

О. А. Синкевич

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МТЗ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОРОВЫХ АНОМАЛИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И НОРМАЛЬНОГО РАЗРЕЗА НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ

### Введение

Открытие ряда аномально проводящих областей коры на южном склоне Фенноскандинавского щита (в русскоязычной литературе этот щит принято называть Балтийским) методом магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования произошло еще в 70-е годы прошлого столетия [1]. Анализ данных МТЗ в диапазоне периодов  $1-10^4$  с позволил выявить на Балтийском щите понижение сопротивления до первых десятков ом на метр на глубине 10–15 км. Главной неоднородностью коры Фенно-

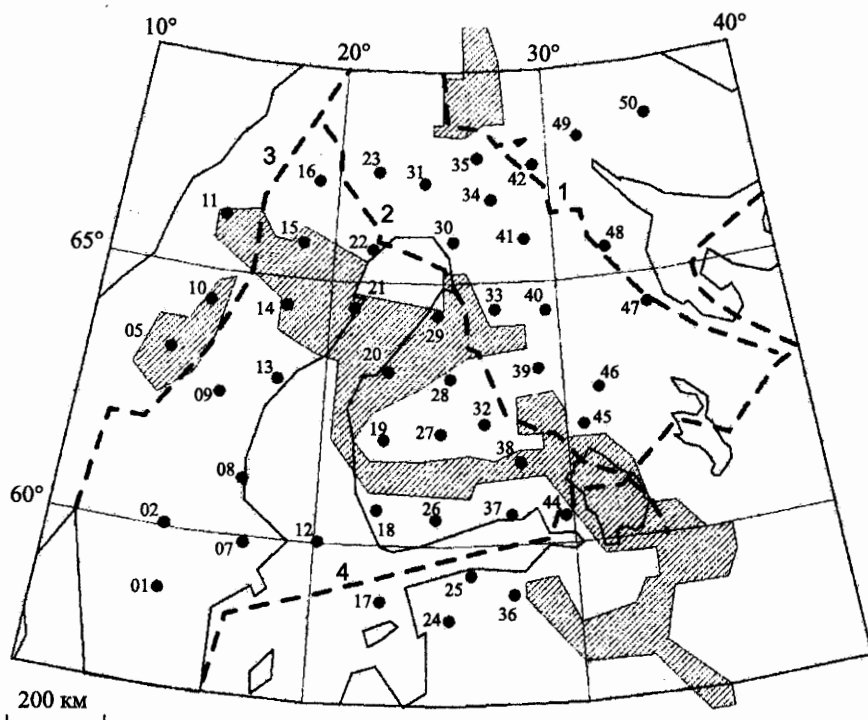


Рис. 1. Положение центральной аномалии проводимости коры Фенноскандинавского щита. Точки — пункты зондирования проекта BEAR; пунктирная линия — границы сочленения геоблоков, которые отмечены цифрами 1, 2, 3, 4

скандинавского щита является шовная зона или зона сочленения Свекофенского и Карельского геоблоков. Существование аномалии отмечено во многих работах и наиболее полно ее положение рассмотрено в работе [2]. На рис. 1 представлено в соответствии с [2] положение центральной проводящей зоны Фенноскандинавского щита. В зоне аномалии (заштрихованные области) продольная проводимость коры достигает 3000–4000 См.

Цель нашей работы — исследовать влияние подобной аномалии на поведение МТ-кривых и оценить возможность использования метода МТЗ для изучения самой аномальной зоны и нормального распределения электропроводности на больших глубинах.

## Модель

Для решения поставленной задачи использована программа, разработанная И. Л. Варданынц, рассчитывающая поля в двумерном приближении для различных моделей среды. На первом этапе исследования аномальной области была рассмотрена упрощенная модель в виде проводящей вставки, расположенной на глубине 10 км с шириной 100 км и удельным сопротивлением 5 Ом·м, которое значительно меньше нормального удельного сопротивления коры на этих глубинах и принято равным 5000 Ом·м (рис. 2, б). В качестве нормального разреза коры и мантии была использована модель, предложенная в работе [3], где распределение удельного сопротивления на глубинах 60–200, 200–400, 400–1000 км понижается соответственно до 1000, 50, 10 Ом·м. Вычисление компонент поля  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ , импеданса  $Z$  и магнитовариационного параметра  $h_z = H_z/H_x$  проводилось в интервале периодов 1–10<sup>4</sup> с.

## Результаты моделирования

Для рассматриваемой модели были построены кривые зондирования, частотные характеристики аномалии импеданса и магнитовариационного параметра, по результатам которых можно судить о характере влияния неоднородности на данные, получаемые при МТЗ.

**Кривые зондирования.** На рис. 2, а, в приведены кривые зондирования над центром и на расстоянии 105 км от центра вставки при двух поляризациях ( $H$  и  $E$ ), а также кривые для нормального и локально-нормального разреза. Под понятием локально-нормальный разрез понимают разрез, соответствующий слоистой среде с параметрами, совпадающими с параметрами разреза в точках над аномалией. Над центром вставки до определенного периода ( $T = 100$  с), зависящего от длины волны в проводящей вставке, кривые при двух поляризациях не отличаются от кривой для локально-нормального разреза. Как только длина волны в проводящей вставке становится соизмеримой с ее шириной, кривые  $\rho_T^H$  и  $\rho_T^E$  начинают отклоняться от кривой для локально-нормального разреза, причем кривая  $\rho_T^E$  идет выше и круче локально-нормальной, а  $\rho_T^H$  — ниже. Как видим, более точную информацию о разрезе несет кривая  $\rho_T^E$ , однако по ней мы получим заниженное значение продольной проводимости вставки. Для кривых зондирования на расстоянии 105 км от центра вставки  $\rho_T^H$  практически совпадает с нормальной кривой, а кривая  $\rho_T^E$  дает заниженные значения сопротивлений слоев, залегающих ниже проводящей вставки, вследствие индукционного влияния аномалии.

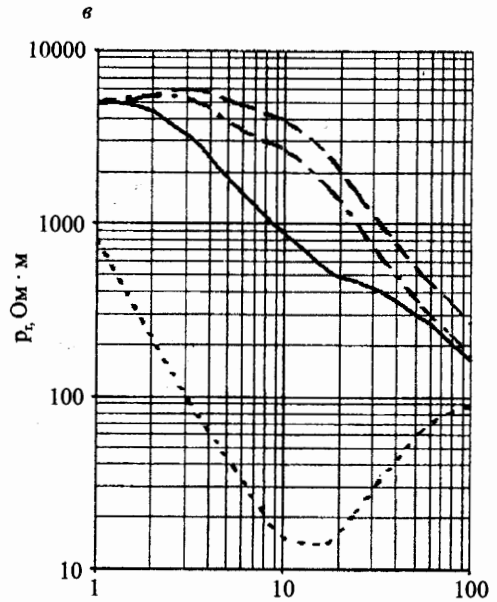
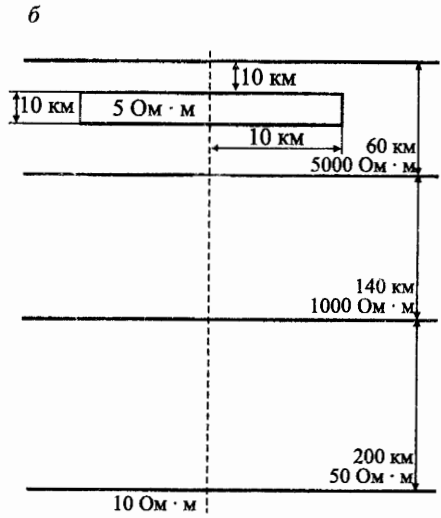
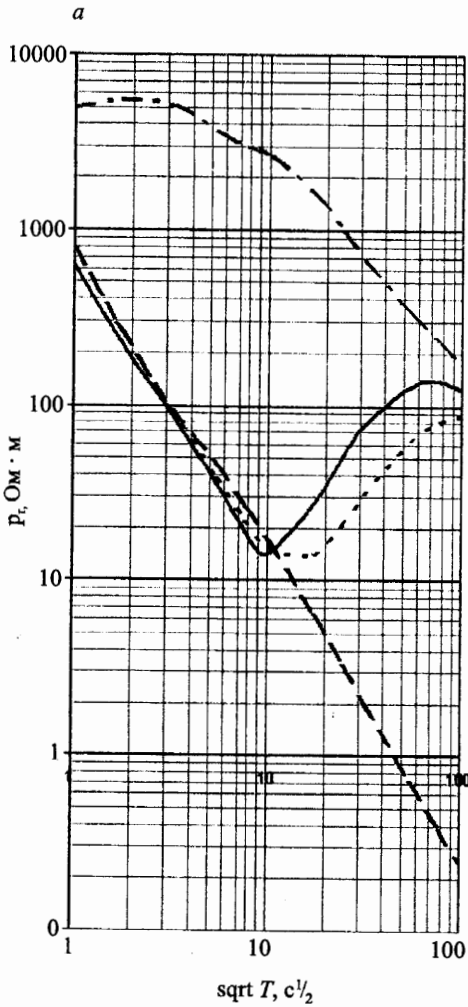


Рис. 2. Кривые зондирования: а — над центром вставки; б — модель; в — на расстоянии 105 км от центра вставки при двух поляризациях (пунктирная линия —  $H$ ; сплошная —  $E$ ; штрихпунктирная — нормальная кривая, мелкий пунктир — локально-нормальная над центром вставки)

**Импеданс.** Для оценки геоэлектрических параметров проводящей вставки полезно обратиться к анализу поведения импеданса по профилю, перпендикулярному к оси структуры. По пространственному поведению импеданса при  $H$ -поляризации (рис. 3) четко проявляется ширина проводящей аномалии. Зона аномальных значений импеданса при  $E$ -поляризации значительно превышает истинное значение ширины и только на периодах  $10^3 - 10^4$  с приближается к нормальному уровню над центром проводящего

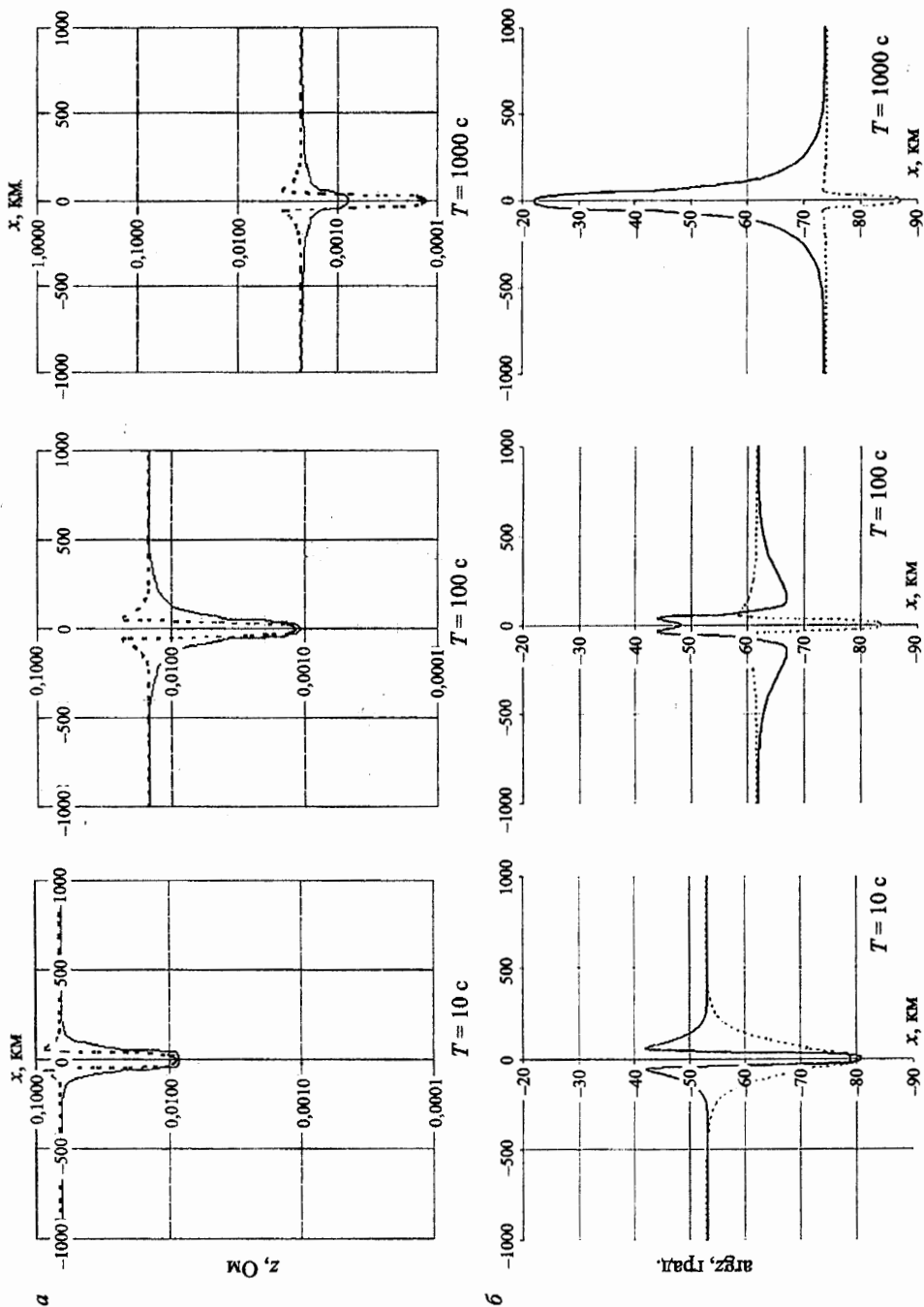


Рис. 3. Поведение импеданса (а) и фазы (б) при двух поляризациях по профилю на периодах 10, 100, 1000 с (пунктирная линия —  $H$ , сплошная —  $E$ )

тела, фаза же в рассмотренном интервале периодов на нормальный уровень не выходит. При удалении на расстояние порядка 500 км от центра неоднородности амплитуда импеданса выходит на нормальный уровень на всем интервале периодов. Для фазы это расстояние больше и составляет 700 км. В этом и состоит трудность применения фазовых кривых, при интерпретации которых полагают, что в области больших периодов фаза импеданса близка к фазе импеданса для нормального разреза. Поведение аномалий импеданса при двух поляризациях дает ценную информацию о простирании проводящей зоны.

Частотные характеристики аномалий импеданса при двух поляризациях  $\alpha_H$  и  $\alpha_E$ , вычисляемые по формуле  $\alpha_E(x) = |(Z_E(x) - Z_N)/Z_N|$ , где  $Z_N$  — нормальное значение амплитуды импеданса вдали от структуры, а  $Z_E(x)$  — значение амплитуды импеданса в точке ( $x$ ) при  $E$ -поляризации поля, представлены на рис. 4, где  $\alpha_H$  с ростом периода, достигнув максимального, стабилизируется, а  $\alpha_E$ , наоборот — уменьшается. Характер частотных характеристик не меняется, если приближать точку нормировки к центру аномалии. На рис. 4 мелким пунктиром представлено поведение  $\alpha_E$ , когда точка нормировки расположена над аномалией на расстоянии 50 км от центра. По мере сближения точек нормировки и наблюдения  $\alpha_E$  уменьшается по амплитуде, но положение максимума останется неизменным, сам же пик сужается. Таким образом, при проведении полевых исследований удобно для определения  $T_{\max}^{\alpha_H}$  вычислять локальную частотную характеристику  $\alpha_E^{i,k}$  по двум точкам над аномалией. По положению максимума частотной характеристики аномалии, как показывают предшествующие исследования [2], можно оценить проводимость поперечного сечения  $G = \sigma \cdot \Delta S$ , где  $\sigma$  — проводимость аномально проводящего тела,  $\Delta S$  — площадь поперечного сечения (рис. 4). Эту величину ввел И. И. Рокитянский [6] при изучении параметров аномалии электропроводности по магнитовариационным данным. В работе [2] было показано, что величина  $G$  может

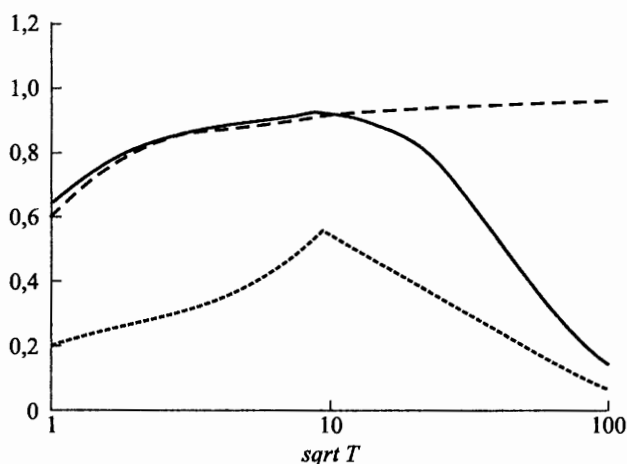


Рис. 4. Частотные характеристики  $\alpha_H$  и  $\alpha_E$ , вычисленные в точке над центром и на границе вставки (пунктирная линия —  $\alpha_H$  над центром, сплошная —  $\alpha_E$  над центром, мелкий пунктир —  $\alpha_E$  на границе вставки)

быть определена и по частотным характеристикам аномалии импеданса. Определив величину  $G$ , можно оценить пространственные размеры объекта, что крайне необходимо, например, в рудной разведке.

По частотной характеристике аномалии импеданса, если использовать ранее полученное эмпирическое соотношение  $G = 1,2 \cdot T_{\max}^{\alpha E} \cdot 10^6 = 1,2 \cdot 10^8 \text{ См} \cdot \text{м}$  [2], то получим

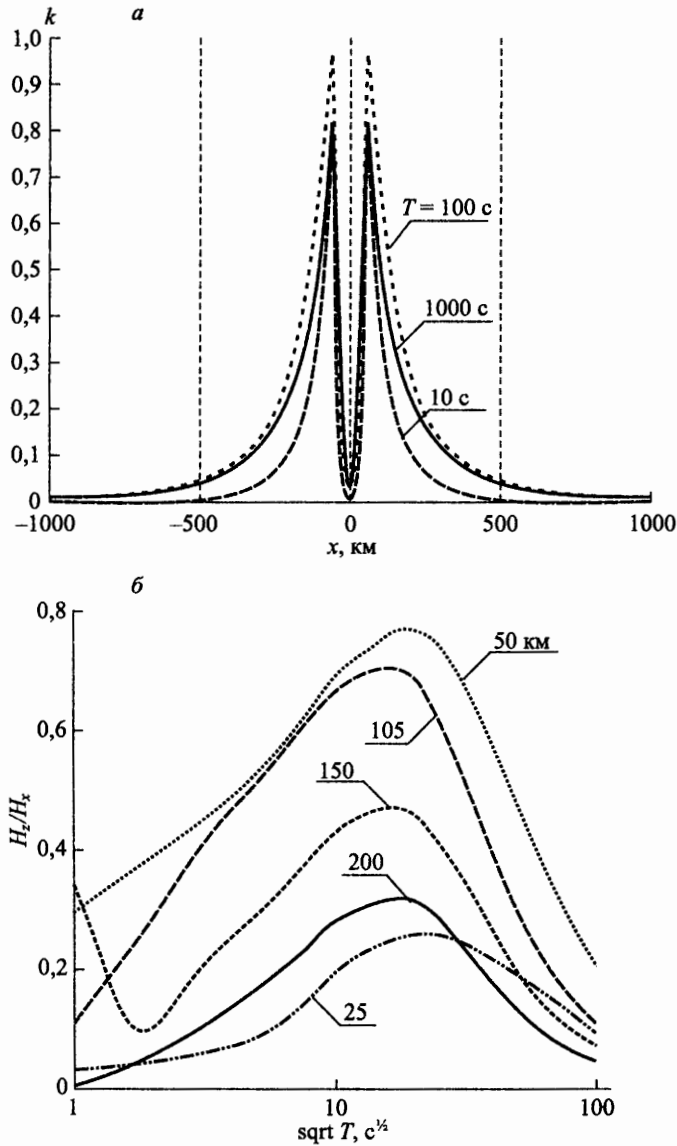


Рис. 5. Поведение вектора Визе в зависимости от удаленности точки зондирования от центра вставки (а) и магнитовариационного параметра на границе и на различных расстояниях от центра вставки (б)

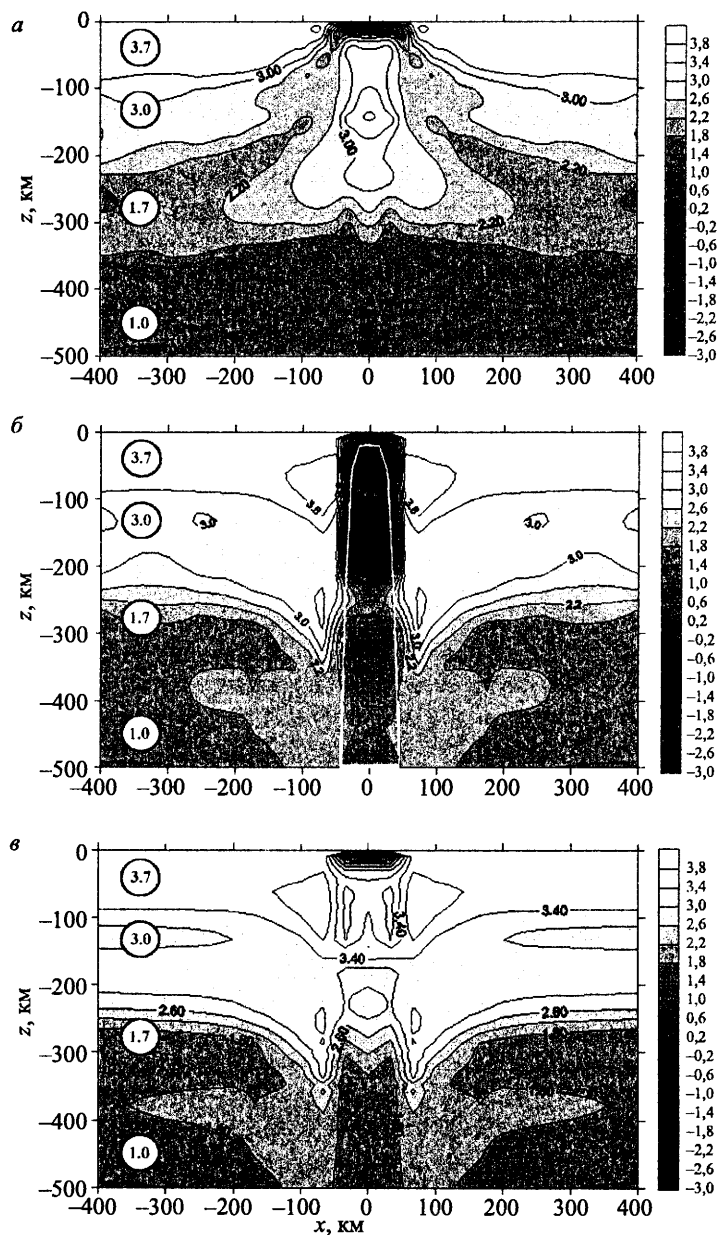


Рис. 6. Результат восстановления распределения удельного сопротивления среды по  $E$  (а),  $H$  — поляризации (б) и по фазам максимального импеданса (в). На шкале градиента отложены значения  $\lg \rho$ , в кругах указаны логарифмы модельных значений удельных сопротивлений

значение меньше истинного  $G = 2 \cdot 10^8$  См·м. Как показали расчеты, эта формула остается справедливой при глубине залегания верхней «кромки» проводящей вставки не более 30 км.

Серьезным дополнением при изучении аномальной зоны являются магнитовариационные данные (вектор Визе —  $k$ ). Над центром проводящего тела (рис. 5, а) индукционный вектор Визе равен нулю, также его величина стремится к нулю при значительном удалении от неоднородности. Максимальна величина вектора на расстоянии 50 км, т. е. на границе. На рис. 5, б приведена частотная характеристика магнитовариационного параметра  $h_z = H_z/H_{xN}$  ( $H_{xN}$  — нормальное значение горизонтальной компоненты поля). Максимум частотной характеристики  $h_z$  сдвинут относительно максимума  $\alpha_E$  в сторону больших периодов. Для рассмотренных параметров вставки и нормального разреза между  $G$  и  $T_{\max}^h$  справедливо соотношение  $G = 3T_{\max}^h \cdot 10^5 = 0,9 \cdot 10^8$  См·м [2], которое остается постоянным при изменении глубины залегания вставки в модели. Таким образом, чтобы получить правильную оценку  $G$  по  $\alpha_E$  и  $h_z$  необходимо коэффициент также увеличить почти в 2 раза.

В работе проведен анализ возможности восстановления разреза в рамках модели горизонтально слоистой среды при помощи программного пакета МЭЛ, разработанного на кафедре физики Земли СПбГУ Л. Н. Пороховой и М. М. Харламовым [4]. Восстановление проводилось по данным  $E$ -,  $H$ -поляризации и по фазам максимального импеданса (рис. 6).

На рис. 6, а мы наблюдаем правильное восстановление проводящей вставки, т. е. ее геометрия и местонахождение отражены по данным интерпретации при  $E$ -поляризации верно, но под вставкой присутствует ложная аномалия повышенного сопротивления. Вне вставки в мантии наблюдается ложное понижение сопротивления, вызванное индукционным эффектом от проводящей вставки. Эта область простирается до 300 км от центра вставки. На рис. 6, б показан результат восстановления распределения удельного сопротивления среды при  $H$ -поляризации, где белым контуром отмечена область «тени» — область под проводящей вставкой, информацию о строении которой на данном интервале периодов в рассмотренной модели получить невозможно. Однако при удалении от центра вставки примерно на 100 км «нормальный» разрез практически не искажен. При интерпретации по фазам максимального импеданса входными значениями фаз для программы МЭЛ над вставкой принимались значения фаз  $E$ -поляризованного поля, а вне вставки —  $H$ -поляризованного. При интерпретации фазы нормировались на значения  $\rho$  для нормального разреза при  $T = 10^4$  с. Однако над центром вставки выход на нормальный уровень при  $T = 10^4$  с не происходит ни при  $E$ , ни при  $H$ -поляризации, что приводит к ошибкам в оценках распределения. Необходимо продлить интервал регистраций периодов до  $10^5$  с, чтобы уменьшить ошибку при использовании фазы максимального импеданса для оценки сопротивления в районе аномалии.

## Заключение

На основании данных о строении коры и мантии на Балтийском щите в статье рассмотрена теоретическая возможность применения метода магнитотеллурических зондирований для изучения коровых аномалий электропроводности и получения нормального разреза этой территории. Балтийский щит не имеет осадочного чехла, поэтому



данные, полученные в интервале периодов  $1-10^4$  с, дают информацию о больших глубинах (более 400 км). Однако ситуация сильно осложнена присутствием в данном регионе аномалии, имеющей повышенную по отношению к вмещающим породам проводимость. В работе рассмотрен характер поведения кривых зондирования в условиях сильной горизонтальной неоднородности, а также учтена возможность неоднородности при решении обратной задачи. Так, на расстояниях, равных характерным размерам аномалии, ее влияние мало и восстановление геоэлектрического разреза происходит с большой точностью. Проведен анализ качества восстановления параметров среды в рамках квазидвумерной модели при одномерной интерпретации методом эффективной линеаризации. Оценена возможность и качество определения геоэлектрических параметров проводящего тела, находящегося в непроводящей вмещающей среде. В случае сложной структуры среды, имеющей горизонтальные двумерные неоднородности, для получения глубинного разреза (более 300 км) предпочтительнее использовать кривые при  $E$ -поляризации, данные при  $H$ -поляризованном поле правильнее отражают верхнюю часть разреза. Тем не менее к результатам восстановления двумерных сред одномерными методами следует относиться осторожно, восстановление в рамках двумерных и трехмерных моделей было бы точнее, однако эти методы требуют больших затрат машинного времени, а самое главное — наличие большого объема экспериментальных данных. С учетом огромного количества магнитотеллурической информации, полученной при работах на Балтийском щите, разумно использовать именно одномерную интерпретацию. Полученные результаты в дальнейшем предполагается использовать для построения нормального разреза Балтийского щита.

Автор выражает благодарность А. А. Ковтун за постановку задачи и обсуждение результатов.

#### Указатель литературы

1. Ковтун А. А., Варданыц И. Л., Легенькова Н. П. Влияние коровых аномалий электропроводности на поведение магнитотеллурического поля на Фенноскандинавском щите // Вопросы геофизики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. Вып. 38.
2. Ковтун А. А. Стрoение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.
3. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A. A., Kovtun A. A., Palshin N. A., Smirnov M. Yu., Tokarev A., Asming V. E., Vanyan L. L., Vardaniants I. L. and the BEAR working Group Crustal conductivity in Fennoscandia - a complanation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield // Earth Planet Space. 54, 2002. P. 535-558.
4. Porokova L. N., Kharlamov M. M. The solution of the one-dimentional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990.
5. Рокитянский И. И. Исследование аномалии электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наукова думка, 1975.