

М. В. Череватова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ТЕНЗОРА ИМПЕДАНСА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ И ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА И БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

Введение

Восточная часть Фенноскандинавского (Балтийского) щита согласно геолого-геофизическим представлениям состоит примерно из 50 блоков третьего порядка, разделенных разломами, имеющими разную глубинность и разные геоэлектрические характеристики. Главные тектонические шовные зоны, разделяющие территорию на основные геоблоки, имеют северо-западное направление, но помимо этого выделяется ряд геоэлектрических особенностей, связанных с границами геоблоков третьего порядка, ориентированных в северо-восточном направлении [1]. По результатам геолого-геофизических работ составлена схема электрических сопротивлений пород верхней части фундамента. Кристаллические породы, слагающие верхнюю часть земной коры Карелии, как правило, обладают высоким удельным сопротивлением — более 10^4 Ом · м. Оно характерно для имеющих широкое развитие в Центральной Карелии гнейсов и гранитов. Значительное снижение ρ (в 10 раз) характерно для шовных зон, разделяющих Карельский кратон от Беломорской подвижной области на северо-востоке (Восточно-Карельская зона — ВКЗ). Снижение ρ происходит из-за концентрации влаги, значительно превышающей естественную влажность за счет пористых и трещиноватых пород [2].

Зона сочленения Карельского и Беломорского мегаблоков представляет большой интерес с точки зрения изучения тектонического развития Балтийского щита. Ранее этот район также исследовался сотрудниками НИИФ СПбГУ с использованием данных магнитотеллурических (МТ) исследований, проведенных в расширенном интервале периодов 10^{-3} — 10^4 с в Центральной Карелии и на продолжении профиля SVEKA. Помимо этого, были использованы материалы Т. Корья из университета Оулу, данные международного сеанса синхронных наблюдений (BEAR) в интервале периодов 10 — 10^5 с [1–3]. В этих работах для анализа МТ-данных использован квазидвумерный подход. Тензор импеданса Z в системе координат, связанной с осями наблюдения x и y , имеет вид

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}.$$

В случае произвольной среды тензор может быть сведен к двум недиагональным

значениям тензора импеданса:

$$Z_{\pm} = \frac{Z_{xy} - Z_{yx}}{2} \pm \sqrt{\frac{(Z_{xy} - Z_{yx})^2}{4} - (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})}.$$

В случае двумерной среды значения импедансов совпадают с максимальным и минимальным значениями импеданса вдоль осей полярной диаграммы модуля импеданса Z_{xy} на плоскости xy . На всей территории северо-запада Восточно-Европейской платформы расхождения между максимальными и минимальными значениями, определяемыми по полярным диаграммам, малы даже в случае трехмерной неоднородности среды. Значения величины SKEW в восточной части щита, за исключением отдельных пунктов, не превышают 0.1–0.2, что позволило с большой точностью свести геоэлектрическую информацию о среде к анализу максимального и минимального значений импеданса. При таком анализе были рассмотрены кривые зондирования по главным геоэлектрическим осям среды и разделены на «продольные» и «поперечные» кривые зондирования. Методика такого разделения была основана на том, что «продольные» кривые должны быть близки в глобальной магнитовариационной кривой в области периодов $T > 10^4$ с. Эти кривые зондирования при одномерной интерпретации удовлетворительно отражают распределение сопротивления по глубине. Пункты, где обе кривые зондирования не выходят на глобальную кривую, подвержены влиянию трехмерной неоднородности. Выделенные таким образом «продольные» кривые интерпретировались в рамках одномерной или двумерной моделей.

В настоящей работе использован несколько иной подход к анализу тех же МТ-данных на территории Центральной Карелии и в зоне сочленения Центрально-Карельского и Беломорского геоблоков. Он основан на методике классификации тензора импеданса, предложенной К. Баром [4]. С помощью данного алгоритма проанализированы экспериментальные данные и сделаны предварительные выводы о модели среды, представлены результаты применения схемы на данных МТЗ вдоль двух профилей, пересекающих Центрально-Карельский мегаблок, а также зону долгоживущих разломов, в области сочленения Центрально-Карельского и Беломорского мегаблоков. Также целью работы являлось сравнение результатов анализа, полученных с использованием квазидвумерного подхода и методики, предложенной К. Баром.

Классификация тензора импеданса

В 1960–1980-е гг. первоначальная 1D-МТ-модель слоистой среды была заменена серией моделей электропроводности, которые учитывали более сложное строение среды. Первая из них была предложена Кантвеллом (1960), в ней скалярный импеданс был заменен тензором второго ранга, который позволяет связать две горизонтальные компоненты магнитного и электрического полей \mathbf{E} и \mathbf{H} :

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}.$$

В 1D-модели слоистой среды Тихонова–Каньяра тензор импеданса может быть представлен виде

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_n \\ -Z_n & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Параметр неоднородности, показывающий пределы применимости модели слоистой среды, описываемой уравнением (1) к описанию экспериментальных данных, может быть представлен в виде

$$\Sigma = (D_1^2 + S_2^2)/D_2^2,$$

где

$$S_1 = Z_{xx} + Z_{yy}; \quad S_2 = Z_{xy} + Z_{yx};$$

$$D_1 = Z_{xx} - Z_{yy}; \quad D_2 = Z_{xy} - Z_{yx}.$$

Если Σ значительно превосходит относительную ошибку $\Delta D_2/|D_2|$, то следует перейти к рассмотрению более сложной модели, описывающей имеющиеся экспериментальные данные. В случае двумерной проводящей структуры (например, дайка) тензор импеданса в соответствующей системе координат имеет вид

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где Z_{xy} , Z_{yx} — продольная и поперечная компоненты тензора импеданса. Экспериментальные данные редко имеют нулевые диагональные элементы тензора импеданса, это может быть связано с:

- а) ошибками данных, полученных в результате эксперимента;
- б) наложением на 1D- и 2D-структуры локальных 3D-неоднородностей;
- в) 3D-индукционными эффектами.

Для того чтобы получить тензор импеданса с нулевыми диагональными элементами (или близкими к нулю), требуется определить угол поворота α системы координат наблюдений для совмещения ее с системой координат, в которой одна из горизонтальных осей будет ориентирована по оси однородности двумерной структуры. Угол определяется путем максимизации $|Z_{xy}|$ и $|Z_{yx}|$, $|Z_{xy} + Z_{yx}|$, $|Z_{xy}|^2 + |Z_{yx}|^2$ или минимизации $|Z_{xx}|$ и $|Z_{yy}|$, $|Z_{xx} + Z_{yy}|$, $|Z_{xx}|^2 + |Z_{yy}|^2$.

Свифт предложил параметр неоднородности, отвечающий за применимость 2D-подхода к экспериментальным данным. Это параметр Swift SKEW, или просто SKEW:

$$k = \frac{|S_1|}{|D_2|}.$$

Если мы имеем дело с 3D-приповерхностными неоднородностями, то подход, изложенный выше, не даст достоверных результатов. В этом случае, если глубина скин-слоя значительно превосходит размеры аномалии, ее индуктивный эффект становится заметно слабее, но сказывается ее гальваническое влияние. Электромагнитные данные, содержащие гальванические эффекты часто могут быть описаны с помощью модели, состоящей из региональной 1D- или 2D-структуры с локальной 3D-неоднородностью. При этом происходит разделение (1D)2D- и 3D-эффектов, тензор импеданса 3D-структуры представляется в виде произведения тензоров импеданса (1D)2D региональной структуры (комплексный) и искажений (вещественный, не зависит от частоты). Ларсен рассмотрел суперпозицию региональной 1D слоистой среды, в которую была помещена приповерхностная 3D-неоднородность. Если размер аномалии

мал по сравнению с глубиной скин-слоя, то тензор импеданса может быть представлен в виде

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \check{C} \begin{pmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где Z — региональный импеданс Тихонова—Каньяра; \check{C} — вещественный тензор искажений, который описывает гальваническое влияние неоднородности на электрическое поле. Могут ли экспериментальные данные описываться моделью Ларсена? Если да, то все элементы тензора импеданса должны иметь одинаковую фазу. Различие в фазах будет выражаться коммутатором

$$[x, y] = \text{Im}(yx^*) = \text{Re}x\text{Im}y - \text{Re}y\text{Im}x.$$

Параметр неоднородности, определяющий пределы применимости модели Ларсена,

$$\mu = (|[D_1, S_2]| + |[S_1, D_2]|)^{1/2} / |D_2|.$$

Некоторое время считалось, что модели Свифта (2) и Ларсена (3) хорошо описывают импеданс. Полагалось, что всегда найдется координатная система, в которой диагональные элементы будут незначительны (а), а недиагональные будут иметь различные фазы. В ином случае (б), диагональные элементы не будут равны нулю, но все элементы тензора импеданса будут иметь одинаковые фазы. Однако, как было показано Ранганьяки (1984), МТ-фаза может сильно зависеть от направления, в котором измерено электрическое поле. В этом случае экспериментальные данные невозможно описать ни моделью Свифта, ни Ларсена, так как у тензора импеданса не исчезающе малы диагональные элементы, а фазы вовсе не одинаковы. Это привело Бара к мысли о создании еще более сложной модели. В этой модели 3D-неоднородности накладываются на двумерную региональную структуру, а данные в свою очередь представляются в виде двух компонент: локальной гальванической и региональной индуктивной. Для данных в системе (x', y') двумерной структуры тензор импеданса может быть представлен в виде

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \check{C} \begin{pmatrix} 0 & Z_{n,x'y'} \\ -Z_{n,y'x'} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -c_{12}Z_{n,y'x'} & c_{11}Z_{n,x'y'} \\ -c_{22}Z_{n,y'x'} & c_{21}Z_{n,x'y'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Каждому столбцу тензора импеданса соответствует только одна фаза, так как предположение о гальваническом искажении требует, чтобы элементы тензора \check{C} были вещественны и независимы от частоты. Тем не менее в произвольной системе координат фазы двух импедансов $Z_{n,xy}$ и $Z_{n,yx}$ будут перемешаны, так как в этом случае элементы тензора импеданса будут представлять собой линейную комбинацию $Z_{n,xy}$ и $Z_{n,yx}$. Угол поворота координатных осей может быть найден из уравнения

$$\tan\alpha_{1,2} = \pm \{ (B+C)/(B-C) + [A/(B-C)]^2 \}^{1/2} - A/(B-C),$$

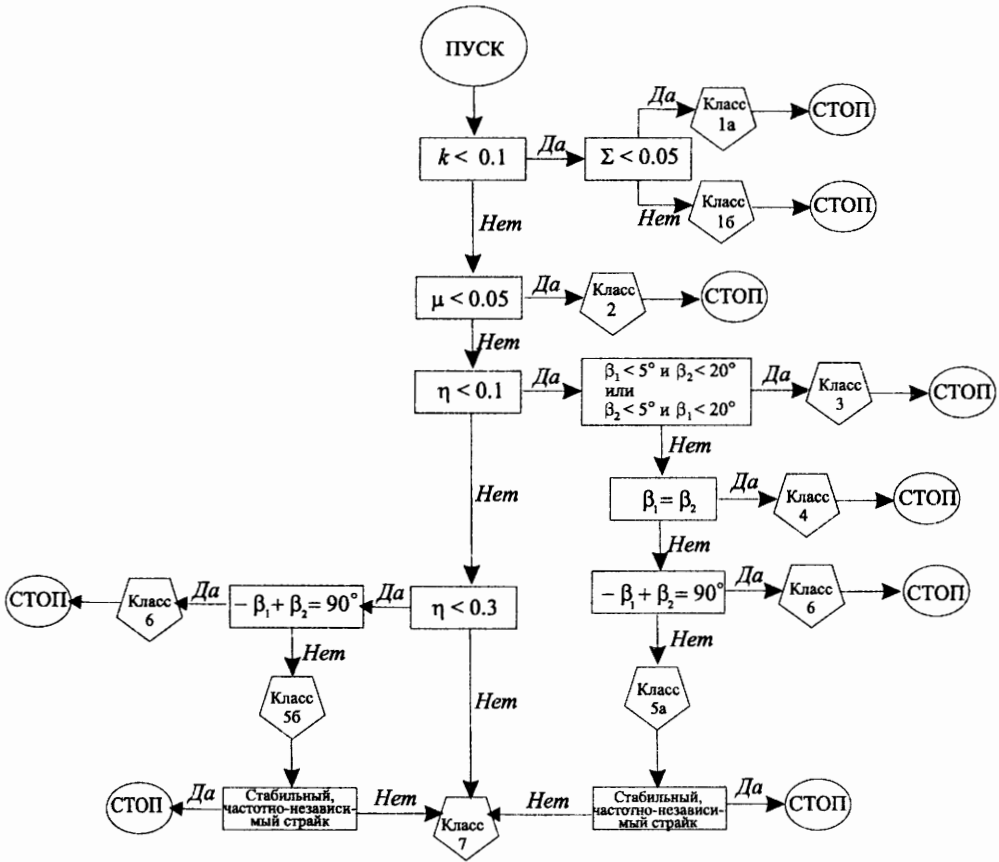


Рис. 1. Суммарная схема характеристик моделей для различных классов тензора импеданса

Классы: 1а – модель Тихонова–Каньяра (1); 1б – модель Свифта (2); 2 – модель Ларсена (3); 3 – 2D-модель со статическим смещением (4); 4 – региональная 2D-модель в повернутой системе координат (4); 5а – сложная модель 2D + 3D (4); 5б – δ – модель (5); 6 – региональная модель с мощными токовыми каналами; 7 – региональная 3D-модель

где

$$\begin{aligned}
 A &= [S_1, D_1] + [S_2, D_2], \\
 B &= [S_1, S_2] - [D_1, D_2], \\
 C &= [D_1, S_2] - [S_1, D_2].
 \end{aligned}$$

В случаях, когда нельзя найти угол поворота, К.Бар предлагает минимизировать разность фаз между элементами соответствующих колонок тензора импеданса:

$$\check{Z} = \beta \begin{pmatrix} -c_{12}Z_{yx}e^{i\delta} & c_{11}Z_{xy} \\ -c_{22}Z_{xy} & c_{21}Z_{yx}e^{-i\delta} \end{pmatrix} \beta^T, \tag{5}$$

где

$$\beta = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}.$$

Чтобы определить, каким из этих двух типов моделей следует пользоваться, К. Бар ввел фазочувствительный параметр асимметрии:

$$\eta = (|[D_1, S_2] - [S_1, D_2]|)^{1/2} / |D_2|.$$

Если $\eta < 0.1$, следует рассматривать (4), в случае $0.1 < \eta < 0.3$ — (5). На рис. 1 суммированы все семь возможных типов моделей, о которых говорилось выше. Анализируя экспериментальные данные по предложенной схеме, можно примерно определить, с каким типом модели среды мы имеем дело.

Применение схемы классификации тензора импеданса к экспериментальным данным

Было рассмотрено два профиля (рис. 2), каждый из которых пересекает зону разломов в области сочленения Беломорского и Центрально-Карельского мегаблоков. Профиль 1 пересекает Центрально-Карельский блок и зону сочленения его с Беломорским поясом, частично повторяет продолжение профиля SVEKA на восточной части Балтийского щита. Приспугая к анализу МТ-данных, оценим параметр Свифта SKEW вдоль профиля для интервала периодов 1–13500 с. В западной части профиля наблюдаются значения SKEW, не превышающие 0.1. Для пункта F04 $k = 0.01 \div 0.1$ до периодов 90 с и не превышает 0.2, так же как и для пунктов F05 и F06 на всем интер-

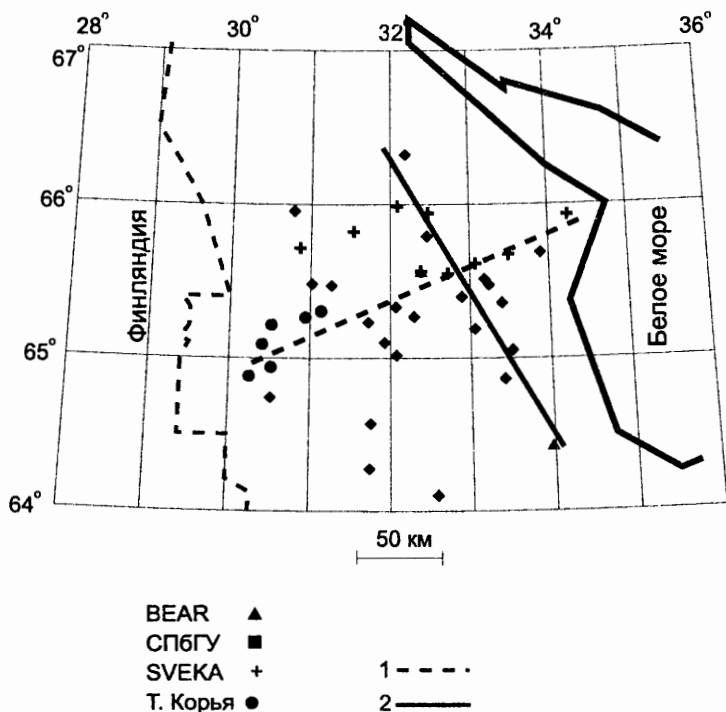


Рис. 2. Расположение пунктов МТЗ

1, 2 — профили

вале периодов (рис. 3, а). Можно выделить широкую зону, от 30 до 50 км, в которой значения SKEW близки к 0.1. Согласно схеме (см. рис. 1) требуется оценить параметр Σ , отвечающий за возможность описания модели среды уравнением (1). Точка F04 характеризуется $\Sigma = 0.13 \div 0.3$, а в F05 $\Sigma = 0 \div 0.09$. Исходя из этого, можно заключить, что в этой части профиля будем иметь дело с простыми моделями — 1D или 2D. Для остальных пунктов k значительно превосходит 0.1, поэтому следует рассмотреть параметр Ларсена μ . По-прежнему в западной части профиля на периодах не более 50 с $\mu = 0.04 \div 0.09$, но выборочно, в целом же μ значительно выше (рис. 3, б).

Продолжая анализ, переходим к оценке фазочувствительного параметра η . Областей, где $\eta < 0.1$, практически не существует. В западной части профиля (F01, F02, F03,

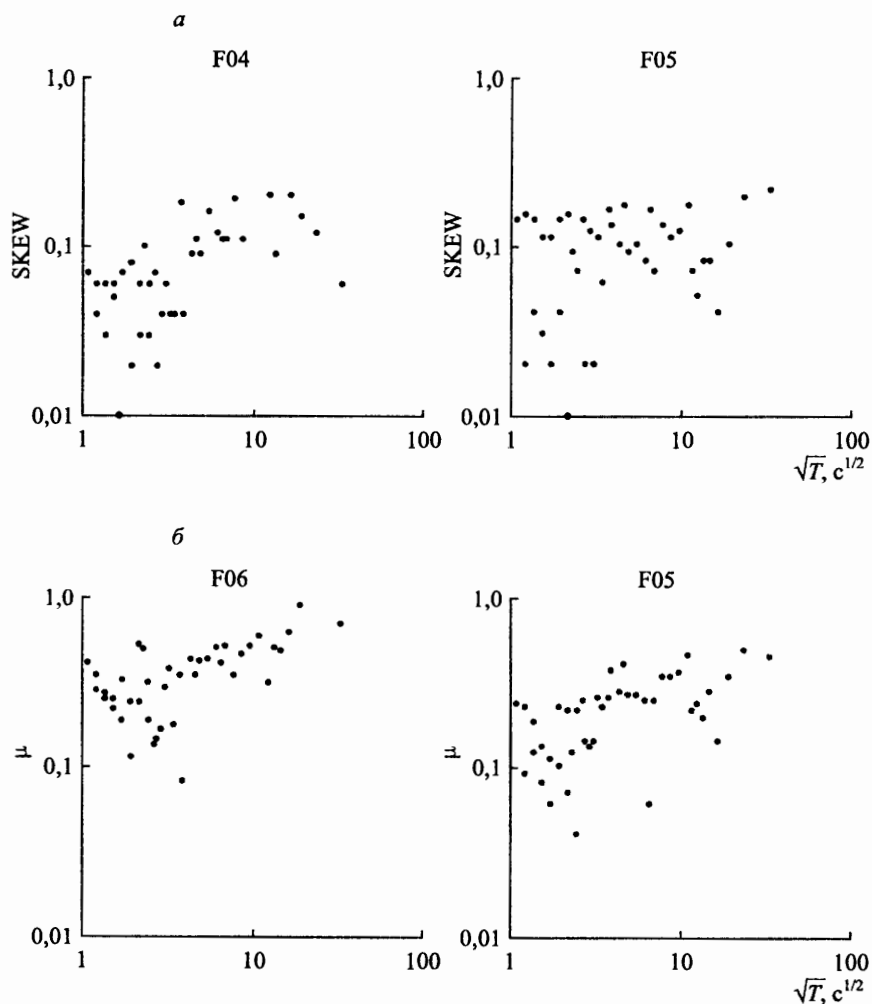


Рис. 3. Распределение SKEW (а) и параметра неоднородности Ларсена (б) по периодам в некоторых пунктах профиля 1

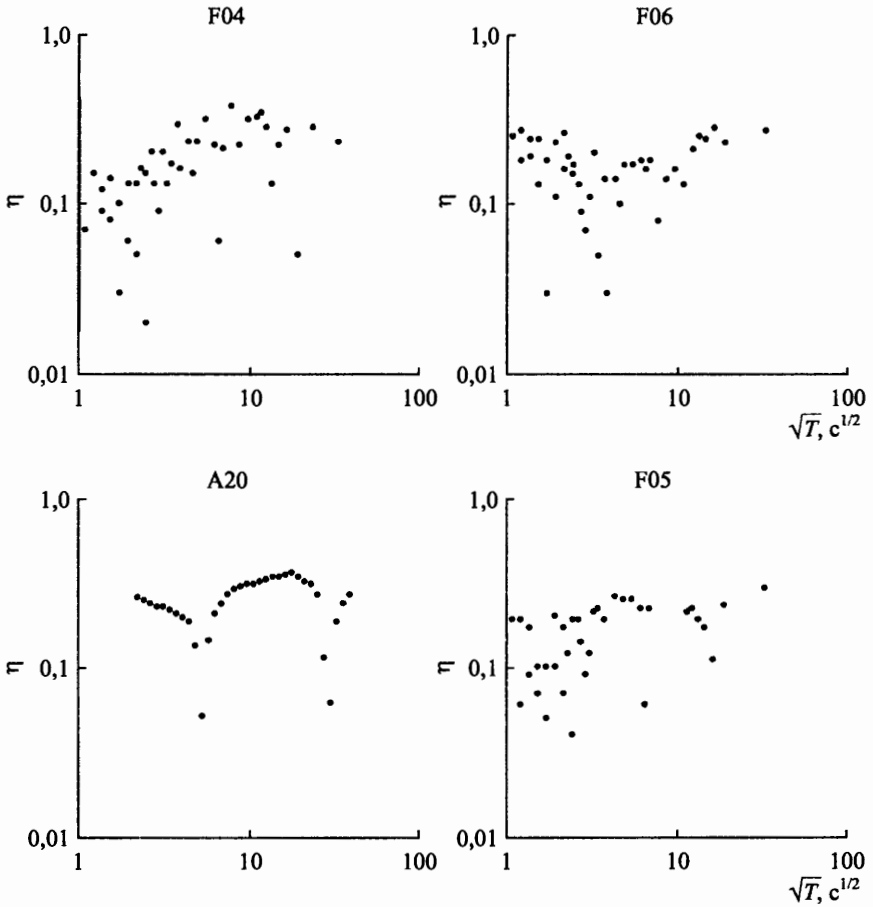


Рис. 4. Распределение фазочувствительного параметра по периодам в некоторых пунктах профиля 1 при $\eta < 0.3$

F04, F05, F06, A20) в основном все значения этого параметра 0.1–0.3 во всем диапазоне периодов (рис. 4). В результате приходим к выводу, что в западной части профиля на периодах более 100 с, мы имеем дело с моделью вытянутой 2D-структуры с локальными неоднородностями. По мере продвижения на восток вдоль профиля 1 наблюдается повышение значений фазочувствительного параметра: он выше 0.3 на малых периодах (A01, A02, B48, K15, A03, A04, K01), но на периодах более 300 с значительно увеличивается и достигает 0.7–0.8 (рис. 5). Согласно К. Бару, эту область следует рассматривать как 3D-региональную структуру.

Профиль 2 располагается вдоль зоны разломов и протягивается с северо-запада на юго-восток в Центральной части Карелии. В целом, все параметры неоднородности, рассмотренные выше, оказываются существенно завышенными, чем для профиля 1. По-видимому, это связано с неоднородностью из-за разломов рассматриваемой территории. В отличие от предыдущего случая, на данном профиле нельзя однозначно выделить обширную область с $k < 0.1$, такими значениями SKIEW характеризуется

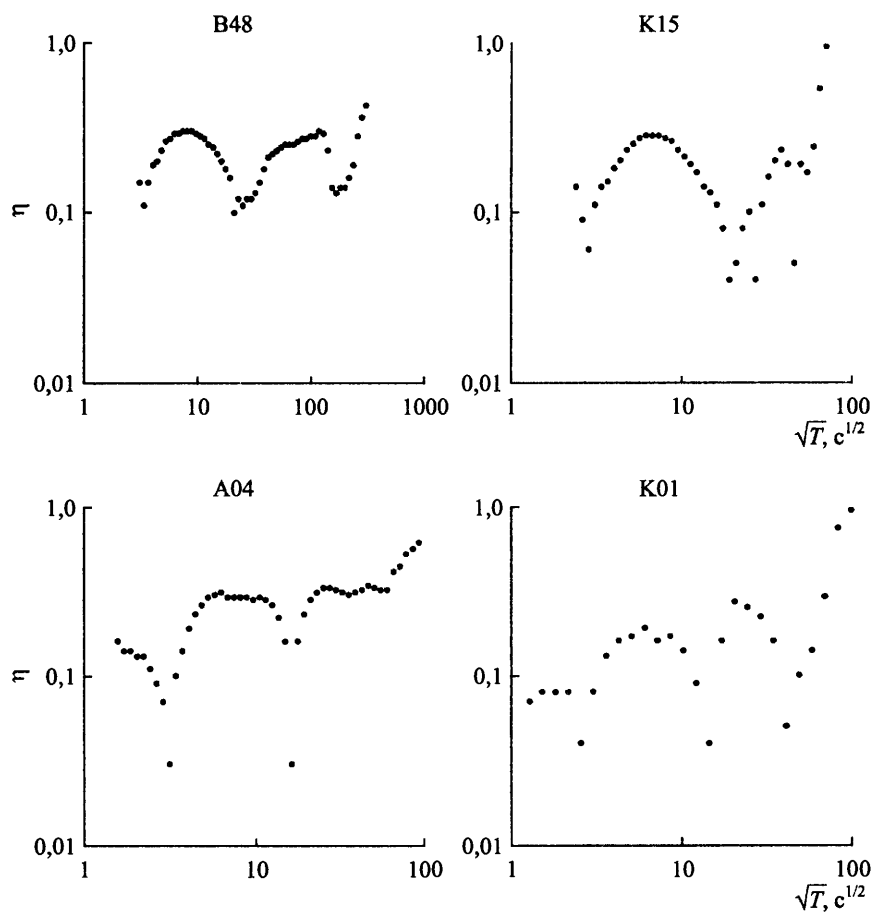


Рис. 5. Распределение фазочувствительного параметра по периодам в некоторых пунктах профиля 1 при $\eta > 0.3$

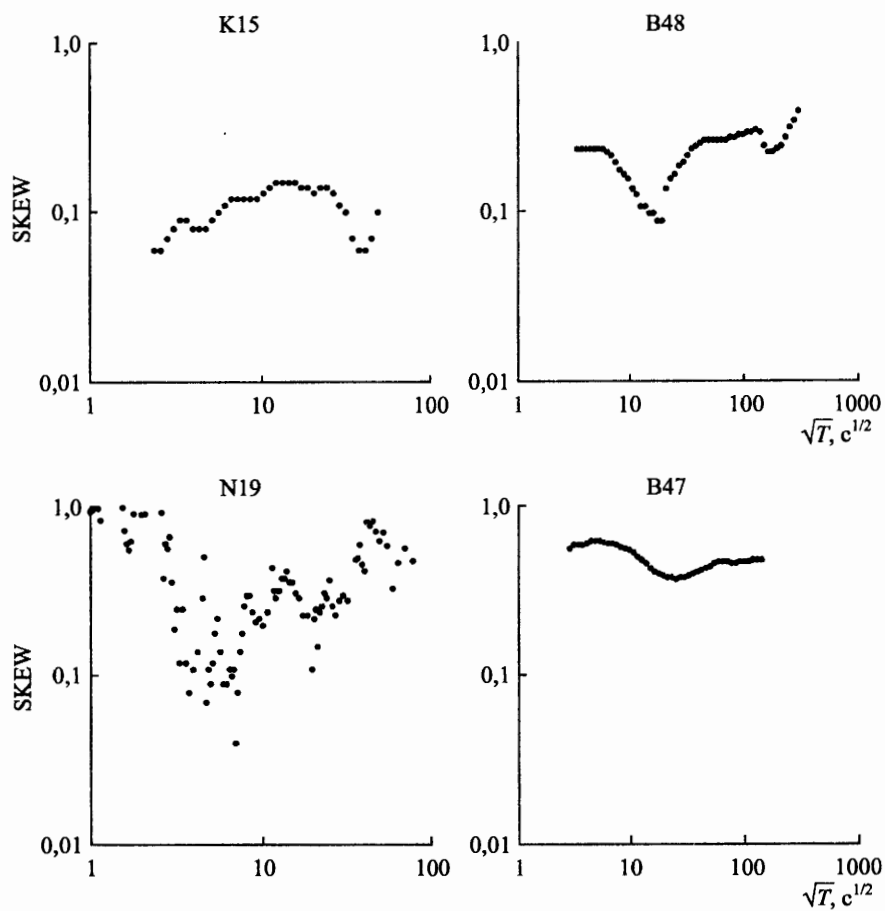


Рис. 6. Распределение SKEW по периодам в некоторых пунктах профиля 2

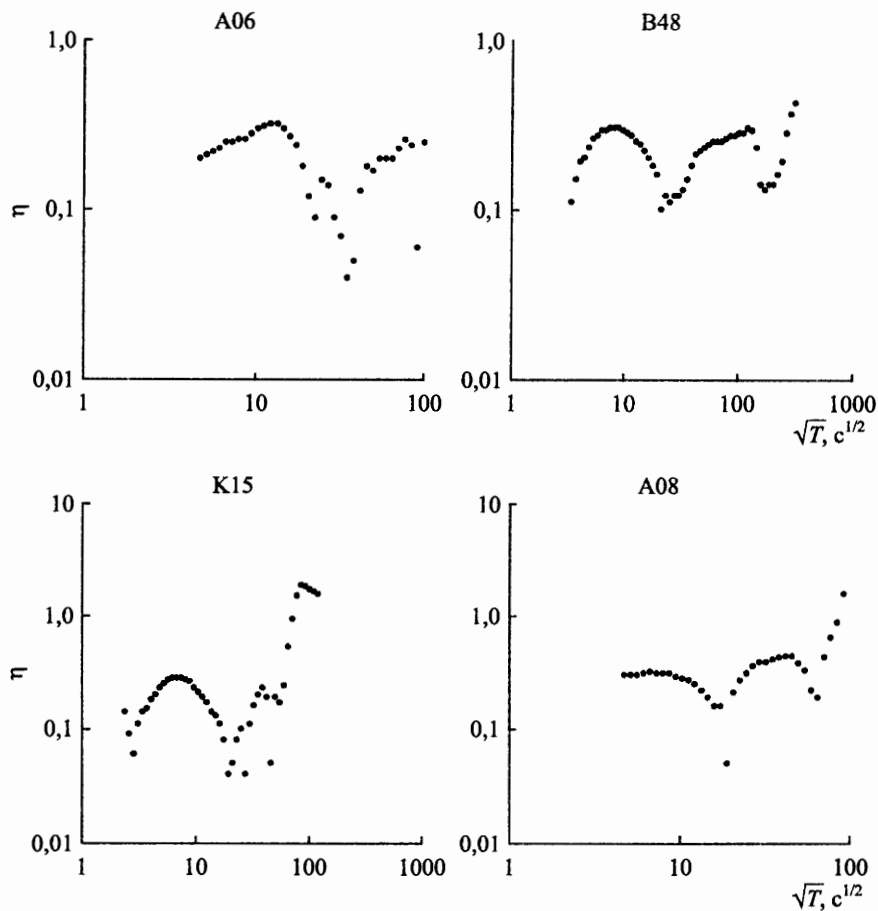


Рис. 7. Распределение фазочувствительного параметра по периодам в некоторых пунктах профиля 2

точка K15, A08 до периодов 25 с, при этом в этих пунктах Σ более 0.05. Согласно алгоритму (см. рис. 1) в районе этих точек у поверхности будет проявляться двумерность. В остальной части профиля значения SKEW 0.1–1 (рис. 6). Значения μ во всех пунктах зондирования вдоль профиля оказываются выше 0.05 во всем интервале периодов, поэтому следует сразу переходить к рассмотрению фазочувствительного параметра. Юго-восточная часть профиля характеризуется значениями $\eta = 0.1$ –0.3. Это пункты A07, A06, B47 во всем интервале периодов, а также в центральной части профиля до периодов 100 с (B48, K15, A03, A04, A09, A08), что указывает на протяженную 2D-структуру с неоднородными включениями (рис. 7). На больших периодах значения фазочувствительного параметра достигают 0.9 в точках K15, A08, что, по-видимому, связано 3D-эффектами.

Сравнение результатов и выводы

Анализ магнитотеллурических данных с использованием квазидвумерного подхода на Центрально-Карельском геоблоке вдоль профиля SVEKA указал на важные особенности геоэлектрического строения этого района. На профиле SVEKA легко прослеживаются основные структурные единицы тектоносферы восточной части Балтийского щита. Отчетливо выделяется область разломов, отделяющая Западно-Карельский блок от Центрально-Карельского. Наиболее протяженный блок — Центрально-Карельский (Куйтозерский блок третьего порядка), его ширина более 100 км, и он может быть отнесен к классу квазидвумерных структур. Центрально-Карельский блок и Беломорский мегаблок разделены более чем 50-километровой зоной сочленения плит, отражающей разные периоды тектонической активности региона. В геоэлектрическом плане тектоническая активность привела к возникновению обширной области пониженного сопротивления до глубины более 50 км (аномальная зона). Скорее всего аномалия носит трехмерный характер.

Согласно результатам предварительного анализа МТ-данных, по методике К. Бара в западной части вдоль профиля 1 (близок к профилю SVEKA) наблюдается широкая (около 100 км) двумерная структура, которая отражает Центрально-Карельский блок. По мере продвижения к восточной части структура среды начинает усложняться, переходя в 3D, что может быть связано с пересечением зоны разломов. Профиль 2, наоборот, характеризуется переходом к 2D-структуре по мере продвижения в юго-восточную часть, что связано с отходом от зоны разломов и переходом в Беломорский геоблок.

По результатам анализа на обоих профилях выделяется обширная область (80 км), в которой должны проявиться 3D-эффекты на периодах от 500 до 13000 с.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что использование методики классификации тензора импеданса позволяет достаточно точно проанализировать имеющиеся экспериментальные МТ-данные и выявить области с различной пространственной размерностью структур, аномальные зоны, тем самым облегчая последующую интерпретацию. Кроме того, он не противоречит данным анализа, основанного на квазидвумерном подходе, а скорее дополняет его.

Указатель литературы

1. Ковтун А. А., Вагин С. А., Варданянц Б. Л., Легенькова Н. П., Смирнов М. Ю., Успенский Н. И. Особенности строения Карельского региона по данным геоэлектрических исследований // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Петрозаводск, 2004. С. 107–123.
2. Клубуков Б. Н. Геоэлектрическая изученность // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Петрозаводск, 2004. С. 102–107.
3. Ковтун А. А., Вагин С. А., Варданянц Б. Л. Магнитотеллурические исследования коры и мантии восточной части Балтийского щита // Изв.РАН. Физика Земли. 1994. №3. С. 32–36.
4. Bahr K., Simpson F. Practical Magnetotellurics // Cambridge univ. press. 2005. 254 p.