.2026

Key words:

electrical conductivity
of lithosphere,
magnetotellurics,
Karelian block,
FENICS experiment

Abstract

This paper examines the results of magnetotelluric soundings in the eastern Fennoscandian Shield, in the Murmansk region and the Republic of Karelia, conducted as part of the FENICS experiment series in 2014, 2019, and 2024. During this series of deep electromagnetic sounding experiments, a magnetotelluric data set has been obtained using modern measuring stations. Observation points have been presented in the form of three profiles. Based on polar diagrams, as well as the Swift and Barr parameters, natural field data in the AMT-MT range corresponding to the two-dimensional approximation have been selected. The study has revealed the general nature of the apparent resistivity and impedance phase curves. A two-dimensional inversion of the magnetotelluric soundings along three profiles has been performed using the MARE2DEM program. At that two zones of low specific resistance have been identified, which are consistent with previous magnetotelluric studies along the SVEKA profile in the area of the Ladoga electrical conductivity anomaly, as well as with the general nature of regional geological structures.

For citation

Skorokhodov, A. A. et al. 2026. The results of magnetotelluric studies of the lithosphere of the Karelian-Kola region. *Vestnik of MSTU*, 29(2), pp. 237–252. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-2-237-252>.

Введение

Исследуемый район расположен на стыке Карельского и Беломорского геоблоков. Карельский геоблок (Карельский кратон) сложен преимущественно архейскими, плохопроводящими гранито-гнейсами. Внутри геоблока присутствуют зоны, сложенные протерозойскими вулканогенными, вулканогенно-осадочными, диабазовыми породами складчатого типа, вытянутыми в северо-западном направлении. Беломорский геоблок – это складчатый пояс, представленный различными по составу, структуре и текстуре гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами, магматическими породами от ультрабазитов до гранитов (Гришин, 1990).

В период 2007–2024 гг. на территории Восточной части Балтийского щита была проведена серия экспериментов FENICS (Fennoscandian Electrical Conductivity with Natural & Controlled Sources) по глубинному электромагнитному зондированию литосферы с применением естественных и мощных контролируемых источников (Шевцов и др., 2022). Вдохновителем и руководителем этой серии экспериментов в 2007–2019 гг. являлся доктор геолого-минералогических наук А. А. Жамалетдинов. За годы проведения экспериментов помимо частотных зондирований с мощным контролируемым источником (Колобов и др., 2018) были собраны данные магнитотеллурических зондирований по значительной площади Восточной части Фенноскандинавского щита.

В работе выполнен анализ полученных данных с целью изучения глубинного строения литосферы на данной территории.

Материалы и методы

Геологическое описание района работ

Граница Беломорского и Карельского геоблоков, названная Восточно-Карельской зоной или главной зоной карелид (Харитонов, 1966), представляет собой сложную систему глубинных разломов. Супракрустальные комплексы этой зоны отличаются исключительным преобладанием в их составе метавулкаников.

Удельное сопротивление архейских пород варьируется в диапазоне от 10^3 до порядка 10^5 – 10^6 Ом·м, зависит в основном от флюидонасыщенности, и, соответственно, трещиноватости. Протерозойские породы также обладают высоким сопротивлением, однако могут иметь включения электропроводящих сульфидов и графитов в разломных зонах, что существенно снижает удельное сопротивление этих пород.

На исследуемой территории (рис. 1) было проведено множество геофизических исследований (Зуева и др., 2023; Шаров и др., 2007), результаты рассмотрены, в основном, в квазиодномерном приближении (Ковтун и др., 2005). Интерпретация результатов проведенных экспериментов в одномерном приближении ограничивает возможность более точного определения глубинного геоэлектрического разреза. Наличие протяженных складчатых структур создает предпосылку для двумерной аппроксимации данных экспериментов.

Данные магнитотеллурических зондирований. Измерения, обработка, погрешности

В рамках экспериментов FENICS измерения проводились так же, как при магнитотеллурических зондированиях (МТЗ): измерялись вариации горизонтального электрического и полного магнитного поля. За все годы на территории Карело-Кольского региона наблюдения выполнены в 60 точках. Длительность записи составляла 8–12 ч. В качестве приемников применялись 2 измерительные станции: широкополосные магнитотеллурические станции VMTU-10 (станция пятого поколения) и КВВН-7 (станция четвертого поколения) (Колобов и др., 2011), совместно разработанная сотрудниками Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра (ЦЭС КНЦ) РАН и Полярного геофизического института Кольского научного центра (ПГИ КНЦ) РАН. VMTU-10 имеет внутренний логгер, синхронизирующийся по GPS, работающий в 5-канальном режиме на частоте оцифровки до 1 000 Гц и до 32 разрядов чувствительности, также имеет возможность подключения внешнего логгера. Станция КВВН-7 регистрирует сигнал с помощью семи каналов и работает через внешний аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). В разные годы применялись разные АЦП с динамическим диапазоном 14–18 дБ и частотой оцифровки до 20 кГц.

Собственные шумы магнитных датчиков КВВН-7 и VMTU-10 составляют 20 – 30 фТл/Гц^{1/2} в области частотного диапазона 10–300 Гц, что на порядок ниже шумов естественного поля.

Таким образом, общий частотный диапазон данных МТЗ составил 0,1–10 000 Гц, но основная часть данных имеет полезный сигнал в диапазоне 1–300 Гц.

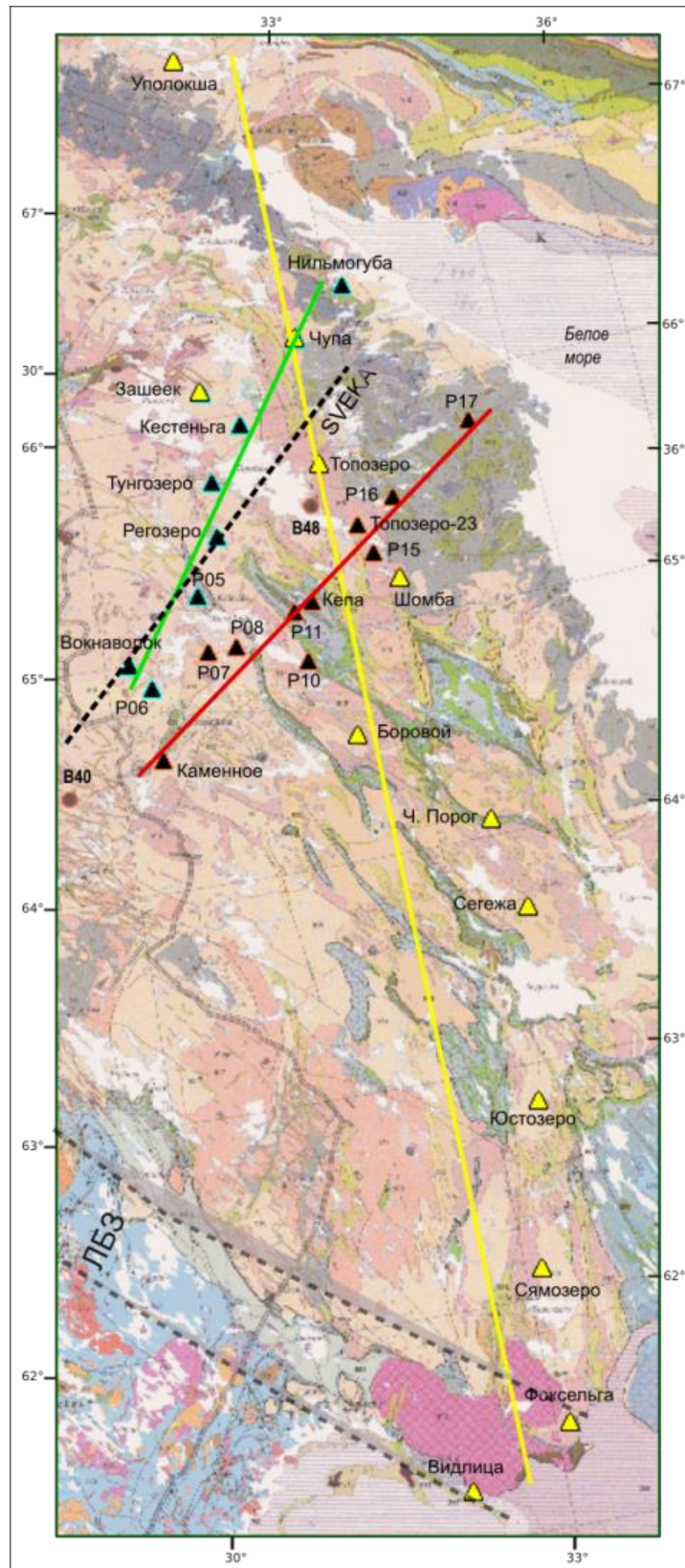


Рис. 1. Схема расположения профилей на геологической карте:
желтый – профиль 1, зеленый – профиль 2, красный – профиль 3, черный пунктир – профиль SVEKA,
серый пунктир – приблизительное положение Ладожско-Ботнической зоны
Fig. 1. Profile position scheme on geological map. Yellow line – profile 1, green line – profile 2,
red line – profile 3, black dash line – SVEKA profile, grey dash line –
approximate location of the Ladoga-Botnic zone

Обработка данных в режиме МТЗ была выполнена с помощью программы VMTU-1d для обработки и одномерной интерпретации данных станции VMTU-10. В ней реализована стандартная процедура обработки магнитотеллурических данных, предложенная Семеновым в 1985 г. (Семенов, 1985), которая актуальна и сегодня. Для каждой измеренной компоненты поля рассчитываются усредненные спектры и корреляционные соотношения между сопряженными и антисопряженными компонентами электромагнитного поля. Далее по частотам, удовлетворяющим критериям отбора, определяется отклик среды Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} , по которому определяется кажущееся удельное сопротивление:

$$\rho_{xy}(f) = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \cdot |Z_{xy}(f)|^2, \quad \varphi_{xy}(f) = \arg(Z_{xy}(f)), \quad (1)$$

$$\rho_{yx}(f) = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \cdot |Z_{yx}(f)|^2, \quad \varphi_{yx}(f) = \arg(Z_{yx}(f)), \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, f – частота.

С помощью вращения матрицы тензора импеданса по формуле

$$Z'(\alpha) = R(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \cdot R(\alpha)^{-1}, \quad R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (3)$$

определены направления главных компонент поля относительно магнитного меридиана, значения кажущегося удельного сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} (рис. 2, а) по этим направлениям (ТЕ и ТМ), фазы импеданса φ_{xy} , φ_{yx} (рис. 2, б) по формулам (1, 2), а также строятся полярные диаграммы (рис. 2) главных и дополнительных компонент тензора импеданса (Бердичевский, 2009).

Дополнительно рассчитаны параметры асимметрии Свифта $skew_s$ и Бара $skew_b$, определяющие размерность нижнего полупространства:

$$skew_s = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|}, \quad (4)$$

$$skew_b = \sqrt{\frac{|\operatorname{Im}(Z_{xy} \cdot Z_{yy}^* + Z_{xx} \cdot Z_{yx}^*)|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|}}, \quad (5)$$

где Z_{xy} , Z_{yx} – главные, Z_{xx} , Z_{yy} – дополнительные компоненты тензора импеданса.

Для дальнейшего рассмотрения выбирались данные, соответствующие двумерному приближению (Бердичевский, 2009).

Полярные диаграммы главной компоненты в случае одномерного и двумерного приближения имеют форму окружности, эллипса, или "расширенной" восьмерки, а диаграммы дополнительной компоненты – форму четырехлистника значительно меньшей амплитуды. В случае трехмерного, ассиметричного приближения диаграммы обеих компонент имеют сложные, близкие по амплитуде формы, а параметры Свифта и Бара в одномерном и двумерном приближении стремятся к нулю.

На рис. 2 показаны вычисленные по формуле (3) полярные диаграммы главной компоненты (xy), обозначенные синим цветом, и дополнительной (yx), обозначенные красным.

Как видно из рисунка, имеется согласованность между формой полярных диаграмм и значением инвариантов $skew$. Таким образом, произведен отбор частот, соответствующий двумерному приближению, при этом часть точек была исключена полностью. В результате для трех профилей было отобрано 28 точек МТЗ.

В каждой точке определены направления главных компонент поля относительно магнитного меридиана, значения кажущегося удельного сопротивления ρ_{xy} , ρ_{yx} (рис. 2, а), фазы импеданса φ_{xy} , φ_{yx} (рис. 3) по формулам (1, 2), отобранные для двумерного приближения.

На рис. 3, 4, 5 приведены кривые кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса, соответственно для профиля 1, 2 и 3. В ряде точек видны узкие частотные диапазоны и довольно большой разброс по погрешности, это связано как с присутствием высоких промышленных помех, так и с наличием отклика сигнала от трехмерных неоднородностей, которые были исключены с помощью параметров Свифта и Бара, а также полярных диаграмм.

За исключением нескольких точек наблюдений, общей чертой для амплитудных кривых является нисходящий вид на периодах больше 1 с, максимумы амплитудных кривых находятся на уровне 10^4 Ом·м и выше. Фазовые кривые в пределах погрешности, в основном, практически одинаковы для обеих поляризации, что подтверждает корректность выбора критериев отбора данных.

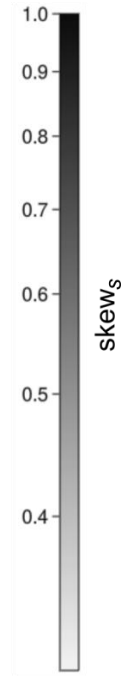
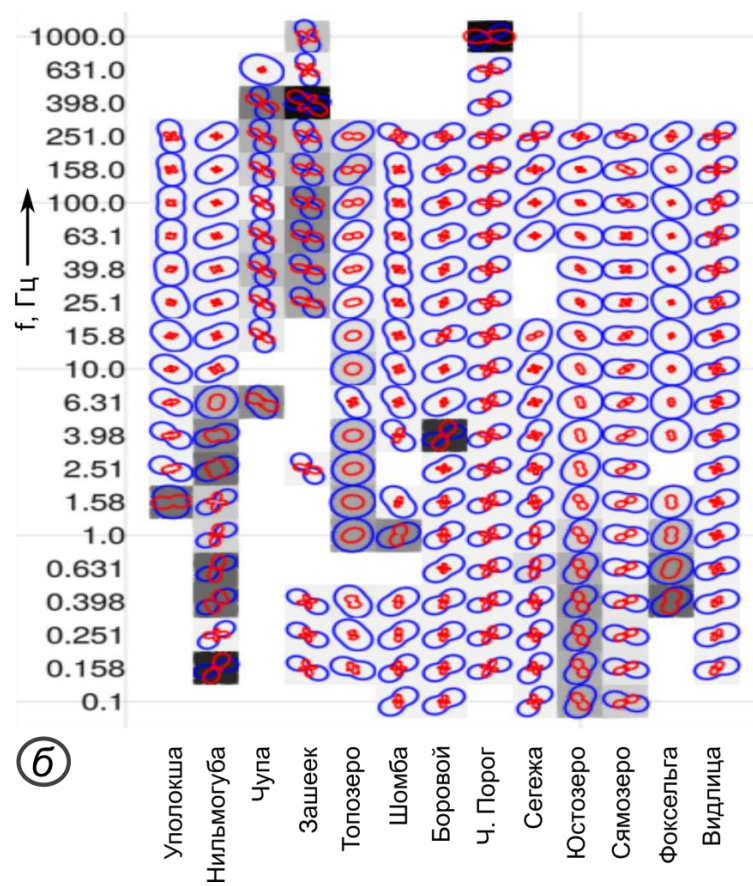
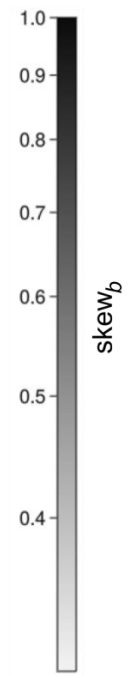
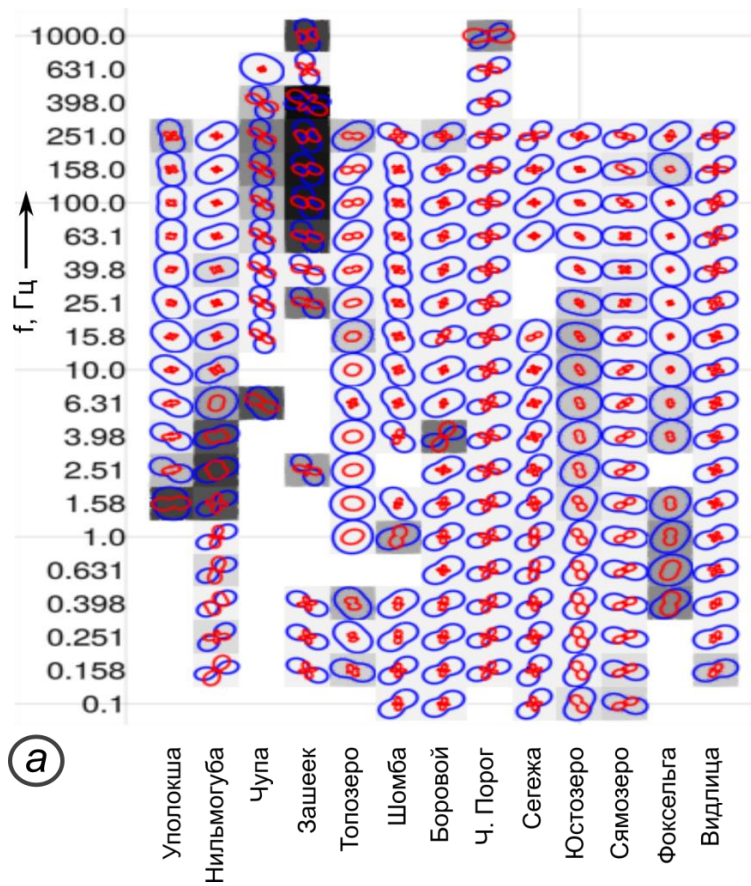


Рис. 2. Полярные диаграммы и параметр $skew$ для данных по профилю 1: a – параметр Бара ($skew_b$); b – параметр Свифта ($skew_s$)
 Fig. 2. Polar diagrams and $skew$ factor for data of profile 1: a – Bahr parameter ($skew_b$); b – Swift parameter ($skew_s$)

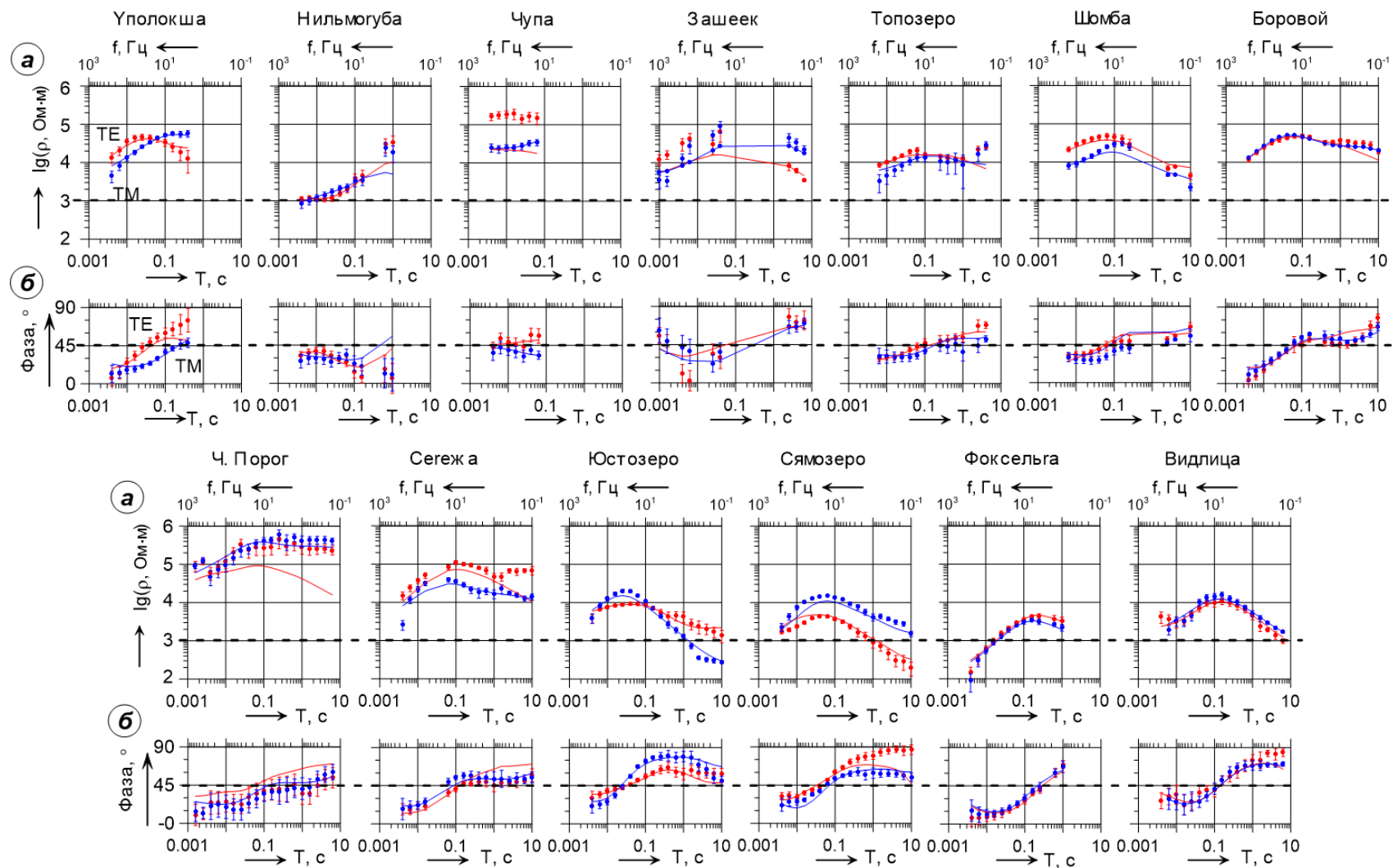


Рис. 3. Кривые кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса по профилю 1. Точками указаны измеренные данные, сплошными линиями – модельные данные по результатам инверсии; *a* – кривые кажущегося удельного сопротивления; *b* – кривые фазы импеданса

Fig. 3. Apparent resistivity and impedance phase curves on profile 1. The dots represent the measured data, and the solid lines represent the model data based on the inversion results; *a* – curves of apparent resistivity; *b* – curves of impedance phase

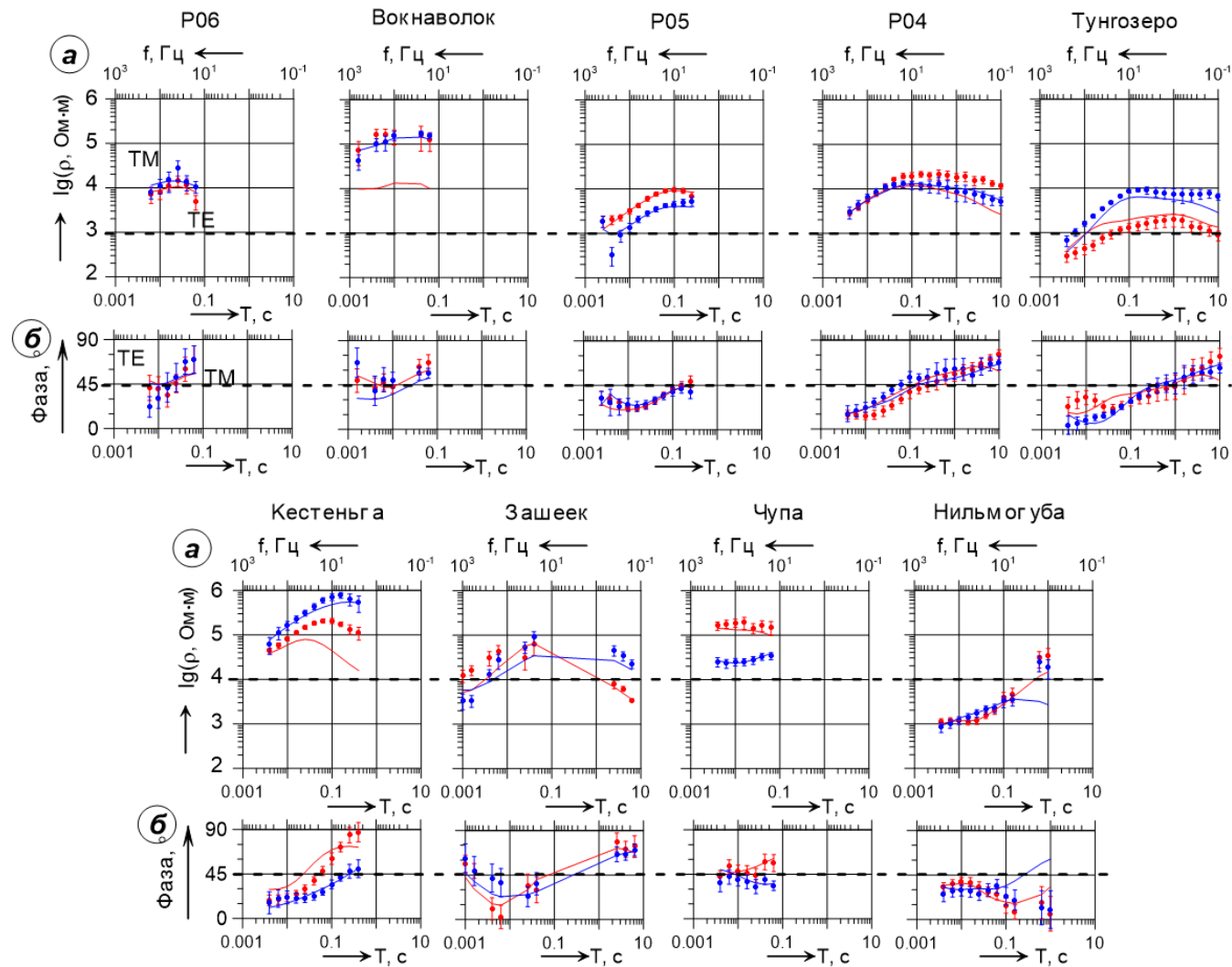


Рис. 4. Кривые кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса по профилю 2. Точками указаны измеренные данные, сплошными линиями – модельные данные по результатам инверсии; *a* – кривые кажущегося удельного сопротивления; *б* – кривые фазы импеданса

Fig. 4. Apparent resistivity and impedance phase curves on profile 2. The dots represent the measured data, and the solid lines represent the model data based on the inversion results; *a* – curves of apparent resistivity; *b* – curves of impedance phase

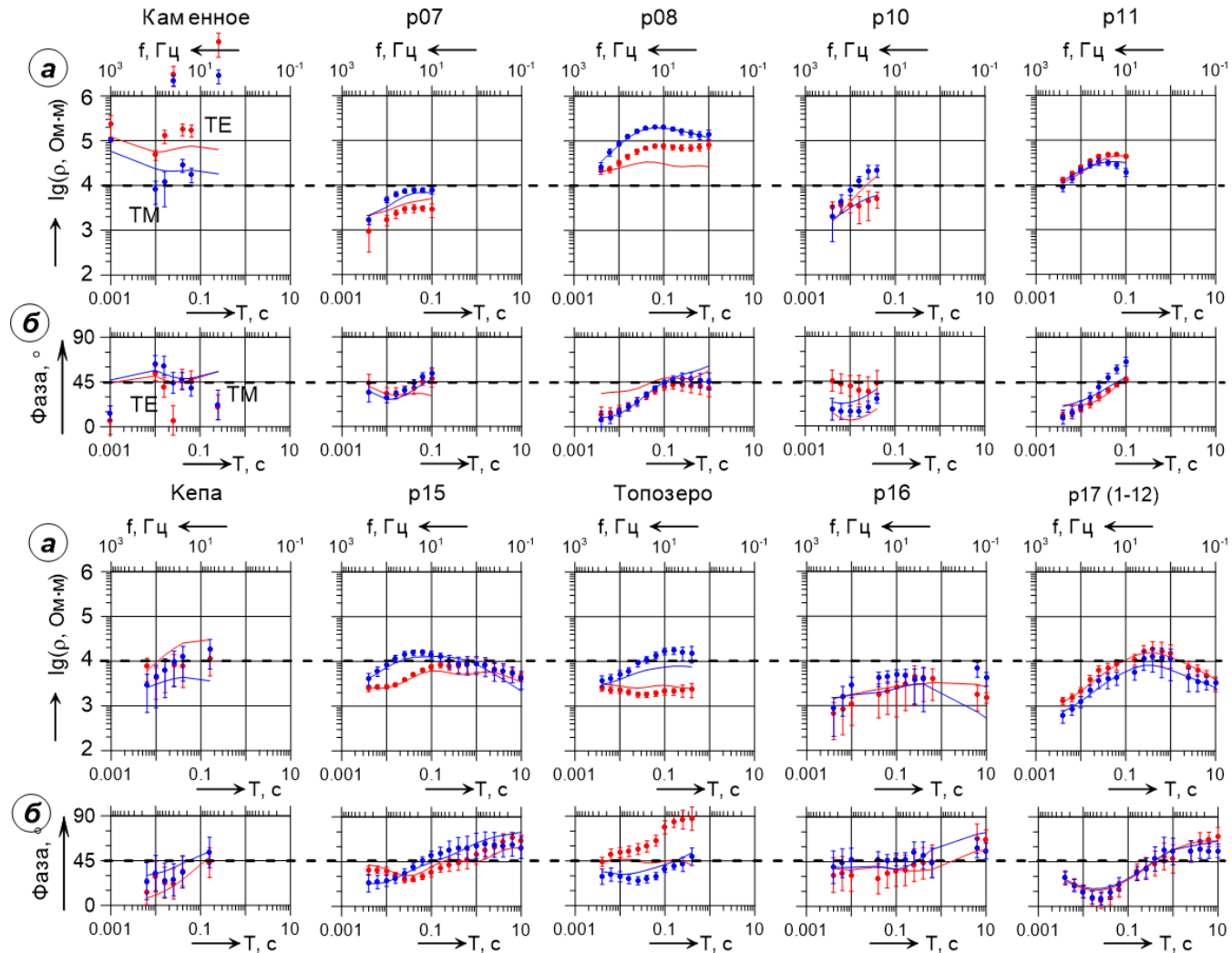


Рис. 5. Кривые кажущегося удельного сопротивления и фазы импеданса по профилю 3. Точками указаны измеренные данные, сплошными линиями – модельные данные по результатам инверсии; *a* – кривые кажущегося удельного сопротивления; *b* – кривые фазы импеданса
 Fig. 5. Apparent resistivity and impedance phase curves on profile 3. The dots represent the measured data, and the solid lines represent the model data based on the inversion results; *a* – curves of apparent resistivity; *b* – curves of impedance phase

Инверсия данных МТЗ

Для двумерной инверсии магнитотеллурических данных использовалась программа MARE2DEM (Key, 2016).

Перед решением обратной задачи были выполнены расчеты прямых задач с целью смоделировать искажения статического сдвига и влияния ионосферы. В MARE2DEM прямая задача решается методом конечных элементов с адаптивным разбиением, а обратная – по методу Оккама (Constable et al., 1987).

В качестве априорной модели были применены 2 одномерных (горизонтально-слоистых) разреза: нормальный, характерный для Кольского региона, и аномальный – больше соответствующий Карельскому региону (Жамалетдинов и др., 2004; 2015).

После нескольких циклов инверсии с разными моделями и значениями веса стало очевидно, что конечный результат практически не зависит от типа априорной модели, но значение веса модели может оказывать значительное влияние на конечный результат инверсии.

Также стоит отметить, что разрезы, получающиеся в результате инверсии, довольно сильно отличаются от начальной горизонтально-слоистой модели даже при $w = 1$.

Для каждого полученного разреза рассчитываются продольная проводимость и поперечное сопротивление по всей его глубине.

На профиле 1 (рис. 6) выделяются 2 зоны пониженного удельного сопротивления. В северной части профиля (Зашеек – Шомба) область понижения удельного сопротивления не имеет явной корреляции с геологическими структурами на поверхности и не может быть объяснена береговым эффектом, связанным с близостью Белого моря.

Проявившаяся в южной части зона пониженного сопротивления ассоциируется с Ладожской аномалией электропроводности (Куликов и др., 2021), приуроченной к Ладожско-Ботнической шовной зоне (рис. 1).

На профиле 2 (рис. 7) видно расхождение инверсий с разным весом априорной модели. Для $w = 0,5$ наблюдается аномалия пониженного удельного в районе точки Тунгозеро на глубине 25 км, которой нет на разрезе с $w = 1$. Это может быть объяснено программной особенностью подбора модели. Тем не менее в обоих случаях в этом районе присутствует область пониженного сопротивления, проявляющаяся в повышенной продольной проводимости (рис. 7, з).

На разрезах по профилю 3 видно, что в данном случае на конечный результат не влияет вес априорной модели. Здесь наблюдаются две области повышенной продольной проводимости. В точке P07 аномалия, вероятно, связана с разломом, проходящим через эту точку. В геоэлектрическом разрезе эта область проявляется в виде локальной приповерхностной неоднородности. Аномальная область в районе точки Топозеро имеет больший размер, прослеживается на глубину и может быть связана с разломом в этой области на поверхности, имеющим падение в северо-восточном направлении. Разрезы, полученные по профилям 2 (рис. 7) и 3 (рис. 8), согласуются с результатами электромагнитных исследований по профилю SVEKA (рис. 9) (Korja et al., 2006). Различие между разными версиями разрезов (рис. 9, б, в) связано с разным подходом к обработке и инверсии, однако в Восточной (Карельской) части наблюдается общий характер обоих вариантов разрезов (2 зоны повышенного сопротивления до глубины порядка 50 км, разделенные областью понижения удельного сопротивления). Эта часть профиля SVEKA по сути параллельна профилям FENICS 2 и 3. На профиле 2 (рис. 9, з) имеется область пониженного сопротивления, практически совпадающая по положению с такой же зоной на профиле SVEKA. Профиль 3 (рис. 9, д) находится чуть в стороне от профиля SVEKA и зона понижения сопротивления здесь смещена на восток, однако в остальном разрез имеет характер, схожий с разрезами SVEKA.

В районе оз. Топозеро наблюдается зона пониженного удельного сопротивления (рис. 7 и 8), которая находится на пересечении профилей 1 и 3 и подсекается несколькими точками.

На профиле 2 область пониженного сопротивления находится также возле оз. Топозеро на пересечении профилей 1 и 2. Таким образом, если рассматривать эти зоны как одну большую аномалию, то получится, что она вытянута в юго-восточном направлении вдоль системы водохранилищ от точки Зашеек до точки Шомба, как и большинство геологических структур в этой части Карельского региона.

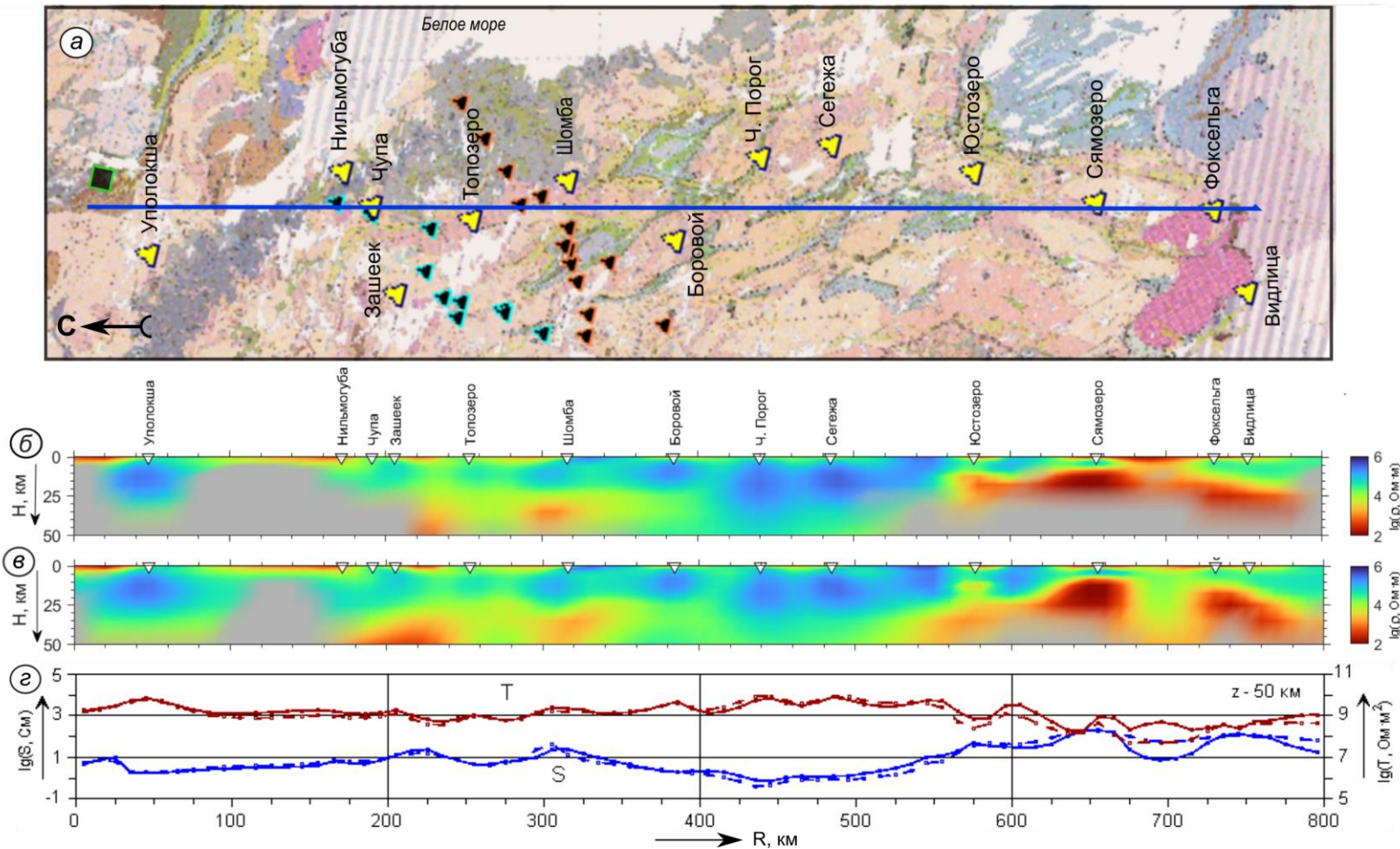


Рис. 6. Результаты инверсии МТ данных по профилю 1: *a* – положение профиля на геологической схеме;

б – результат инверсии с весом априорной модели $w = 0,5$; *в* – результат инверсии с весом априорной модели $w = 1$; *z* – продольная проводимость S и поперечное сопротивление T по результатам инверсии: пунктирной линией – для $w = 0,5$, сплошной линией – для $w = 1$

Fig. 6. Results of MT-inversion on profile 1: *a* – the position of the profile on the geological diagram;

b – the result of inversion with the weight of the a priori model $w = 0.5$; *v* – the result of inversion with the weight of the a priori model $w = 1$; *z* – longitudinal conductivity S and transverse resistance T according to the results of inversion: dotted line for $w = 0.5$, solid line for $w = 1$

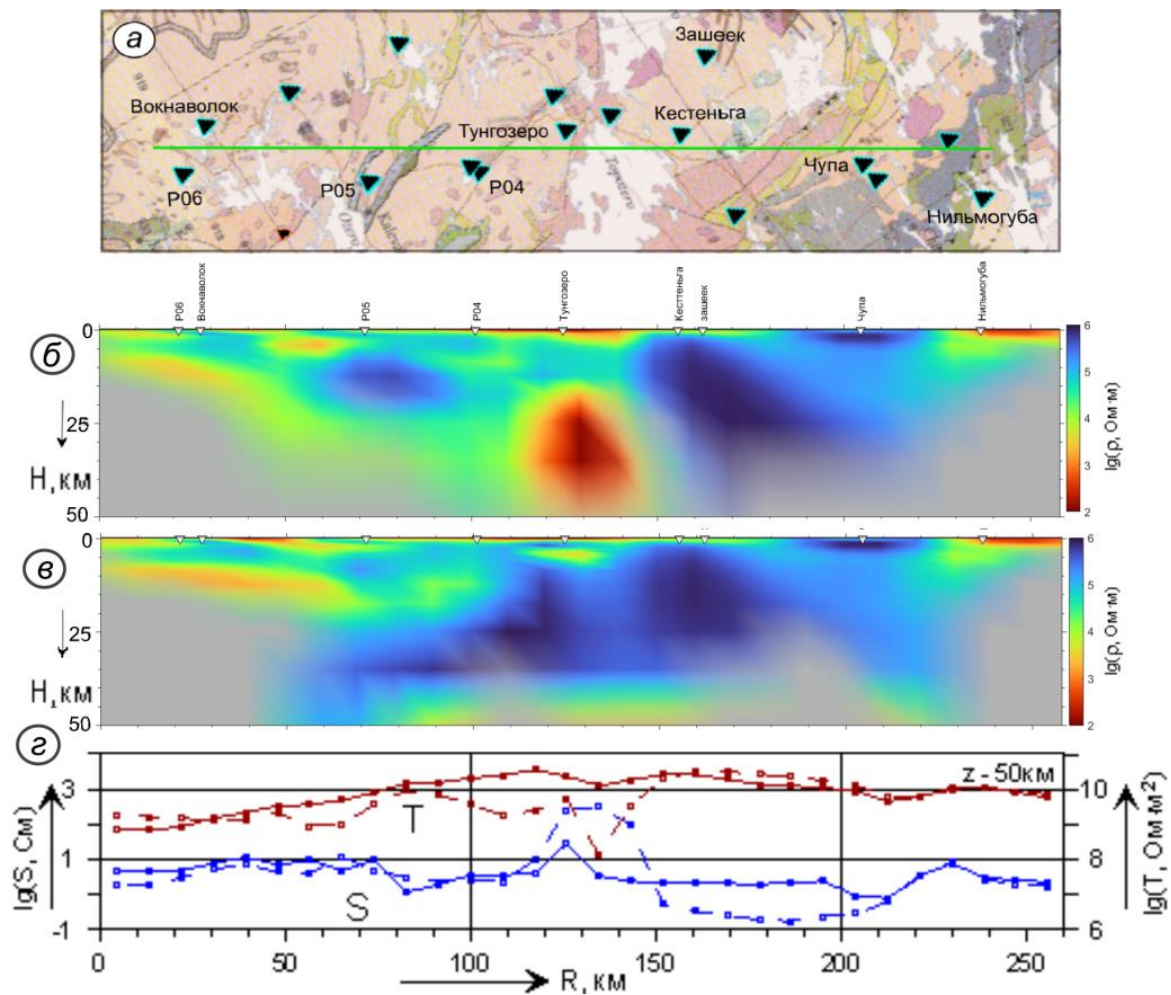


Рис. 7. Результаты инверсии МТ-данных по профилю 2: *a* – положение профиля на геологической схеме; *б* – результат инверсии с весом априорной модели $w = 0,5$; *в* – результат инверсии с весом априорной модели $w = 1$; *г* – продольная проводимость S и поперечное сопротивление T по результатам инверсии: пунктирной линией – для $w = 0,5$, сплошной линией – для $w = 1$

Fig. 7. Inversion of MT data on profile 2: *a* – the position of the profile on the geological diagram; *б* – the result of inversion with the weight of the a priori model $w = 0.5$; *в* – the result of inversion with the weight of the a priori model $w = 1$; *г* – longitudinal conductivity S and transverse resistance T according to the results of inversion: dotted line for $w = 0.5$, solid line for $w = 1$

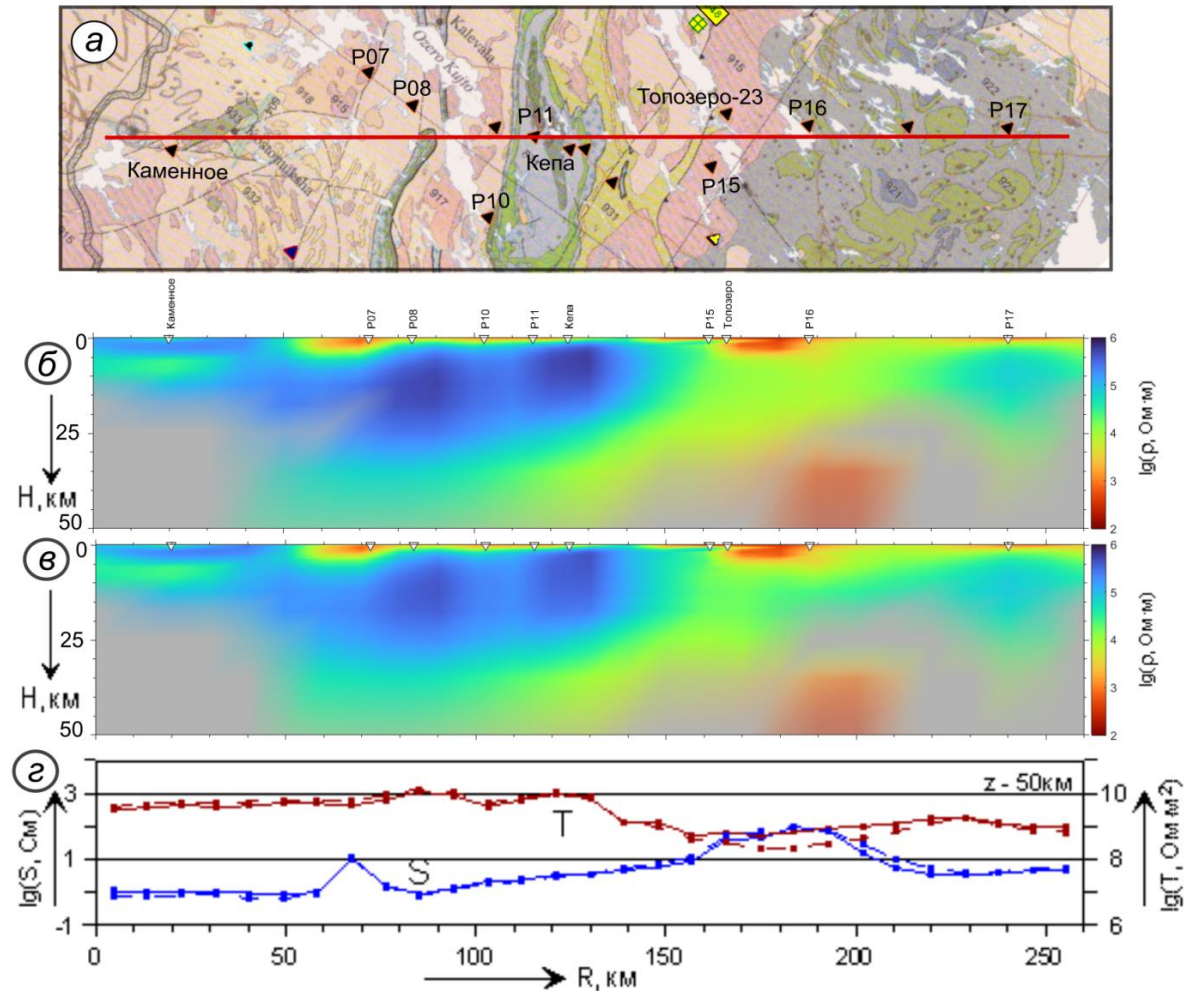


Рис. 8. Результаты инверсии МТ-данных по профилю 3: *a* – положение профиля на геологической схеме; *б* – результат инверсии с весом априорной модели $w = 0,5$; *в* – результат инверсии с весом априорной модели $w = 1$; *г* – продольная проводимость S и поперечное сопротивление T по результатам инверсии: пунктирной линией – для $w = 0,5$, сплошной линией – для $w = 1$

Fig. 8. The results of the MT data inversion on profile 3: *a* – the position of the profile on the geological diagram; *б* – the result of the inversion with the weight of the a priori model $w = 0,5$; *в* – the result of the inversion with the weight of the a priori model $w = 1$; *г* – the longitudinal conductivity S and the transverse resistance T according to the results of the inversion: dotted line for $w = 0,5$, solid line for $w = 1$

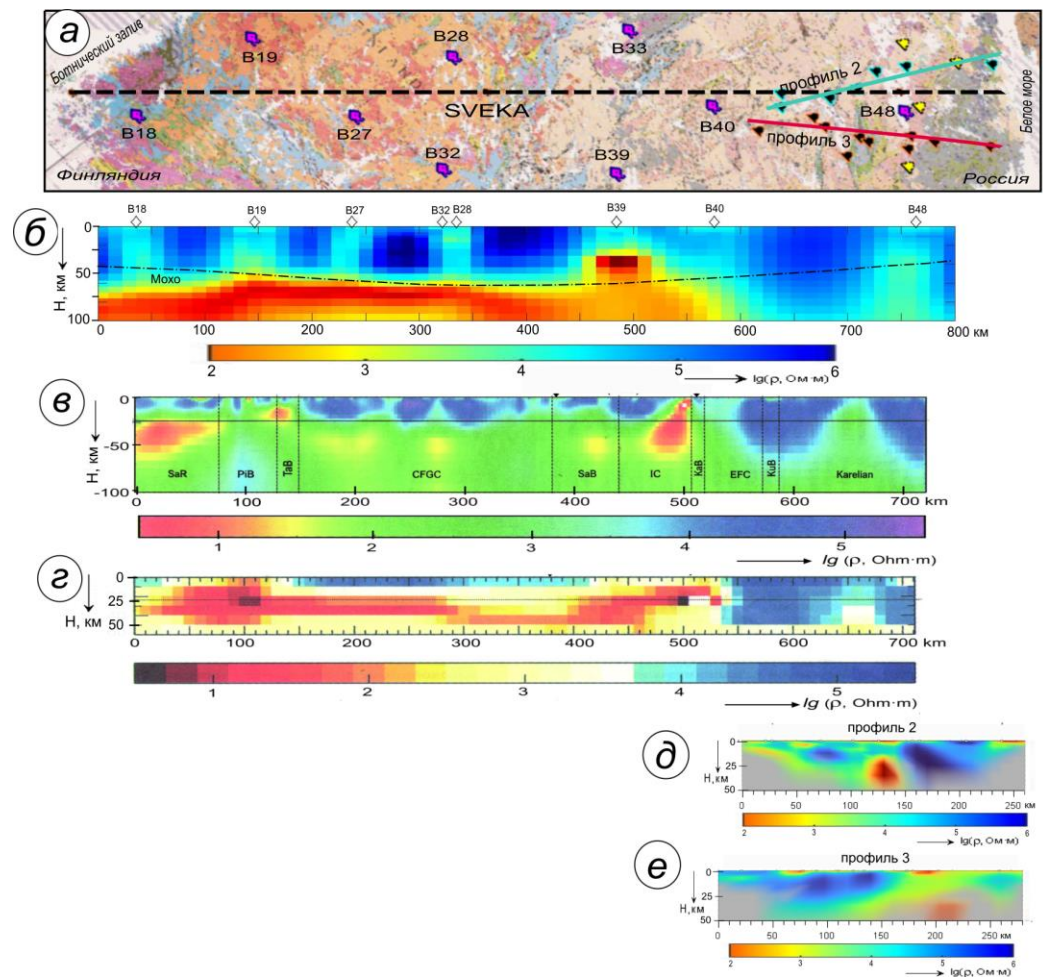


Рис. 9. Сравнение результатов МТЗ данных по профилю SVEKA и по профилям FENICS: *a* – положение профилей на геологической схеме; результаты инверсии МТЗ данных по профилю SVEKA: *б* – результат инверсии с помощью процедуры Оссам; *в* – результат инверсии I. Lahti (Korja et al., 2006); *г* – результат инверсии T. Korja (Korja et al., 2006); результаты инверсии МТЗ данных эксперимента FENICS: *д* – по профилю 2; *е* – по профилю 3

Fig. 9. Comparison of MTZ results for the SVEKA profile and the FENICS profiles: *a* – position of the profiles on the geological map, the result of the inversion of the MTS for the SVEKA profile: *б* – using the Occam procedure; *в* – the result of I. Lahti inversion (Korja et al., 2006); *г* – the result of T. Korja inversion (Korja et al., 2006); results of the FENICS MTS-data inversion: *д* – profile 2; *е* – profile 3

Результаты и обсуждение

Получены результаты магнитотеллурических зондирований в Восточной части Фенноскандинавского щита в рамках серии экспериментов FENICS. Отобраны данные для двумерной инверсии. Произведена двумерная инверсия и построены геоэлектрические разрезы по 3 профилям. Выявлены две аномальные зоны. В центральной части аномалия имеет вытянутую форму, простирающуюся в юго-восточном направлении согласованно с региональными геологическими структурами. В южной части аномалия, вероятно, является проявлением Ладожской аномалии электропроводности, приуроченной к Ладожско-Ботнической шовной зоне (ЛБЗ). Однако рассматривать эти зоны как региональные аномальные структуры не стоит. Их размер может быть обусловлен расстоянием между точками наблюдений. При более детальном рассмотрении они могут быть представлены в виде серий локальных неоднородностей, оказывающих влияние на более масштабные исследования.

Тем не менее полученные разрезы согласуются с результатами предыдущих исследований. Эти результаты будут применены при инверсии данных, полученных методом частотного зондирования в рамках экспериментов FENICS.

Заключение

Применение обновленной методики измерений МТЗ вместе с обработкой данных позволило выполнить двумерную инверсию и получить разрезы по трем профилям. Выявлены аномальные зоны в центральной и южной части области исследования Карело-Кольского региона, согласованные с региональными геологическими структурами, такими как Ладожско-Ботническая зона.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-17-00208. Коллектив выражает благодарности Копытенко Е. А., Терещенко П. Е. за предоставление и обслуживание широкополосной магнитотеллурической станции VMTU-10 и Петрищеву М. А. за программу обработки сигнала, записанного этой станцией.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. М. : Науч. мир, 2009. 679 с.
- Ганнибал А. Е. Программа обработки первичных данных в эксперименте "FENICS" // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99, № 1. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2020.1-2>. EDN: TRIDXA.
- Гришин А. С. Геоблоки Балтийского щита. Петрозаводск, 1990. 112 с.
- Жамалетдинов А. А. Способ количественного учета статических искажений по магнитному полю контролируемого источника CSAMT // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 4. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2019.4-1>. EDN: YMJJUA.
- Жамалетдинов А. А., Ефимов Б. В., Шевцов А. Н. Зондирования с мощными контролируруемыми источниками поля в комплексе с МТЗ (CSMT) – перспективы применения при поисках нефти и газа // Инновационные электромагнитные методы геофизики : сб. ст. М. : Науч. мир, 2009. С. 94–112.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. И., Токарев А. Д. "Нормальная" модель электропроводности литосферы Балтийского щита и ее геодинамическая интерпретация // Доклады Академии наук. 2004. Т. 398, № 5. С. 675–679. EDN: OPVNDX.
- Жамалетдинов А. А., Шевцов А. Н., Велихов Е. П., Скороходов А. А. [и др.]. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ-СНЧ диапазона (0.1-200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент "FENICS") // Геофизические процессы и биосфера. 2015. Т. 14, № 2. С. 5–49. EDN: TYMJIN.
- Зуева И. А., Лебедев А. А. Одномерные скоростные модели земной коры для определения параметров сейсмических событий, зарегистрированных на территории Карелии // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 3. С. 100–108. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/100-108>. EDN: WCSTVX.
- Ковтун А. А., Варданянц И. Л., Легенькова Н. П. Электропроводность мантии Фенноскандинавского щита по результатам совместной интерпретации магнитотеллурических и магнитовариационных данных // Вопросы геофизики. 2005. Вып. 38. С. 72–87. (Ученые записки СПбГУ, № 438).
- Колобов В. В., Баранник М. Б., Ивонин В. В., Селиванов В. Н. [и др.]. Опыт применения генератора "Энергия-4" для дистанционных и частотных электромагнитных зондирований в эксперименте "Мурман-2018" // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 8(17). С. 7–20. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20). EDN: DTIOVG.

- Колобов В. В., Куклин Д. В., Шевцов А. Н., Жамалетдинов А. А. Многофункциональная цифровая измерительная станция КВВН-7 для электромагнитного мониторинга сейсмоактивных зон // *Сейсмические приборы*. 2011. Т. 47, № 2. С. 44–58. EDN: NWBJEF.
- Куликов В. А., Ионичева А. П., Пушкарев П. Ю., Соколова Е. Ю. [и др.]. Результаты площадных работ методом МТЗ в Южном Приладожье // *Материалы VIII Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М. Н. Бердичевского и Л. Л. Ваньяна (ЭМЗ-2021)*, Москва, ИО РАН, 4–7 октября 2021 г. М. : ИФЗ РАН РАН, 2021. С. 200–204. DOI: <https://doi.org/10.21455/ems2021>. EDN: WPIFOV.
- Семенов В. Ю. Обработка данных магнитотеллурического зондирования. М. : Недра, 1985. 133 с.
- Харитонов Л. Я. Структура и стратиграфия карелид восточной части Балтийского щита. М. : Недра, 1966. 359 с.
- Шаров Н. В., Исанина Э. В., Клабуков Б. Н., Крупнова Н. А. [и др.]. Геолого-геофизическая модель земной коры по профилю Ладожское озеро – Онежское озеро – Белое море // *Сб. трудов конф. Четвертые научные чтения Ю. П. Булашевича*, Екатеринбург, 2–6 июня 2007. С. 23–27.
- Шевцов А. Н., Ганнибал А. Е., Короткова Т. Г., Скороходов А. А. Результаты двумерной инверсии данных глубинного электромагнитного зондирования с промышленными ЛЭП (эксперимент FENICS) // *Наука и технологические разработки*. 2022. Т. 101, № 1. С. 36–50. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.1-3>. EDN: HSGHKD.
- Constable S. C., Parker R. L., Constable C. G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data // *Geophysics*. 1987. Vol. 52, N 3. P. 289–300.
- Key K. MARE2DEM: A 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data // *Geophysical Journal International*. 2016. Vol. 207, Iss. 1. P. 571–588. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>.
- Korja T., Lahti I., Pedersen L. The core conductive structure along the SVEKA profile in the central part of the Baltic Shield // In: *The structure and dynamics of Eastern Europe. Release 2*. Moscow: Geocards Geos, 2006. P. 113–121.

References

- Berdichevsky, M. N., Dmitriev, V. I. 2009. Models and methods of magnetotellurics. Moscow. (In Russ.)
- Hannibal, A. E. 2020. Software for processing primary data in the FENICS experiment. *Science and Technological Developments*, 99(1), pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2020.1-2>. EDN: TRIDXA. (In Russ.)
- Grishin, A. S. 1990. Baltic Shield Geoblocks. Petrozavodsk. (In Russ.)
- Zhamaletdinov, A. A. 2019. A method for quantifying static shift distortions using a magnetic field of controlled source (CSAMT). *Science and Technological Developments*, 98(4), pp. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2019.4-1>. EDN: YMJJUA. (In Russ.)
- Zhamaltdinov, A. A., Efimov, B. V., Shevtsov, A. N. 2009. Sounding using powerful controlled sources in combination with magnetotellurics (CSMT) – Aspects of application for gas and oil prospecting. In *Innovative Electromagnetic Methods of Geophysics*. Moscow, pp. 94–112. (In Russ.)
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Tokarev, A. D. 2004. Normal model of electric conductivity of the Baltic Shield lithosphere and its geodynamic interpretation. *Doklady Earth Sciences*, 399(8), pp. 675–679. EDN: OPVNDX. (In Russ.)
- Zhamaletdinov, A. A., Shevtsov, A. N., Velikhov, E. P., Skorokhodov, A. A. et al. 2015. Study of the interaction of electromagnetic waves of the LF-VLF range (0.1-200 Hz) with the Earth's crust and ionosphere in the field of industrial power transmission lines (FENICS Experiment). *Geophysical Processes and Biosphere*, 14(2), pp. 5–49. EDN: TYMJIH. (In Russ.)
- Zueva, I. A., Lebedev, A. A. 2023. One-dimensional velocity models of the earth's crust for determining the parameters of seismic events recorded on the territory of Karelia. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 3, pp. 100–108. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/100-108>. EDN: WCSTVX. (In Russ.)
- Kovtun, A. A., Vardaniants, I. L., Legenkova, N. P. 2005. Electroconductivity of the Fennoscandian Shield mantle by the results of combined interpretation of magnetotelluric and magnetovariational data. *Voprosy Geofiziki*, 38, pp. 72–87. (In Russ.)
- Kolobov, V. V., Barannik, M. B., Ivonin, V. V., Selivanov, V. N. et al. 2018. Experience of generator "Energy-4" application for the distance and frequency electromagnetic soundings in the experiment "Murman-2018". *Proceedings of Kola Science Centre of RAS*, 9(8(17)), pp. 7–20. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.7-20. EDN: DTIOVG. (In Russ.)
- Kolobov, V. V., Kuklin, D. N., Shevtsov, A. N., Zhamaletdinov, A. A. 2011. The KVVN-7 multifunction digital measuring station for electromagnetic monitoring of seismoactive zones. *Seismic Instruments*, 47(2), pp. 44–58. EDN: NWBJEF. (In Russ.)

- Kulikov, V. A., Ionicheva, A. P., Pushkarev, P. Yu., Sokolova, E. Yu. et al. 2021. Results of area surveys using the MT sounding method in the Southern Ladoga area. Proceedings of the VIII All-Russian School-Seminar EMZ-2021. IPE RAS, pp. 200–204. DOI: <https://doi.org/10.21455/ems2021>. EDN: WPIFOV. (In Russ.)
- Semenov, V. Yu. 1985. Processing of magnetotelluric sounding data. Moscow. (In Russ.)
- Kharitonov, L. Ya. 1966. Structure and Stratigraphy of Karelides of the Eastern Baltic Shield. Moscow. (In Russ.)
- Sharov, N. V., Isanina, E. V., Klabukov, B. N., Krupnova, N. A. et al. 2007. Geological and geophysical model of the earth's crust along the profile of Lake Ladoga – Lake Onega – White Sea. Coll. of conf. *Fourth scientific readings of Yu. P. Bulashevich*, Yekaterinburg, 2–6 June, Yekaterinburg, 2007, pp. 23–27. (In Russ.)
- Shevtsov, A. N., Hannibal, A. E., Korotkova, T. G., Skorokhodov, A. A. 2022. Results of 2D inversion of data from deep electromagnetic probing with industrial power lines (FENICS Experiment). *Seismic Instruments*, 101(1), pp. 36–50. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.1-3>. EDN: HSGHKD. (In Russ.)
- Constable, S. C., Parker, R. L., Constable, C. G. 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), pp. 289–300.
- Key, K. 2016. MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 207(1), pp. 571–588. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>.
- Korja, T., Lahti, I., Pedersen, L. 2006. The core conductive structure along the SVEKA profile in the central part of the Baltic Shield. In *The structure and dynamics of Eastern Europe*. Release 2. Moscow: Geocards Geos, pp. 113–121.

Сведения об авторах

Скороходов Алексей Андреевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, вед. инженер;
e-mail: a.skorokhodov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-8844>

Alexey A. Skorokhodov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Researcher;
e-mail: a.skorokhodov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3258-8844>

Шевцов Александр Николаевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник;
e-mail: anshev2019-01@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1360-9937>

Alexandr N. Shevtsov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.&Miner.), Researcher;
e-mail: anshev2019-01@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1360-9937>

Ганнибал Андрей Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: han_a_e@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8921-8481>

Andrey E. Hannibal – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Junior Researcher;
e-mail: han_a_e@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8921-8481>

Короткова Тамара Геннадьевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, вед. инженер;
e-mail: t.korotkova@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-8728>

Tamara G. Korotkova – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Researcher;
e-mail: t.korotkova@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-8728>