УДК 550.837

Е.Ю.ЕРМОЛИН, *аспирант, ermolin_stud@list.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

E.U.ERMOLIN, *post-graduate student, ermolin_stud@list.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

АМПЛИТУДНО-ФАЗОВАЯ КОРРЕКЦИЯ КРИВЫХ МТЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИМПЕДАНСА ДЛЯ ДВУМЕРНЫХ СРЕД

Рассмотрены связи между амплитудой и фазой всех компонент тензора магнитотеллурического (МТ) импеданса для двумерных (2D) теоретических геоэлектрических моделей. Выявлены некоторые общие закономерности этих связей, позволяющие использовать амплитудно-фазовую коррекцию для подавления смещенных оценок в зашумленных данных. На основе найденных закономерностей сформулированы методические рекомендации по повышению точности определения компонент тензора импеданса в процессе обработки практических МТ-данных.

Ключевые слова: МТЗ, дополнительный импеданс, обработка.

AMPLITUDE-PHASE CORRECTION OF ADDITIONAL MT IMPEDANCE CURVES FOR TWO DIMENSIONAL STRUCTURES

The regularities of the amplitudes and phases connections of MT-impedance tensor components for 2D geoelectrical synthetic models have been considered. The amplitude-phase correction (APC) 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.

Kew words: MT sounding, additional impedance, data processing.

В отличие от других электроразведочных методов в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) результат изучения отклика геологической среды представляется в виде тензора импеданса. Последний несет в себе информацию о закономерностях изменения геоэлектрических параметров для всех направлений в трехмерном геологическом пространстве. При этом должна быть обеспечена высокая точность определения всех компонент тензора импеданса как главных (Z_{xy}, Z_{yx}), так и дополнительных (Z_{xx}, Z_{yy}). В случае решения двумерной обратной задачи МТЗ дополнительные компоненты используются для разворота тензора магнитотеллурического импеданса в направлении двухмерности среды.

Осложняющим фактором при определении компонент тензора импеданса является влияние помех, искажающих полезный сигнал. Для устранения помех традиционно используются различные способы статистической обработки. Однако, последние не всегда способны решить поставленную задачу, что приводит к «смещенным оценкам» в расчете параметров тензора импеданса. Одно из важных свойств «смещенных» оценок» заключается в том, что, их влияние на фазовые параметры существенно меньше, чем на амплитудные [1, 2, 4].

Между амплитудой и фазой импеданса существует взаимосвязь. Впервые данный вопрос был рассмотрен в 1960 г. [3]. Для горизонтально-слоистой модели амплитуда и фаза импеданса связаны интегральным соотношением [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.

Это выражение преобразуется в приближенную формулу вычислений:

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

где $T = 2\pi/\omega$.

В этих условиях возможно использование фазовой кривой для корректировки амплитудной кривой. Процедуру, которая позволяет корректировать кривые МТЗ на основе установленных взаимосвязей между амплитудой и фазой, называют «амплитудно-фазовой коррекцией» (АФК). Существование взаимосвязей между амплитудой и фазой в 2D и 3D моделях долгие годы остается одним из самых спорных вопросов в магнитотеллурическом методе. Современное состояние этого вопроса изложено в монографии М.Н. Бердичевского и В.И. Дмитриева [5].

В настоящей работе автор выполнил моделирование магнитотеллурического отклика сложно построенной двумерной геологической среды и на полученных материалах выполнил анализ взаимосвязи между амплитудой и фазой главных и дополнительных импедансов.

Расчеты компонент тензора импеданса для заданной двумерной теоретической модели земной коры (рис.1) выполнены в программе Rebook. В связи с тем, что для двумерных теоретических моделей дополнительные компоненты тензора импеданса в направлении поперек и вдоль структур равны нулю, для получения дополнительных компонент, выполним разворот тензора импеданса на угол $\alpha = 30°$.

Рассмотрим возможность использования технологии АФК с применением формулы (2), к амплитудам и фазам главных компонент тензора импеданса теоретической двумерной модели (кривые 1 на рис.2А, Б). Далее был выполнен пересчет амплитудных кривых в кривые фазы с использованием формулы (2) (кривые 2 на рис.2А). Визуальное сопоставление фазовых кривых, рассчитанных с использованием программы Rebook и кривых, пересчитанных из кривой амплитуды свидетельствует об их подобии: кривые пересекаются в точках перегиба; экстремальные значения совпадают.

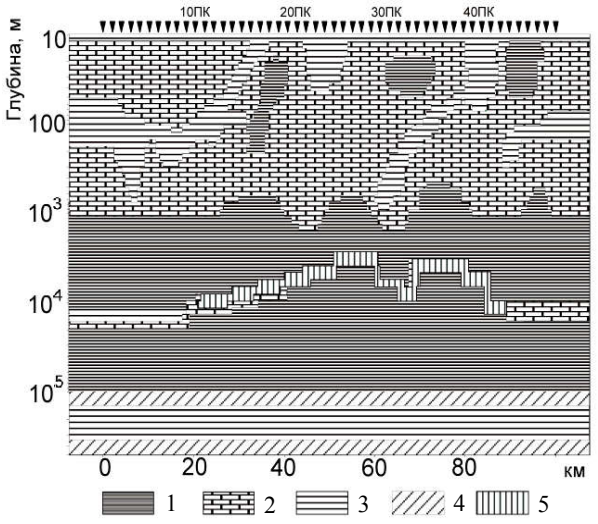


Рис.1. Двумерная теоретическая геоэлектрическая модель земной коры

Значения удельного электрического сопротивления: 1 – 1000 Ом·м; 2 – 100 Ом·м; 3 – 20 Ом·м; 4 – 5 Ом·м; 5 – 1 Ом·м

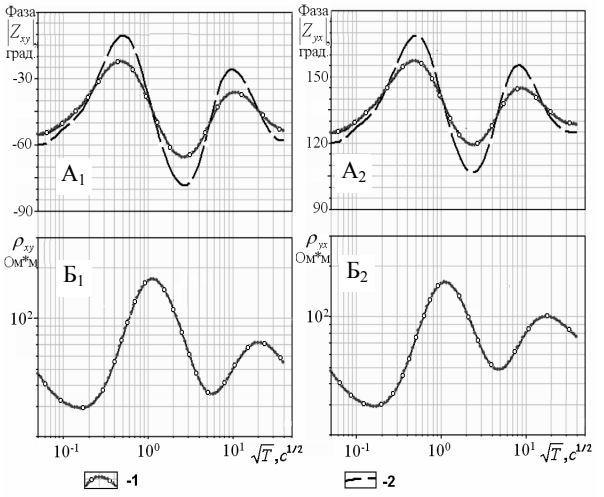


Рис.2. Теоретические кривые значений главных компонент (фазы и кажущегося сопротивления) тензора импеданса Z_{xy}(А$_1$, Б$_1$) и Z_{yx}(А$_2$, Б$_2$) для 2D модели земной коры, на пикете ПК-09

1 – значения фазы (А) и кажущегося сопротивления (Б) импеданса (результат решения прямой 2D задачи); 2 – значения фазы импеданса, рассчитанные по формуле (2)

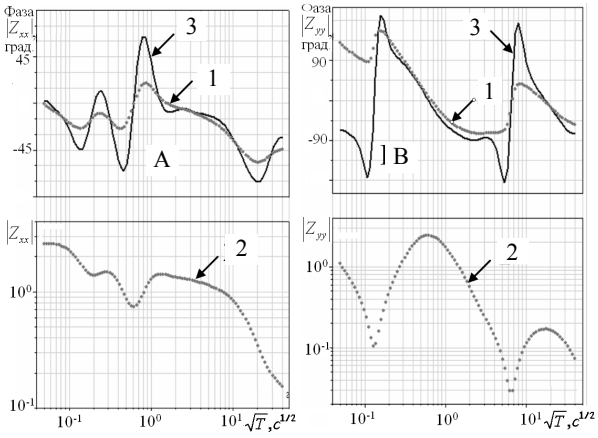


Рис.3. Теоретические кривые дополнительных компонент (фазы и модуля) тензора импеданса на пикете ПК-11(А), ПК-24(В)

1 – значения фазы (1) и модуля (2), рассчитанные по параметрам 2D модели земной коры на рис.2; 3 – значения фазы импеданса, рассчитанной по формуле (2)

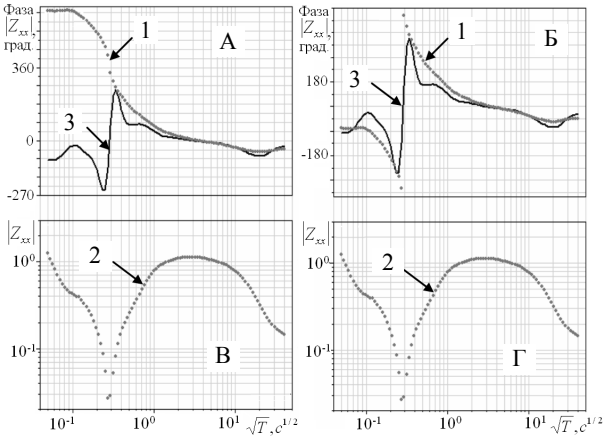


Рис. 4. Теоретические кривые значений дополнительных компонент тензора импеданса Zxx на пикете ПК-10

1, 2 – значения фазы (1) и модуля (2) импеданса, рассчитанные методом решения прямой задачи по параметрам 2D модели земной коры, представленной на рис.2; 3 – значения фазы импеданса, рассчитанной по формуле (2)

Таким образом алгоритм АФК, основанный на использовании формулы (2) может быть применим к кривым кажущегося сопротивления МТЗ, при корректировке зашумленных данных и в случае изучения квазидвумерных геоэлектрических сред.

При рассмотрении дополнительных импедансов мы наблюдаем различные соотношения между поведением графиков фаз рассчитанных по параметрам двумерной модели и фаз, рассчитанных по формуле (2). По результатам выполненных модельных построений выделяются примеры подобного поведения графиков фаз импеданса (рис.3А). Более сложные ситуации возникают, когда на графиках модуля выделяются отдельные глубокие минимумы, связанные с переходом значений реальной и (или) мнимой частей модуля импеданса через ноль. На соответствующих диапазонах фазовой кривой отмечаются резкие «скачки» кривых на 90° или 180° (рис.3В). Описанная закономерность может осложняться ситуацией, когда условие подобия кривых фаз импеданса выполняется только для части частотного диапазона; при этом для оставшейся части частотного диапазона условие подобия кривых выполняется, но с постепенным сдвигом фазы на 180°.

Встречаются ситуации, когда амплитудная кривая имеет «резкий» минимум (рис.4В), а фазовая кривая изменяется в широком диапазоне и имеет крутизну близкую к вертикальной (рис.4А, кривая 1). В этом случае отмечается радикальное несоответствие кривых фаз, рассчитанных двумя охарактеризованными выше способами (рис 4А, кривые 1 и 3). Если высокочастотную часть фазы сместить на – 720°, как показано на рис. 4Б (кривая 1), это позволит добиться более высокого уровня подобия кривых 1 и 3. Изменение значения фазы на угол кратный 360°, как известно, не меняет величины комплексного числа. При работе с полевыми данными можно использовать данный методический прием, для того, чтобы добиться амплитудно-фазового соответствия на определенном частотном диапазоне кривой дополнительного импеданса. Для сохранения точности расчета фазы сдвинутую часть фазовой кривой дополнительного импеданса после выполнения АФК необходимо вернуть в первоначальное положение.

Таким образом, в условиях наложения на изучаемый полезный сигнал интенсивных промышленных шумов, методика АФК, основанная на формуле (2), при дополнительном анализе, может быть применима к кривым МТЗ дополнительного импеданса при изучении квазидумерных сред.

Выводы

Расчеты тензора импеданса для 2D моделей указывают на закономерную связь между амплитудной и фазовой кривой, как для главных, так и для дополнительных компонент тензора импеданса. Это позволяет использовать методику АФК, при изучении не только горизонтально слоистых, но и двумерных сред, для коррекции формы амплитудной кривой на основе использования взаимосвязи амплитудной кривой с фазовой кривой.

Закономерности амплитудно-фазового соответствия между амплитудой и фазой дополнительного импеданса могут быть сложными и требуют дополнительного анализа. Несмотря на это, тип сложных соответствий ограничен, и может быть классифицирован.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

3. *Ваньян Л.Л.* Расчет фазовых кривых частотного зондирования способом трансформации / Л.Л.Ваньян, А.А.Кауфман, Е.И.Терехин // Прикладная геофизика. 1961. Вып.30. С.103-114.

4. Электроразведка: Справочник геофизика. В двух книгах / Под ред. В.К.Хмельницкого и В.М.Бондаренко. Книга первая.-2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 291с.

5. *Mark N.* Models and Methods of Magnetotellurics / N.Mark V.Berdichevsky, I.Dmitriev. Moscow: Scientific World, 2009. P.69-78.

REFERENCES

1. *Bezruk I.A.* Evaluation of the impedance reliability in the processing of magnetotelluric variations / I.A.Bezruk, V.O.Lahtionov // Applied Geophysics. Moscow: Nedra. 1977. V.89. P.80-87.

2. *Beliavsky V.V.* Technology of ore audimagnitotelluric sensing / V.V.Beliavsky, V.V.Sukhiy // Exploration and conservation of mineral resources. Moscow: Nedra, 2003. № 2. P.38-47.

3. *Vanyan L.L.* Calculation of frequency sounding method phase curves by transformation method / L.L.Vanyan, A.A.Kaufman, E.I.Terekhin // Applied Geophysics. 1961.V.30. P. 103-114.

4. Geoelectric prospecting. Geophysics guide. In two volumes / V.K.Khmelnitsky, V.M.Bondarenko. V.1, 2 ed., Revised and added. Moscow: Nedra, 1989. 291 p.

5. *Mark N. Berdichevsky.* Models and Methods of Magnetotellurics / N.Mark, V.Berdichevsky, I.Dmitriev. Moscow: Scientific World, 2009. P. 69-78.