УДК 550.837

И.С.ФЕЛЬДМАН, *канд. геол.-минерал. наук, генеральный директор, mail@emgeo.com*
ООО «ЕМГЕО», Москва, Россия,
Е.Ю.ЕРМОЛИН, *аспирант, ermolin_stud@list.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

I.S.FELDMAN, *PhD in geol. & min. sc., general director, mail@emgeo.com*
«EMGEO» LTD, Moscow, Russia,
E.U.ERMOLIN, *post-graduate student, ermolin_stud@list.ru*
Saint Petersburg State Mining University

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ КРИВЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены связи между амплитудой и фазой всех компонент тензора магнитотеллурического (МТ) импеданса для 1D-, 2D- и 3D-теоретических геоэлектрических моделей. Выявлены некоторые общие закономерности этих связей, позволяющие использовать амплитудно-фазовую коррекцию для подавления смещенных оценок в защумленных данных. На основе найденных закономерностей сформулированы методические рекомендации по повышению точности определения компонент тензора импеданса в процессе обработки практических МТ-данных. Рассмотрены примеры обработки полевых материалов МТЗ, полученных с использованием аппаратуры MTU компании «Phoenix Geophysics Ltd» (Канада).

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, дополнительный импеданс, обработка.

AMPLITUDE-PHASE CORRECTION OF MAGNITOTELLURIE IMPEDANCE CURVES

The regularities of the amplitudes and phases connections of magnitotelluric (MT) impedance tensor components for 1D, 2D and 3D geoelectrical synthetic models have been considered. The amplitude-phase correction allows to improve the quality of data processing results both for the main and for the additional impedances. It also gives a possibility to suppress biased data for noise pollution data. Recommendations on accuracy rising of determination of tensor impedance components in the MT-data processing have been defined on the base of found regularities. Examples of processing of field MT-data received on the basis of MTU equipment by «Phoenix Geophysics Ltd» (Canada) have been considered.

***Kew words*:** magnitotellurie sounding, additional impedance, data processing.

В отличие от других электроразведочных методов в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) переходная характеристика среды на земной поверхности представляется в виде тензора-импеданса [Z]. Комплексные компоненты тензора связывают между собой горизонтальные компоненты естественного электромагнитного поля Земли:

$$[Z]=\begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix};$$

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y;$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y.$$

Все величины являются функциями координат x, y и частоты ω.

Необходимым условием решения обратной задачи для реальных трехмерных сред является достаточно высокая точность определения компонент тензора импеданса. Это касается как главных (Z_{xy}, Z_{yx}), так и дополнительных (Z_{xx}, Z_{yy}) импедансов.

Как повысить точность определения компонент тензора-импеданса для зашумленных помехами данных, если мы уже использовали имеющиеся возможности комплекса обработки, но имеем существенный разброс различных частных решений вокруг некоторого среднего значения. К сожалению, различные способы статистической обработки имеют существенные ограничения, связанные с наличием смещений оценок в силу реальной коррелированности естественного электромагнитного поля и помех. Это приводит к тому, что погрешности импеданса, полученные статистическими методами во всех программах обработки, оказываются существенно меньшими, чем смещение самих средних оценок, т.е. величина дисперсии не контролирует достоверность оценок [1].

Одно из важных свойств смещенных оценок заключается в том, что в большинстве случаев их влияние на фазовые параметры существенно меньше, чем на амплитудные [1, 2, 4]. Естественно, что в этом случае хотелось бы использовать фазовую кривую для корректировки амплитудной кривой. Еще лучше, если бы мы выполняли при получении среднего амплитудно-фазовое согласование данных, основанное на прямых расчетах фазовых кривых по амплитудным. Процедура, которая позволяет корректировать кривые МТЗ на основе законов соответствия между амплитудой и фазой, называется амплитудно-фазовой коррекцией (АФК).

В статье рассмотрены закономерности амплитудно-фазового соответствия компонент тензора-импеданса для теоретических 1D-, 2D- и 3D-геоэлектрических моделей. На основе найденных закономерностей сформулированы методические рекомендации по АФК практических МТ-данных. Рассмотрены примеры обработки полевых материалов МТЗ, полученных с использованием аппаратуры MTU компании «Phoenix Geophysics Ltd» (Канада). Основное внимание уделено закономерности АФК дополнительных компонент тензора импеданса.

Одномерные модели. Наиболее проста ситуация, которая соответствует квазислоистым средам, для которых дополнительные импедансы достаточно малы по сравнению с главными. Для теоретических моделей они равны нулю, а между модулем и фазой существует интегральное соотношение [4]

$$\varphi(\omega) = -\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty} \frac{d\ln|Z(\omega')|}{d\ln\omega'} \ln\left|\frac{\omega'+\omega}{\omega'-\omega}\right| \frac{d\omega'}{\omega'}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; φ – фаза импеданса; $|Z|$ – амплитуда импеданса

Соотношение (1) может быть преобразовано в приближенную формулу

$$\tilde{\varphi}(\omega) \approx -\frac{\pi}{2}\frac{d\ln|Z(\omega)|}{d\ln\omega} = \frac{\pi}{4}\frac{d\ln|Z(\sqrt{T})|}{d\ln\sqrt{T}}, \quad (2)$$

где $T = 2\pi/\omega$.

Приближенная формула (2) позволяет рассчитывать фазу, которая по форме хорошо отражает точное решение, но систематически расходится в экстремумах (до 10°). Для расчета по полной формуле (1) мы должны знать распределенные $Z(\omega)$ в достаточно широкой полосе частот, либо экстраполировать $Z(\omega)$ в обе стороны за пределы реально заданного частотного диапазона. С точки зрения создания интерактивной технологии АФК этот путь достаточно проблематичен.

Рассмотрим возможность, которая появилась благодаря разработке достаточно быстрых алгоритмов решения обратных 1D-задач. Если для кривой $|Z(\omega)|$ решается обратная задача, то результат ее решения в виде 1D-модели после решения прямой задачи содержит и $\varphi(\omega)$. Однако аналогично проблеме расчета по интегральному соотношению (1), здесь также возникают ограничения из-за многовариантности подбора

модели в интервале ее информационной связи с частотным диапазоном и неопределенности выбора модели за пределами диапазона такой связи. Для минимизации потерь за счет этих двух ограничений мы выбрали алгоритм, реализующий метод эффективной линеаризации МЭЛ [5]. В отличие от задач численного моделирования с регуляризованным (оптимизированным) подбором параметров среды в МЭЛ решается задача моделирования оператора МТЗ на базе 1D-уравнений Максвелла. Такой подход не требует задания модели среды (например, конечно-слоистой), и, следовательно, может быть применен к задаче обработки экспериментальных данных. Результатом решения обратной задачи МЭЛ является монотонно-изменяющийся геоэлектрический разрез, фактически состоящий из нескольких десятков или сотен слоев. Здесь не требуется задания каких-либо априорных данных или ограничений, что важно при многократном использовании модуля в интерактивном процессе АФК. Обозначим полученные в результате 1D-инверсии модуль и фазу как $\overline{Z}(\omega)$ и $\overline{\varphi}(\omega)$. Здесь и далее опустим признак частотной зависимости.

Рассмотрим возможные погрешности пересчета $|\overline{Z}|$ в $|\overline{\varphi}|$ по методу МЭЛ на теоретических 1D-моделях различного типа. Из общих соображений видно, что максимальные погрешности будут порождаться моделями с малым количеством слоев и контрастными сопротивлениями, а минимальные – с многослойными и малоконтрастными моделями. Для всех кривых МТЗ решалась 1D-обратная задача МЭЛ. Полученные амплитудно-фазовые кривые $|\overline{Z}|$ и $|\overline{\varphi}|$ практически совпадают с теоретическими (рис.1). Максимальные погрешности по фазе составляют 0,06° (4-6 слоев), а минимальные 0,03° (25-30 слоев), что подтверждает возможность использования процедуры 1D-инверсии в технологии АФК. Аналогичная закономерность наблюдается и для отклонений фазы, рассчитанных по приближенной формуле (2). Для конечно-слоистых и контрастных моделей максимальные отклонения φ и $\widetilde{\varphi}$ могут составлять около 10°, а для многослойных и малоконтрастных 2-4°.

Следует отметить, что Земля как объект изучения представляет собой квазислоистую среду, где по данным каротажа выделяются многие сотни выразительных слоев, прослеживаемых по простиранию на десятки и сотни километров. Таким образом, реальные данные, по крайней мере, для осадочного чехла, всегда ближе к многослойным.

Рассмотрим примеры АФК главных импедансов для практических данных МТЗ, полученных в Западно-Кубанском прогибе с аппаратурой MTU. После стандартной обработки использовалась АФК, т.е. осуществлялся последовательный интерактивный отбор тех решений $|Z|$, которые давали лучшее соответствие между φ и $\widetilde{\varphi}$ (рис.2). Работа выполнялась в графическом редакторе «Корректор» производства ООО «Северо-Запад». Проконтролируем полученные результаты, т.е. рассчитаем, используя программу 1D-обратной задачи МЭЛ, по амплитудной кривой ($|Z|$) соответствующую ей фазовую кривую ($\overline{\varphi}$). Из рис.2 видно, что кривая $\overline{\varphi}$ достаточно близка к практической кривой φ, подобранной с использованием АФК по приближенной формуле. Средняя невязка по фазе составила 0,5-0,7°, что указывает на достаточно высокую эффективность использования для АФК фазы по приближенной формуле (2).

Двумерные модели. Рассматривая возможности и особенности АФК для импедансов двумерных сред, будем использовать компоненты тензора импеданса для двумерной модели 0404 (рис.3). Расчеты выполнены в программе «Rebocc». Для двумерных сред, как известно, вдоль и поперек структур дополнительный импеданс равен нулю. Поэтому выполним разворот тензора импеданса на $\alpha = 30°$.

При использовании АФК для главных импедансов 2D-модели закономерностей АФК импедансов 1D-моделей процедура контроля аналогична описанной выше, т.е. теоретические 2D-кривые сравниваются с результатами, полученными по 1D-инверсии МЭЛ (рис.4).

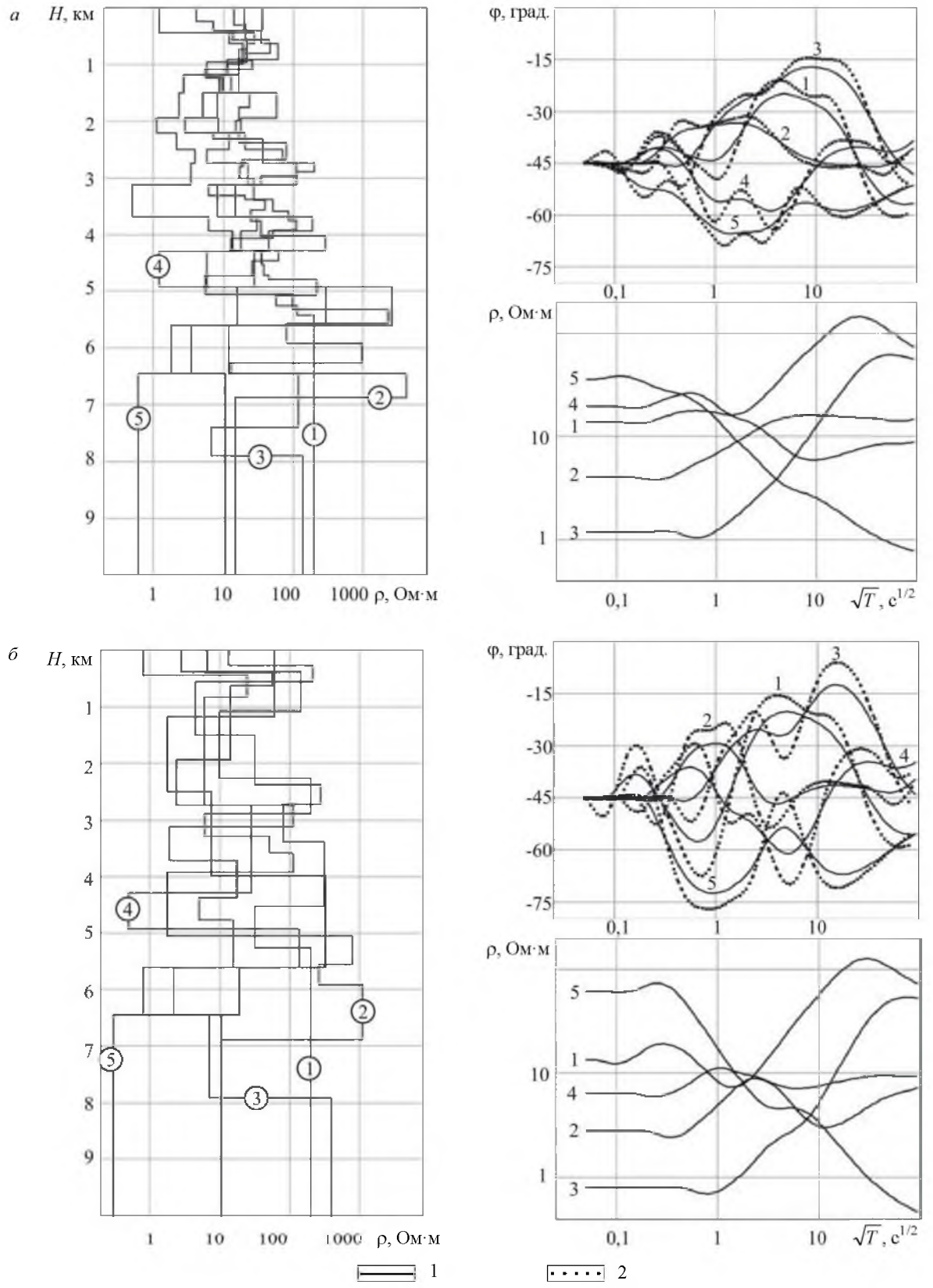


Рис.1. 1D-геоэлектрические модели и соответствующие им амплитудно-фазовые кривые МТЗ для многослойных малоконтрастных (*а*) и толстослойных и контрастных (*б*) моделей

1 – ρ и φ; 2 – $\tilde{\varphi}$ -фаза по приближенной формуле (2)

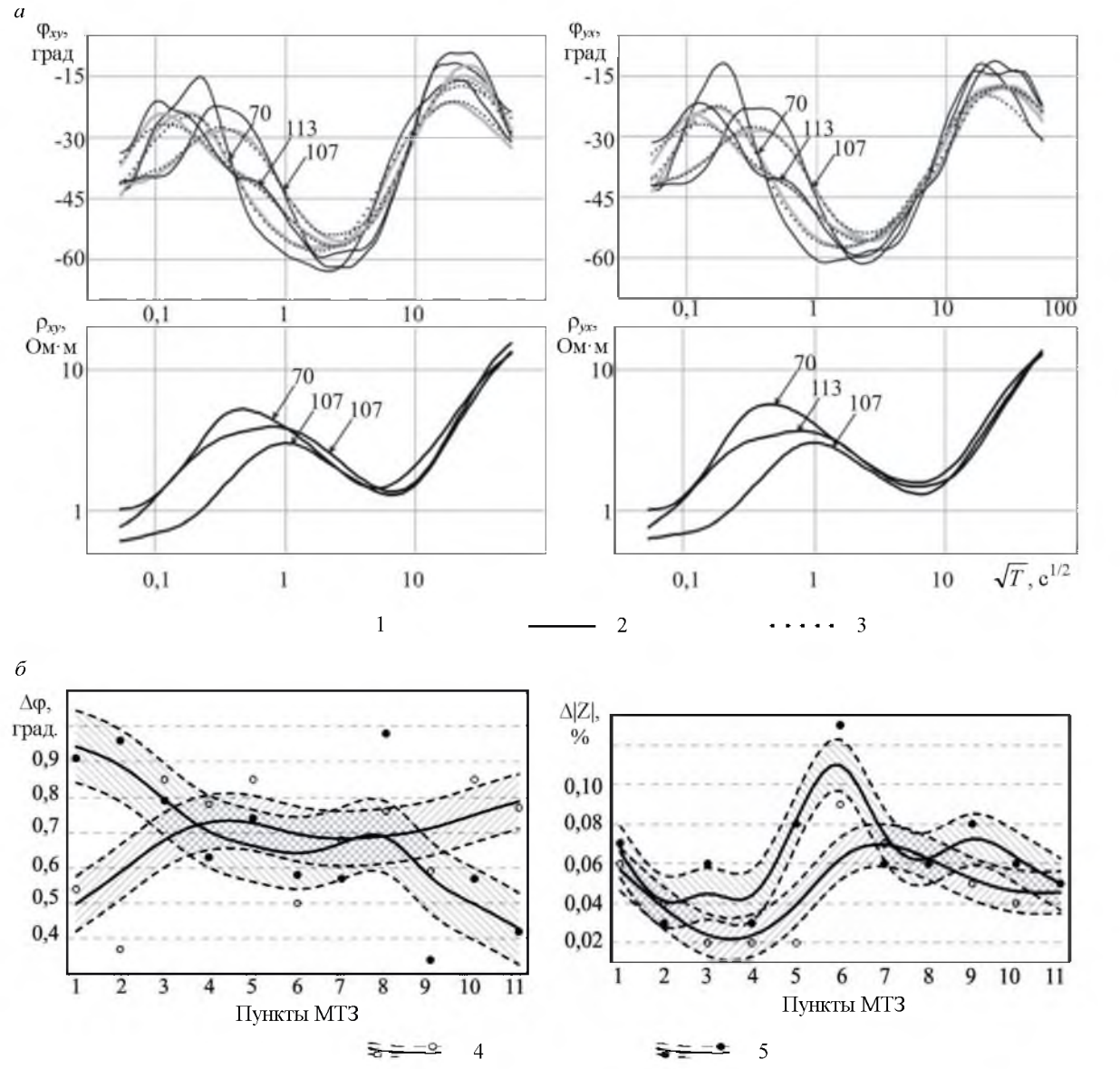


Рис.2. Результаты АФК ρ_{xy} и ρ_{yx} практических данных МТЗ по профилю 1 в Западно-Кубанском прогибе: (*а*) – амплитудно-фазовые кривые после АФК и их номера; (*б*) – невязки и доверительный интервал для модулей и фаз Z_{xy} и Z_{yx} с данными 1D-инверсии МЭЛ

1 – $\varphi_{xy,yx}$; 2 – ρ и $\widetilde{\varphi}$-фаза по формуле (2); 3 – $\overline{\varphi}$-фаза импеданса 1D-инверсии МЭЛ; 4 и 5 – невязки и их доверительный интервал; 4 – $|Z_{xy}|$, φ_{xy}; 5 – $|Z_{yx}|$, φ_{yx}

Как видно невязки невелики и лежат в пределах 0,5°.

Таким образом, методология АФК с 1D-инверсией может быть использована и для корректировки главных импедансов в случае квазидвумерных сред. Следует, однако, заметить, что в случае достаточно контрастных неоднородностей модули главных импедансов могут иметь наклон более 62°, т.е. они выходят из класса кривых 1D-моделей. Естественно, мы не можем использовать в этом случае для контроля 1D-инверсию МЭЛ. Здесь можно было бы использовать формулу интегральных дисперсионных соотношений Вайдельта [3], однако возникают уже отмеченные ранее проблемы с ограниченным частотным диапазоном. Практический опыт показывает, что и в этом случае

АФК можно выполнять достаточно эффективно при использовании кривых $\tilde{\varphi}$, полученных по формуле (2).

Возможности АФК для дополнительных импедансов показаны для той же модели 0404 ($\alpha = 30°$) на рис.5. Заметим, что для двумерных сред $Z_{xx} = -Z_{yy}$, поэтому мы будем анализировать только компоненту Z_{xx}. На рис.5, *а* отобраны пункты, где $|Z_{xx}|$ являются достаточно гладкими функциями, а на рис.5, *б* они имеют минимумы различной амплитуды на различных периодах. Появление этих минимумов связано с уменьшением или с переходом в определенной полосе периодов реальной или мнимой части Z_{xx} через ноль. И, если для «гладких» $|Z_{xx}|$ фазовые соответствия достаточно просты и схожи с теми, что мы наблюдали для главных импедансов, то ситуация с минимумами $|Z_{xx}|$ приводит к резким изменениям фазы, вплоть до скачков на ±180° или ±360°, что соответствует изменению знака отдельно по Re Z_{xx} или Im Z_{xx}, или по обеим частям одновременно. Природа подобных особенностей объясняется перестройкой структуры поля, которая на высоких частотах определяется действием близлежащих и неглубоких неоднородностей, а с увеличением длины волны – действием глубинных и региональных структур. Для некоторых пунктов МТЗ 2D-моделей (рис.5, *б*) интервал изменений фаз может достигать 700-800°, что, на первый взгляд, вызывает недоумение. Однако, это вполне закономерный результат, отражающий многократность перестройки тензора Z с понижением частоты. Весьма важно, что подобная ситуация достаточно типична для реальных данных в присутствии контрастных многоплановых неоднородностей.

Несмотря на кажущееся многообразие связей между φ_{Zxx} и $|Z_{xx}|$, общей закономерностью практически для всех пунктов МТЗ является возможность достаточно хорошей аппроксимации теоретических кривых φ_{Zxx} фазой, полученной по производной $|Z_{xx}|$ по формуле (2), но в общем случае только на отдельных частотных интервалах между минимумами $|Z_{xx}|$. Количество интервалов определяется количеством таких минимумов. Для данной 2D-модели и представленного частотного диапазона возможны один или два минимума, а следовательно, один, два или три интервала соответствия. На рис.5 показаны примеры увязки фазовых кривых для различных типовых ситуаций путем смещения кривых на 180° или 360° для отдельных интервалов (рис.5, *б* и *в*). Отметим, что хотя смещение фазы на 360° не изменяет комплексного числа, оно может привести к нарушению формы частотных зависимостей.

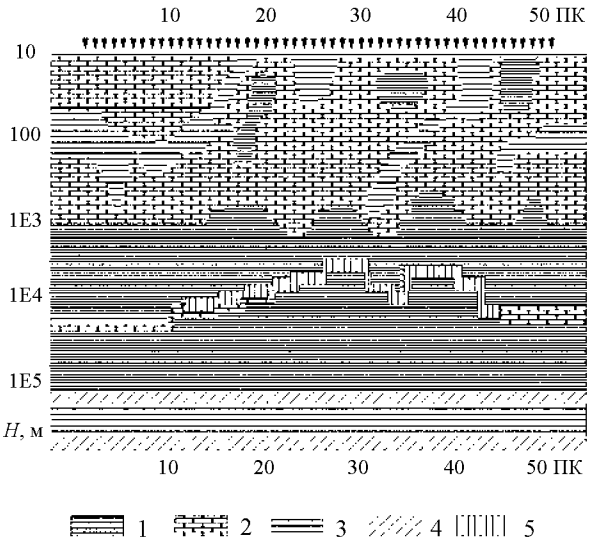


Рис.3. Двумерная геоэлектрическая модель земной коры 0404

1-5 – удельное электрическое сопротивление: 1 – 1000 Ом·м; 2 – 100 Ом·м; 3 – 20 Ом·м; 4 – 5 Ом·м; 5 – 1 Ом·м

После смещения фазовых кривых начинается собственно работа геофизика по АФК. Она заключается в последовательной отбраковке смещенных оценок модуля $|Z|$ с целью приближения $\tilde{\varphi}$ к φ. После каждого шага отбраковки заново рассчитывается фазовая кривая $\tilde{\varphi}$ по формуле (2) и при необходимости фаза $\overline{\varphi}$. Процедура повторяется до удовлетворительного согласования кривых φ и $\tilde{\varphi}$ ($\overline{\varphi}$). В ряде случаев для отдельных интервалов возможна и достаточно эффективная корректировка фазовой кривой по амплитудной. Когда взаимное соответствие амплитуды и фазы достигнуто, необходимо восстановить первоначальное положение кривых $\varphi_{xx,yy}$ с целью получения гладкой функции частоты.

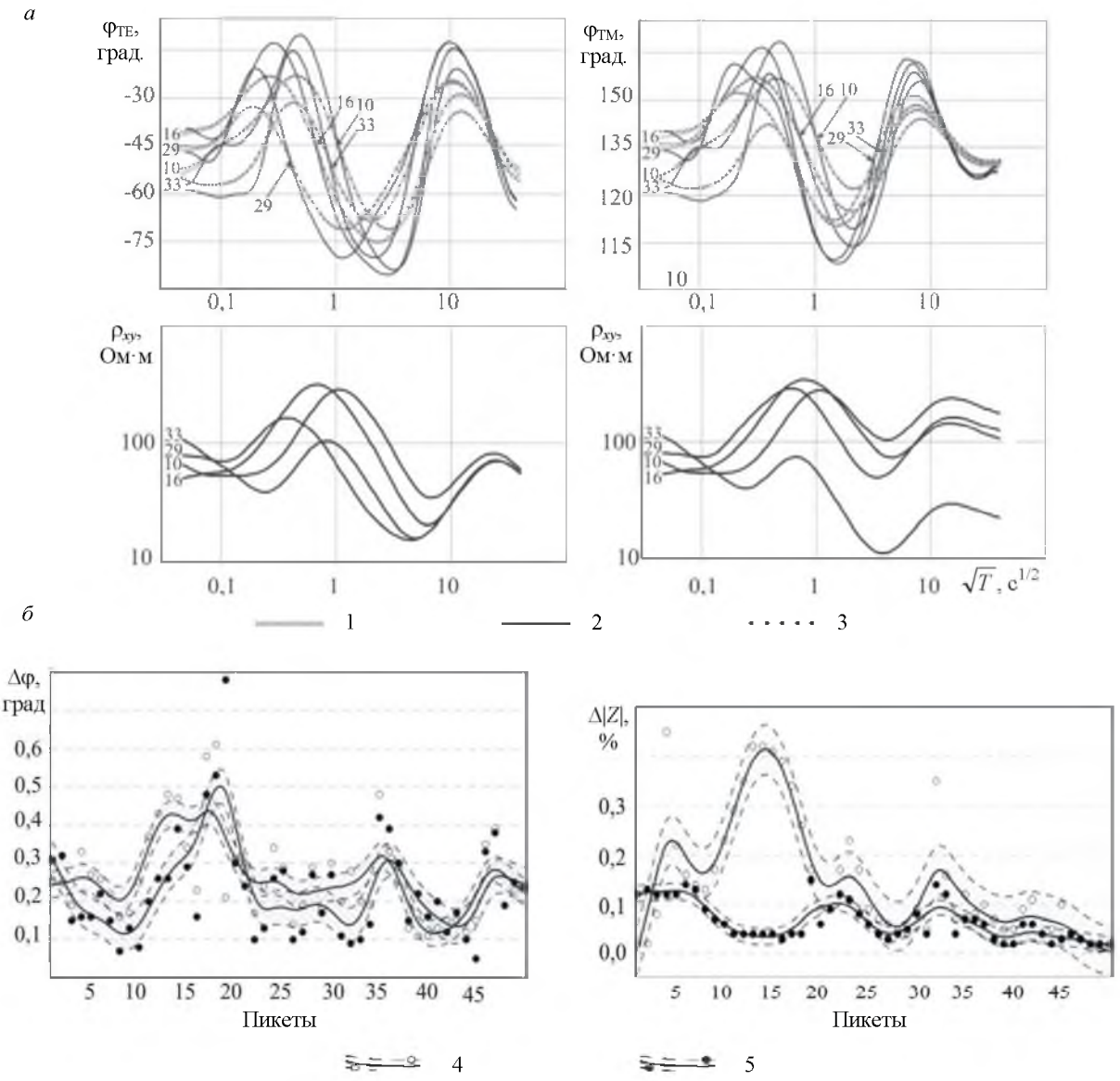


Рис.4. Амплитудно-фазовые кривые МТЗ в направлении продольной (ТЕ) и поперечной (ТМ) поляризации 2D-модели 0404 и их номера (*а*) и невязки с данными 1D-инверсии МЭЛ (*б*)

1 – $\varphi_{ТЕ, ТМ}$; 2 – ρ и $\widetilde{\varphi}$-фаза по формуле (2); 3 – $\overline{\varphi}$-фаза импеданса 1D-инверсии МЭЛ; 4 и 5 – невязки и их доверительный интервал: 4 – $|Z_{ТЕ}|$, $\varphi_{ТЕ}$; 5 – $|Z_{ТМ}|$, $\varphi_{ТМ}$

3D-модели и практические данные. Последней теоретической моделью является 3D-модель Казанско-Кажимского авлакогена и его обрамления. Модель построена на базе результатов интерпретации примерно 1500 МТЗ, выполненных в этом регионе. Размер области данных 800 × 800 км, шаг сетки 2 × 2 км. Показанные результаты относятся к той части моделирования, которая была направлена на изучение влияния неоднородной верхней части осадочного чехла до глубины 1000 км. Ниже этой глубины использовалась 1D-модель. Расчеты выполнены в программе BEL1D [6] Р.Ф.Логуновичем.

Примеры соответствия амплитудно-фазовых кривых для главных и дополнительных импедансов показаны на рис.6. Для МТЗ 1112 выполнено смещение φ на 360°. Все приведенные примеры имеют один ин-

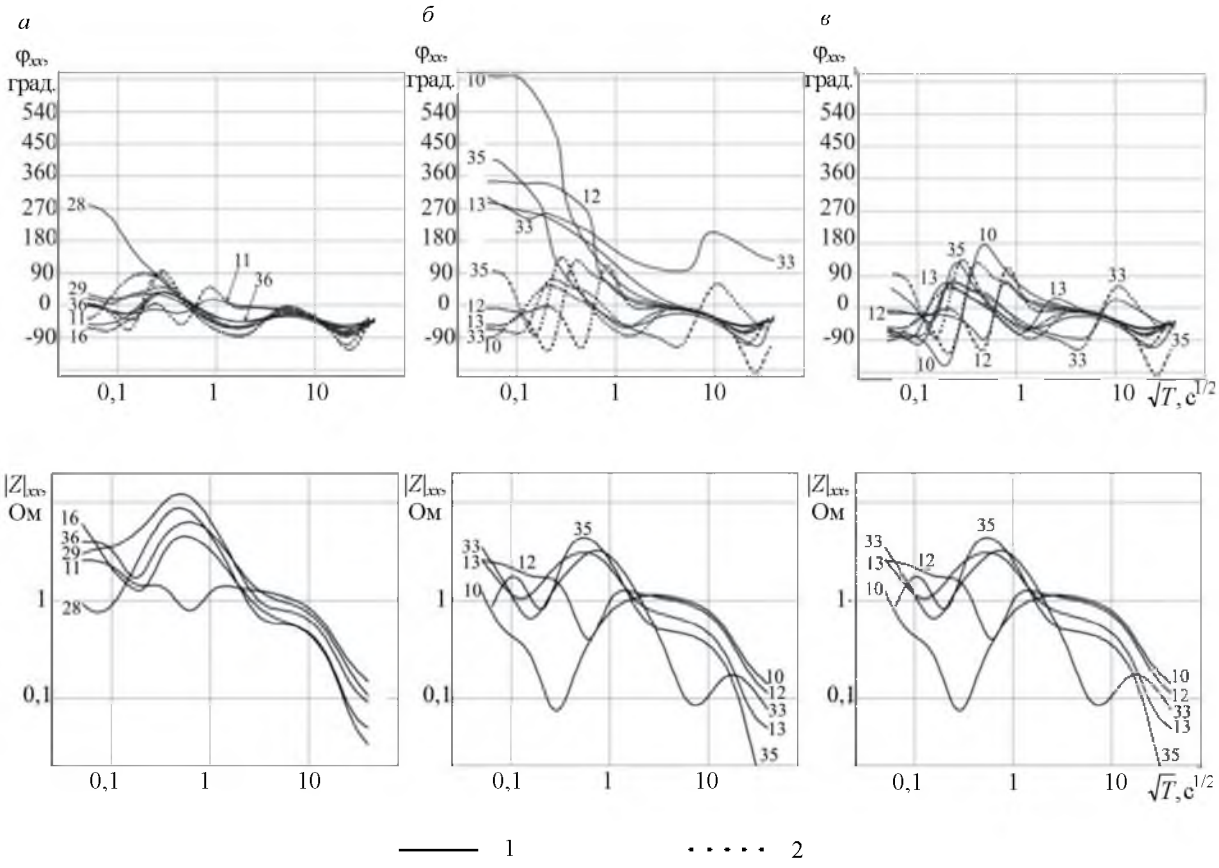


Рис.5. Амплитудно-фазовые кривые Z_{xx} для пунктов МТЗ 2D-модели 0404 и их номера: *а* – без скачка φ_{xx} (один интервал соответствия); *б* и *в* – со скачками φ_{xx} (два, три интервала соответствия) до и устранения скачков фазы на 180° и 360° соответственно

тервал соответствия, что связанно с отсутствием на модели неоднородностей на глубине менее 1 км. Закономерности соответствия для 3D-моделей ничем не отличаются от закономерностей для 1D- и 2D-моделей, что позволяет надеяться на успешное использование описанных выше правил АФК в этом более общем случае.

Пример использования АФК для обработки практических данных показан на рис.7 и 8. Данные получены аппаратурой MTU в южной Якутии, где строение осадочного чехла достаточно уникально по своей сложности. Это хорошо видно и из представленных амплитудно-фазовых кривых МТЗ. Главные импедансы существенно отличаются по своей форме и уровню сопротивлений. Модули дополнительных импедансов соизмеримы с главными, имеют минимумы, соответственно, смещения фаз отдельных интервалов на 180° и 360°. Используя вышеописанные правила амплитудно-фазовых соответствий, выполним смещения наблюденных фазовых кривых φ_{xx} и φ_{yy} в интервалах их связи с $\tilde{\varphi}_{xx}$ и $\tilde{\varphi}_{yy}$. Для φ_{xy} и φ_{yx} в этом нет необходимости. Будем теперь последовательно отключать на графиках модулей смещенные решения так, чтобы новый сплайн воспроизводил $\tilde{\varphi}$, приближающуюся к φ. Контролировать эти процедуры для главных импедансов будем путем расчета фазы $\tilde{\varphi}$ с использованием 1D-инверсии МЭЛ. На рис.7, *а* и 8, *а* показано исходное состояние данных АФК, на рис.7, *б* и 8, *б* – результаты после работы по АФК. Нам удалось при использовании фазы существенно уточнить и детализировать кривые модулей тензора *Z*. Это произошло не только в силу меньшего влияния на фазу смещенных оценок, но и в силу большей ее дифференцированности как производной.

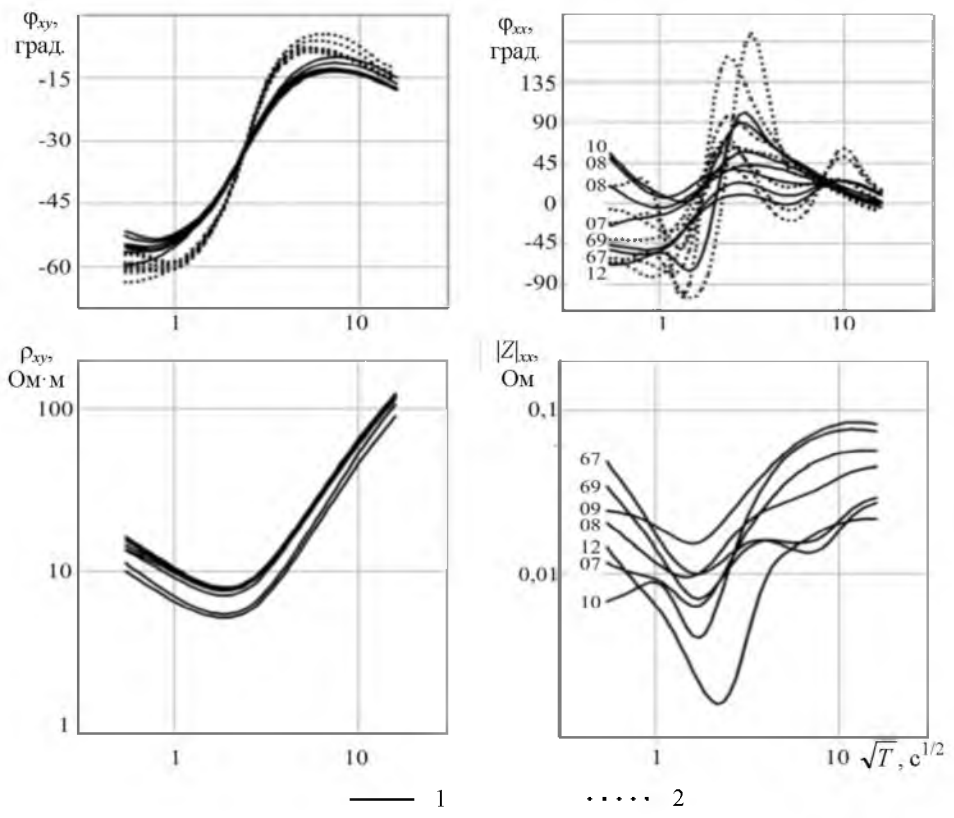


Рис.6. Амплитудно-фазовые кривые ρ_{xy} и Z_{xx} пунктов МТЗ для 3D-геоэлектрической модели Казанско-Кажимского авлакогена и их номера

1 – ρ_{xy}, $|Z_{xx}|$, $\varphi_{xy,xx}$; 2 – $\tilde{\varphi}$ -фаза по формуле (2)

Итак, мы убедились, что амплитудно-фазовые соответствия компонент тензора импеданса для 1D-, 2D- и 3D-теоретических моделей во всех случаях имеют общие закономерности, которые можно эффективно использовать для амплитудно-фазовой коррекции практических данных. Сформулированы ряд правил для технологии интерактивной АФК и требований к соответствующему программному обеспечению. Изложенная методика АФК успешно использовалась для обработки нескольких тысяч пунктов МТЗ, полученных с аппаратурой MTU в различных регионах. При этом диапазон геологических задач был достаточно широк: от поиска руд и алмазоносных трубок до нефтегазопоисковых работ и глубинных исследований.

Для сильно зашумленных данных удается получить в ряде случаев достаточно приемлемые с точки зрения решения геологических задач результаты. В частности, можно восстановить значение модулей в традиционных интервалах минимума активности МТ-поля (0,6-10 с) и при недостаточной статистике на больших периодах. Не менее важную задачу АФК решает и в ситуации с относительно низким уровнем шумов, поскольку позволяет существенно повысить дифференцированность кривых МТЗ и их разрешающую способность.

В заключение следует, видимо, дать некоторые комментарии к проблеме так называемых дисперсионных соотношений [3]. Большинство специалистов считают, что между амплитудой и фазой МТ-поля существует взаимно-однозначное соответствие типа (1) для любых ситуаций, удовлетворяющих условиям применимости обобщенной модели Тихонова – Каньяра. Примеры таких теоретических оценок многочисленны. Однако есть и сомневающиеся. Они не

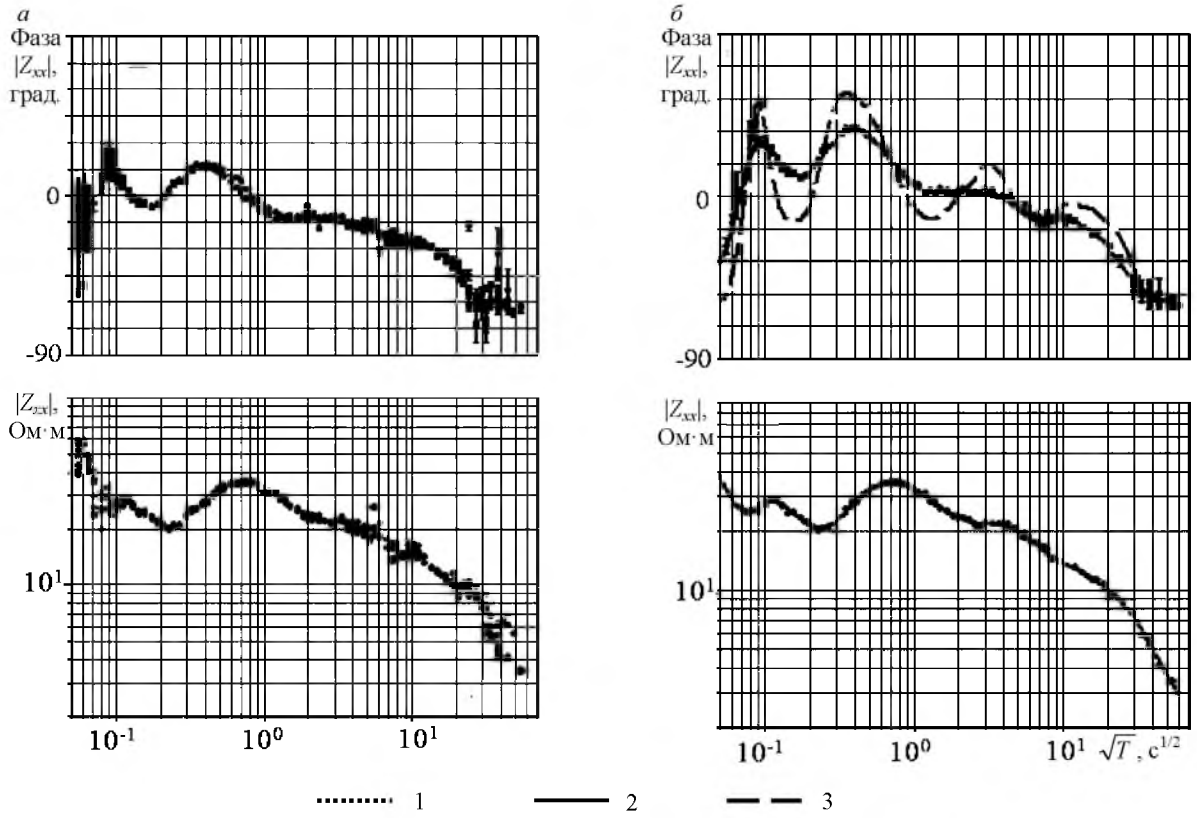


Рис.7. Результаты АФК главных компонент тензора импеданса по профилю «Батолит»: *а* – результаты первичной обработки с использованием авторедакции; *б* – результаты после АФК и результативные сплайны

1 – отдельные решения; 2 – результативные сплайны для ρ и φ_{xy}; 3 – $\tilde{\varphi}$-фаза, рассчитанная по формуле (2)

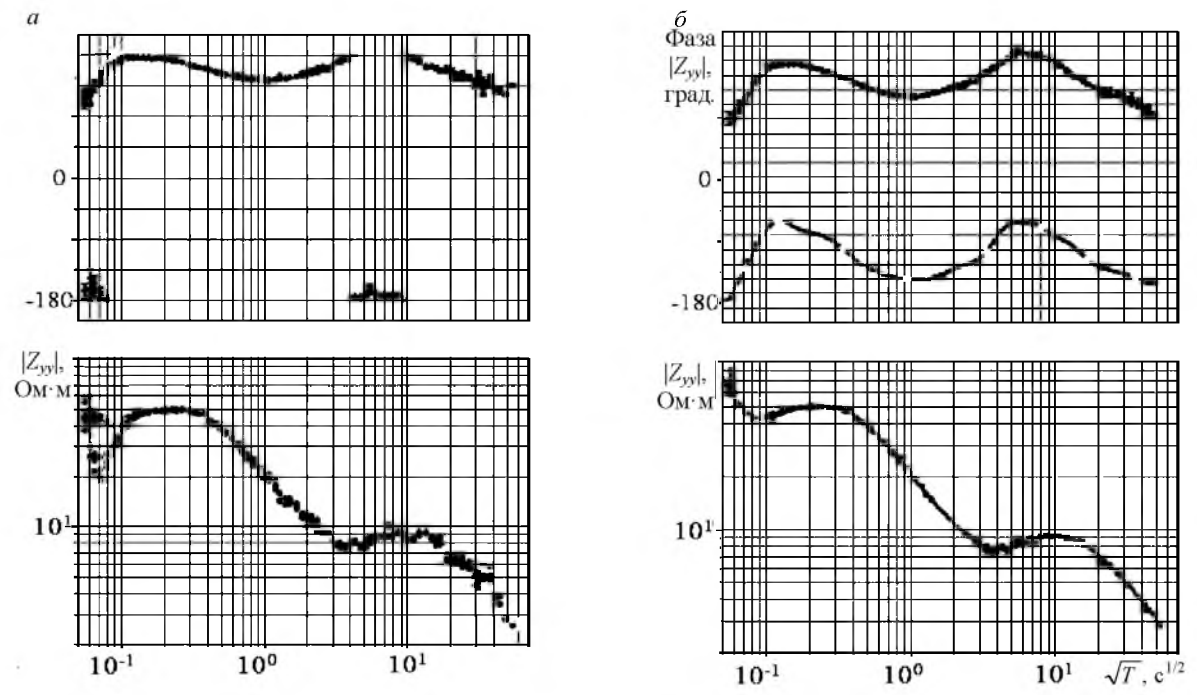


Рис.8. Результаты АФК дополнительных компонент тензора импеданса по профилю «Батолит»: *а* – результаты первичной обработки с использованием авторедакции; *б* – результаты после АФК и результативные сплайны. Усл. обозначения см. на рис.7

приводят никаких доказательств существования самой возможности нарушения дисперсионных соотношений, а оперируют к отдельным экзотическим примерам [3]. Рассмотрим их. Первый пример – это длиннопериодные ветви кривых МТЗ в Кавказском регионе, для которых при $T > 1000$ с наблюдается несогласованное поведение ρ и φ. После обсуждений в 1990-е гг. было достигнуто понимание того, что Кавказ – слишком большая неоднородность для таких длинных периодов, что приводит к искажению в распределении токов проводящей ионосферы, нарушая тем самым условия Тихонова – Каньяра. Второй пример относится к модели донного МТЗ для продольной компоненты в прибрежной зоне океана и объясняется влиянием мощных и протяженных токовых систем, взаимодействующими с токами в ионосфере, нарушая их структуру. Фактически, как и в первом случае, мы имеем дело с нарушением условий Тихонова – Каньяра. И, наконец, третий пример относится к теоретической модели, состоящей из подвешенных в воздухе ($\rho = \infty$) между ионосферой и мантией на высоте 100 км тонкой проводящей плоскости с круговым отверстием, под которым находится проводящая призма. В этой крайне экзотической модели нарушается условие непрерывности поверхности Земли, что приводит к искажению структуры поля в источнике вблизи отверстия в пластине.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Безрук И.А.* Оценка достоверности определения импедансов при обработке магнитотеллурических вариаций / И.А.Безрук, В.О.Лахтионов // Прикладная геофизика. 1977. Вып.89. С.80-87.

2. *Белявский В.В.* Технология рудного аудимагнитотеллурического зондирования / В.В.Белявский, В.В.Сухий // Разведка и охрана недр. 2003. № 2. С.38-47.

3. *Бердичевский М.Н.* Модели и методы магнитотеллурики / М.Н.Бердичевский, В.И.Дмитриев. М., 2009. 680 с.

4. Электроразведка: Справочник геофизика / Под ред. В.К.Хмелевского и В.М.Бондаренко. М., 1989. Кн.1. 291 с.

5. *Porokhova L.N., Kharlamov M.M.* The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. Vol.60. P.68-79.

6. *Avdeev D.B., Kuvshinov A.V., Pankratov O.V., Newman G.A.* High-performance three-dimensional electromagnetic modeling using modified Neumann series // Geoelectr. 1997. Vol.49. P.1519-1539.

REFERENCES

1. *Besruk I.A., Lahtionov V O.* The estimation of quality of the impedances determination at the magnetotelluric variations processing // Applied geophysics. 1977. Vol.89. P.80-87.

2. *Belyvsky V V., Sukhiy V V.* Ore audiomagnetotelluric sounding technology // Prospecting and protection of the Earth's interior. 2003. N 2. P.38-47.

4. Geoelectrical prospecting. Reference book for geophysicist / Ed. V.K.Hmelevckoy and V.M.Bondarenko // Moscow, 1989. Book 1. 291 p.

3. *Berdichevsky M.N, Dmitriev V I.* Models and Methods of Magnetotellurics. Moscow, 2009. 680 p.

5. *Porokhova L.N., Kharlamov M.M.* The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1990. Vol.60. P.68-79.

6. *Avdeev D.B., Kuvshinov A.V., Pankratov O.V., Newman G.A.* High-performance three-dimensional electromagnetic modeling using modified Neumann series // Geoelectr. 1997. Vol.49. P.1519-1539.