

Технология интерпретации магнитотеллурических данных

И.С. Фельдман
ООО "ЕМГЕО", Москва
e-mail: mail@emgeo.com

Технология интерпретации магнитотеллурических-данных основывается на достаточно обширной идеологической основе и на программно-техническом обеспечении. Последнее базируется на созданном нами программном комплексе "MTDriver" для анализа и интерпретации МТ-данных, полученных по достаточно плотной сети наблюдений. Данные должны быть представлены компонентами тензора импеданса и других МТ-параметров, заданных дискретно в зарегистрированном частотном интервале с квазиравномерным шагом по логарифму частоты.

Входными данными для MTDriver являются результаты обработки полевых МТ-наблюдений и некоторые априорные данные. Выходные данные пакета – геоэлектрические модели. На пути от входа к выходу решается обратная задача, которая является некорректной как в силу ограниченной точности исходных данных и дискретности системы наблюдений, так и заведомо неадекватной ее постановки.

Работы МТЗ выполняются, как правило, в широком частотном диапазоне, охватывающем 4-5 порядков по частоте. Естественно, что и глубинность и радиус действия при этом также изменяются в широких пределах от сотни метров до сотен километров. Геологическая среда представляет собой достаточно сложный конгломерат неоднородностей. Характер этих неоднородностей может быть существенно различен в верхней, промежуточной и нижней части разреза. Характер неоднородностей также существенно меняется при переходе от ближних к дальним окрестностям.

Интерпретация объединяет ряд последовательных преобразований (трансформаций) исходных данных, завершающихся получением геоэлектрической модели. Каждая трансформация имеет настроечные параметры, зависящие как от собственных (внутренних) свойств исходных данных, так и от некоторой априорной информации или информации, вытекающей из совокупного анализа данных. Подбор оптимальных параметров - основная задача интерпретатора-пользователя.

Очевидно, такая интерпретация является по существу некорректной задачей. При ее решении реальная сложнопостроенная среда аппроксимируется некоторым ее квазидвумерным или квазиодномерным аналогом. Поскольку свойства среды изменяются по глубине, а закономерности МТ-поля – в частотной области, нам приходится иногда исходить из разных концепций при построении верхней (локальной) и нижней (региональной) частей разреза.

Ключевые слова: Магнитотеллурические зондирования, верхняя часть разреза, импеданс, интерпретация, модели.

Использование современной аппаратуры в методе магнитотеллурических зондирования (МТЗ) обеспечивает нам сегодня получение большого объема высокоточных данных в 3d области $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t$ (индекс t отражает частоту во временной области). Обработка полевых данных позволяет получать переходную характеристику среды в виде тензора $\mathbf{Z} = (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ второго ранга с комплексными коэффициентами. Это определяет некоторую специфику при анализе и интерпретации данных МТЗ.

Работы в комплексе начинаются с анализа данных. Блок анализа включает в себя многие из известных способов получения некоторых производных от исходных данных, позволяющих более наглядно и целенаправленно изучить и понять основные свойства тензорных и векторных величин в пространственно-частотной области их распределения.

Тензор \mathbf{Z} в некоторой области наблюдений отражает реакцию среды (распределение сопротивления $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$) на поле источника

(плоская волна), или $\mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) = \mathbf{U}(\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}))$, где \mathbf{U} - оператор прямой задачи. Как правило, нас интересует определенная (целевая) область среды, информация о которой содержится в тензоре \mathbf{Z} вместе с информацией о свойствах среды вне целевой области.

Основным фактором, препятствующим получению полезной информации, является крайне неоднородная верхняя часть разреза (ВЧР). Помеха за счет влияния ВЧР на много превышает полезный сигнал. Отношение помехи к сигналу для самых простых условий платформ и плит может достигать двух порядков. При развитии траппов, зоны вечной мерзлоты или близкого расположенного высокоомного экрана это соотношение может достигать 4-5 порядков.

Рассмотрены практические результаты влияния ВЧР на результаты МТЗ в разных регионах России. Во всех случаях наиболее интенсивные искажения порождаются локальными трехмерными неоднородностями с поперечником, меньше расстояния между

пунктами измерений. Изучение этих неоднородностей с точки зрения расчета каких-либо поправок за их влияние технологически невозможно. Придется многократно увеличивать объемы и, соответственно, стоимость работ. Но и это не будет гарантировать успех.

Решать обратную задачу по зашумленным данным «в лоб» нет никакого смысла, т.к. формальный подбор модели ВЧР в условиях неопределенности не позволит даже приблизиться к области параметров более глубоких (целевых) горизонтов. Это демонстрируется на примерах решения 2d обратных задач по теоретическим 2d моделям с неоднородной ВЧР. Результаты бимодальной инверсии ничего общего не имеют с исходной моделью, несмотря на погрешность сходимости порядка 1%.

Если бы мы имели дело с потенциальными полями, для которых выполняется принцип аддитивности, то в аналогичной ситуации мы использовали бы методы статистической обработки (пространственной фильтрации). Однако оператор связи между $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ и $\mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ такому условию не соответствует.

Представим импеданс, порожденный некоторой целевой областью разреза ($\bar{\mathbf{Z}}$), как действие оператора от этой целевой области разреза и усредненной области ВЧР ($\bar{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$).

$$\bar{\mathbf{Z}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) = \mathbf{U}(\bar{\rho}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})) \quad (1)$$

Тогда формально можно записать следующее приближенное выражение

$$\mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) \approx \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) (\bar{\mathbf{Z}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) + \Delta \mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)),$$

Или в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{xx} & \mathbf{Z}_{xy} \\ \mathbf{Z}_{yx} & \mathbf{Z}_{yy} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{xx} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{yy} \end{bmatrix} \mathbf{x}$$

$$\left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc} \bar{\mathbf{Z}}_{xx} & \bar{\mathbf{Z}}_{xy} \\ \bar{\mathbf{Z}}_{yx} & \bar{\mathbf{Z}}_{yy} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{cc} \Delta \mathbf{Z}_{xx} & \Delta \mathbf{Z}_{xy} \\ \Delta \mathbf{Z}_{yx} & \Delta \mathbf{Z}_{yy} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{cc} \mathbf{K}_{xx}(\bar{\mathbf{Z}}_{xx} + \Delta \mathbf{Z}_{xx}) & \mathbf{K}_{xx}(\bar{\mathbf{Z}}_{xy} + \Delta \mathbf{Z}_{xy}) \\ \mathbf{K}_{yy}(\bar{\mathbf{Z}}_{yx} + \Delta \mathbf{Z}_{yx}) & \mathbf{K}_{yy}(\bar{\mathbf{Z}}_{yy} + \Delta \mathbf{Z}_{yy}) \end{array} \right] \end{array} \right] =$$

\mathbf{K}_{xx} и \mathbf{K}_{yy} – действительные числа больше нуля. $\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ и $\Delta \mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ – функции, определяющие вклад в общий импеданс действия неоднородной части ВЧР и более глубокой и региональной областей геоэлектрической среды.

Логарифмируя модули каждой компоненты матрицы получим:

$$\mathbf{Lg} |\mathbf{Z}|(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) = \mathbf{Lg} \mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) + \mathbf{Lg} (|\bar{\mathbf{Z}}|(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t) + |\Delta \mathbf{Z}|(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)) \quad (2)$$

$\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ является мультипликативным членом, связанным с влиянием неоднородностей гальванической части МТ-поля (полем распределения зарядов). Именно за счет этого формируется т.н. эффект \mathbf{S} , действие которого распространяется в низкочастотную часть спектра импеданса, что и приводит к квазистатическим сдвигам кривых МТЗ. Действие этого эффекта максимально при наличии неоднородного распределения проводимости над высокоомным экраном.

$\Delta \mathbf{Z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega_t)$ в значительной мере определяется индукционной частью МТ-поля, т.е. неоднородной частью поля электрических токов. В трехмерной ситуации, характерной для ВЧР, индукционная часть поля невелика и значительно затухает с уменьшением частоты. Она достигает максимума на низких частотах за счет боковых влияний квазидвумерных структур. Если интересующие нас объекты располагаются на некоторой глубине под относительно высокоомным экраном, то для функции \mathbf{K} в точке наблюдений i можно записать некоторые приближенное соотношение:

$$\mathbf{K}_i \approx q \left(\frac{\mathbf{S}_{cp}(\mathbf{R})}{\mathbf{S}_i} \right)^{1/\alpha} \quad (3)$$

где $\mathbf{S}_{cp}(\mathbf{R})$ - усредненное в окрестности пункта i значение проводимости над экраном с некоторым эффективным радиусом \mathbf{R} , а \mathbf{S}_i - проводимость в пункте i .

Для двумерного случая для Н-поляризации при наличии экрана.

$$\mathbf{K} \approx p \left(\frac{\mathbf{T} \cdot \mathbf{S}_1}{\mathbf{S}_2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

где \mathbf{S}_1 и \mathbf{S}_2 – проводимости над экраном и под экраном, а \mathbf{T} – поперечное сопротивление экрана. Заметим, что все величины в формулах 1.3 и 1.4 зависят от свойств реальной геоэлектрической модели $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$, а \mathbf{K} является функцией координат \mathbf{x}, \mathbf{y} и частоты МТ-поля.

На рисунке 1 показаны (в условных размерностях) частотные свойства импеданса целевой области геоэлектрической среды и областей неоднородности ВЧР и подстилающего разреза



Рисунок 1. Обобщённые свойства импеданса в частотной области $Z=F(\omega_t)$ и в области пространственной частоты $SZ = F(\omega_R)$

Рассмотрим пространственные свойства импеданса. Для этого представим импеданс в виде спектрального разложения по пространственным гармоникам ω_R . Такое разложение мы можем получить для каждой частоты во временной области ω_t . Выберем ω_t в диапазоне максимума отклика импеданса от целевой области $\rho(x, y, h)$. Неоднородности в искомой области характеризуются определенными размерами (R), что формирует в спектральной области импеданса $SZ(\omega_R)$ максимум (рисунок 1).

Пространственный спектр квазистатических искажений ВЧР ($SK(\omega_R)$) имеет максимум в высокочастотной области ω_R . Что касается аддитивного члена помехи ΔZ , то $SAZ(\omega_R)$ должна иметь максимум как в высокочастотной области ω_R так и в низкочастотной, за счет влияния более глубоких и региональных особенностей геоэлектрической среды.

Представленные закономерности отражают в некотором обобщенном виде свойства реальных геоэлектрических моделей, полученных в различных регионах России, что в свою очередь, является следствием общих для Земли особенностей формирования геологической среды.

Изложенная выше концепция была реализована в комплексе интерпретации МТ-данных «MTDriver». Устранение квазистатических

искажений выполняется низкочастотной пространственной фильтрацией логарифмов модулей компонент Z для ω_t в диапазоне восходящей ветви от первого высокоомного экрана («нормализация» кривых МТЗ). Для нормализованных значений Z для устранения аддитивной помехи ΔZ выполняется низкочастотная матричная фильтрация в комплексной области.

В качестве иллюстрации эффективности предлагаемой технологии на рисунке 2 показаны результаты последовательного ослабления мультипликативной и аддитивной помехи для данных МТЗ на Северо-Пясинской площади. Следует обратить внимание, на то, что при относительно небольших радиусах нормализации (2, 2.7 км) и фильтрации (1, 1.7 км) для поверхностного ($h \approx 15$ м) и глубинного ($h \approx 1.5$ км) высокоомных экранов, расхождение между кривыми МТЗ уменьшилось в 50 раз (сравните рис. а, б и в). Для интерпретации были использованы развернутые кривые МТЗ в направлении квазипродольной поляризации. Для этих кривых решалась обратная 1d задача, и были построены геоэлектрические разрезы по всем профилям. По одному из профилей показано сравнение геоэлектрических и сейсмических границ. Представлены результаты интерпретации данных МТЗ с использованием данной технологии по многим регионам России, выполненные как по региональным профилям и геотраверсам, так и по отдельным участкам с задачами поисков нефти и газа.

Выводы

Результаты МТ-исследований, полученные с новой высокоразрешающей аппаратурой MTU по технологии SFMT, существенно изменяют наши представления о возможностях электромагнитных исследований, прежде всего в нефтегазопроисловых работах. Структурные построения МТ- исследований по точности приближаются к глубинным сейсмическим исследованиям. Однако в геоэлектрических моделях параметр сопротивления оказывается значительно более чувствительным к изменениям литолого-фациального состава и, что особенно важно, к степени катагенеза этих образований, которая контролирует образование нефти и газа.

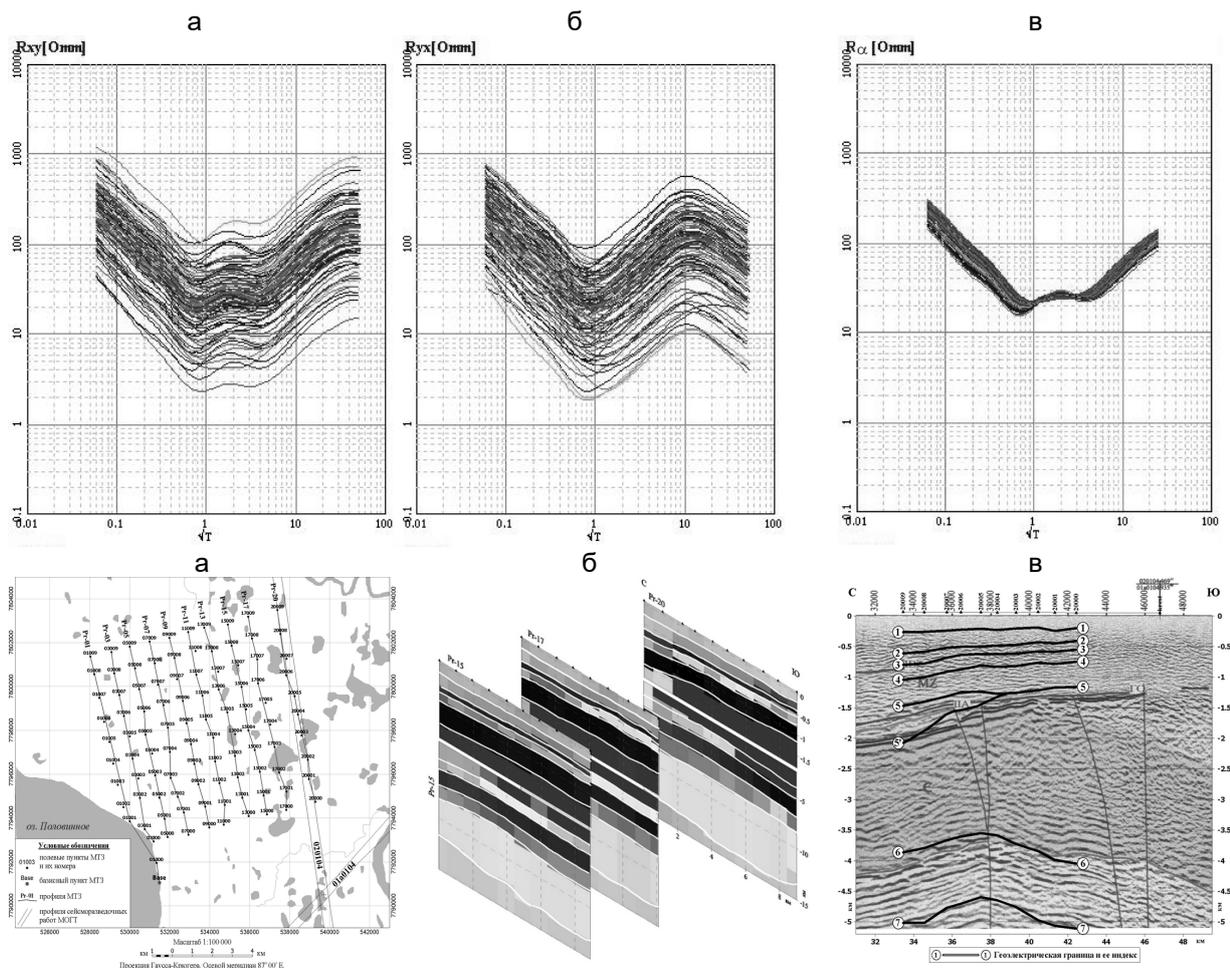


Рисунок 2. Результаты площадных работ МТЗ на Северо-Пясинской площади (Енисей-Хатангский прогиб)

а) и б) наблюдаемые кривые МТЗ ρ_{xy} и ρ_{yx} ; в) квазипродольные кривые после пространственных преобразований $R_{\text{нор}}=2\text{км}; 2.7\text{км}, R_{\text{фил}}=1\text{км}; 1.7\text{км}$; г) схема пунктов МТЗ; д) геоэлектрические разрезы по Пр 15, 17 и 20; е) сейсмический разрез по профилю МОГТ 020104 с вынесенными геоэлектрическими границами по Пр-20.