

УДК 550.372(575.2)(04)

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ПСЕВДОРЕЛЬЕФА
ПРИ КАЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ**

В.Ю. Баталев, Е.А. Баталева, Н.Р. Насырканов

При анализе данных магнитотеллурического зондирования методом псевдорельефов выделен участок корового проводника с повышенной проводимостью, расположенный под северной частью Чуйской впадины. Его характеристики использованы при решении 3D-прямой задачи и при построении стартовой модели 2D-инверсии.

Ключевые слова: глубинное строение; электропроводность; разломная зона; Тянь-Шань.

Среди методов, позволяющих получать информацию о глубинном строении Земли, особое место занимает магнитотеллурическое зондирование (МТЗ). В данном методе в качестве источника возбуждения электрического тока используются вариации естественного геомагнитного поля, что позволяет при малых затратах исследовать электрические свойства среды до глубин 300–400 километров. Основным результатом интерпретации данных магнитотеллурических зондирований является выявление пространственного распределения электропроводности глубинного вещества, которое, в свою очередь, отражает термодинамические условия в земной коре и верхней мантии, несет информацию о характере глубинных границ. На этапе качественной интерпретации магнитотеллурических данных обычно рассматриваются карты полярных диаграмм тензора импеданса, индукционных стрелок, параметров неоднородности и асимметрии среды. По результатам их анализа делается вывод о наличии неоднородностей в строении осадочного чехла и фундамента. Весьма наглядным методом для качественной интерпретации магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных является метод псевдорельефа, предложенный М.Н. Бердичевским и В.А. Кузнецовым, в основе которого лежит трехмерное обобщение геоэлектрических псевдоразрезов.

Совокупность поверхностей инвариантов МТ и МВ-функций отклика $INV_T(x,y)$, относительно поворота системы координат, построенных в широком диапазоне периодов, составляет псевдорельеф $INV(x,y)$ [1]. Прототип этого метода ранее приме-

нялся для анализа поведения свободных от статических смещений фаз тензора импеданса и параметров неоднородности среды, таких как $Skew$, N , A , η , изображаемых на нескольких периодах в виде карт, характеризующих степень отклонения реальной среды от двумерной [2–4]. Проблема влияния приповерхностных неоднородностей является одной из самых острых, возникающих при интерпретации МТ данных [5, 6]. В работе [1] рассмотрено поведение инвариантов тензора импеданса и матрицы Визе-Паркинсона над синтетической моделью, которая в слоях, имитирующих осадочный чехол, земную кору и верхнюю мантию, содержит двумерные призмы с аномальной относительно вмещающего слоя проводимостью. При построении псевдорельефов кажущегося сопротивления Ro_{brd} наглядно подтверждено, что компонента МТ-данных подвержена воздействию эффекта статического сдвига. В то же время, псевдорельефы матрицы Визе-Паркинсона, фазового тензора и фаз тензора импеданса не подвержены такому воздействию. Возникая на высоких частотах, влияние приповерхностных неоднородностей затухает с понижением частоты, уступая место эффектам от нижележащих слоев. Таким образом, магнитовариационные и фазовые оценки геоэлектрических параметров дают достоверную информацию о глубинном строении земной коры и верхней мантии и обеспечивают наглядное представление о форме и взаимном расположении основных геоэлектрических структур в разрезе.

Когда псевдорельефы строятся над трехмерной синтетической моделью с достаточно большим

количеством ячеек ($61 \times 61 \times 23$) формируются гладкие поверхности, с четким разделением аномальных объектов, расположенных на различных глубинных уровнях [1]. Естественно, что плотность данных по реальным профилям ниже «модельной» плотности данных, вследствие чего не может быть обеспечено гладкое отображение имеющихся в разрезе структур. Следует также помнить и о том, что экспериментальные данные всегда осложнены влиянием «геологического шума». Наглядность представления данных по методу псевдорельефа зависит от разрешающей способности функций отклика и интенсивности геологического шума. Геологический шум, как для синтетических, так и для реальных данных, сливаясь с сигналом, усложняет общую картину распределения инвариантов. Основной целью построения псевдорельефов является качественный анализ распределения электропроводности по площади и глубине для исследуемой территории. Интерпретация МТ-данных на качественном уровне достаточно сложный и трудоемкий процесс, поскольку оценивается поведение большого количества параметров. Однако это оправдано тем, что с помощью углубленного анализа МТ-данных можно построить интерпретационную модель, максимально полно отражающую структуру электропроводности среды и размерность ее составных элементов, что позволит получить более точное (количественное) решение обратной задачи. Необходимо отметить некоторое подобие подходов к рассмотрению псевдорельефов синтетических моделей и псевдорельефов территории Северного Тянь-Шаня, поскольку априори известна информация, как о структуре электропроводности синтетических моделей, так и о конфигурации и положении основных электропроводящих структур зоны сочленения Киргизского хребта и Чуйской впадины. В обоих случаях поведение рассматриваемых электромагнитных параметров на некоторых участках псевдорельефов может быть связано с действием известных аномальных объектов. Различия же заключаются в полноте имеющейся информации о структуре электропроводности: если для синтетических моделей она полная, то Северный Тянь-Шань охарактеризован лишь крупными региональными аномалиями электропроводности. Обнаружение на псевдорельефах Северного Тянь-Шаня особенностей, которые не связаны с уже известными аномальными телами, и получение дополнительной информации по морфологии и размерности выделенных ранее структур, необходимо для построения интерпретационных 2D и 3D-моделей и является целью настоящей работы.

Для построения псевдорельефов использовались данные со 143 пунктов МТЗ, полученные в Научной станции РАН на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) и объединенные в банк данных в виде модулей и фаз импедансов, реальных и мнимых частей векторов Визе. По всей совокупности исходных данных были определены:

- компоненты тензора импеданса $[Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$, вычислен импеданс Бердичевского $Z_{brd} = (Z_{xy} - Z_{yx})/2$, и построены псевдорельефы следующих инвариантов: кажущегося сопротивления $Ro_{brd} = |Z_{brd}|^2 / \omega \mu_0$ и фазы $Fi_{brd} = -\arctg(Z_{brd})$;
- матрицы Визе-Паркинсона $[W] = [W_{zx} \ W_{zy}]$, связывающие горизонтальные компоненты магнитного поля с его вертикальной компонентой, и построены псевдорельефы инварианта $\|W\| = \sqrt{|W_{zx}|^2 + |W_{zy}|^2}$;
- компоненты фазового тензора $[\Phi] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{bmatrix}$, и построены псевдорельефы кажущейся фазы $Fi_k = -\arctg \frac{\Phi_{xx} + \Phi_{yy}}{2}$.

В соответствии с определением инварианта $\|W\|$ матрицы Визе-Паркинсона на поверхности горизонтально-однородной Земли $\|W\|=0$, а проводящие структуры на псевдорельефе $\|W\|$ окаймлены краевыми максимумами. На рисунке 1 а показан псевдорельеф $\|W\|$ для территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП), построенный на шести уровнях в диапазоне периодов от 0,01 до 400 с. На верхнем уровне (для $T=0,01$ с) в целом наблюдается достаточно высокая изрезанность псевдорельефа, что свидетельствует о влиянии геологического шума, однако в северной и центральной частях псевдорельефа, соответствующих Чуйской впадине, выделяется относительное понижение $\|W\|$, а южная часть псевдорельефа, соответствующая Киргизскому хребту, характеризуется несколько повышенными значениями $\|W\|$. На периодах $T=0,1$ и $T=1$ с также присутствует геологический шум, однако хорошо видно, что Чуйская впадина окаймлена с юга (на Киргизском хребте) аномально высокими значениями $\|W\|$. При этом с севера в виде «гряды» выделяется граница предгорного прогиба, наиболее проводящей части Чуйской впадины. С понижением частоты ($T=10$ и 100 с) усиливается влияние протяженной глубинной границы между Чуйской впадиной и Киргизским хребтом, исчезают мелкие особенности и наблюдается, в основном, сглаженное окаймление Чуйской

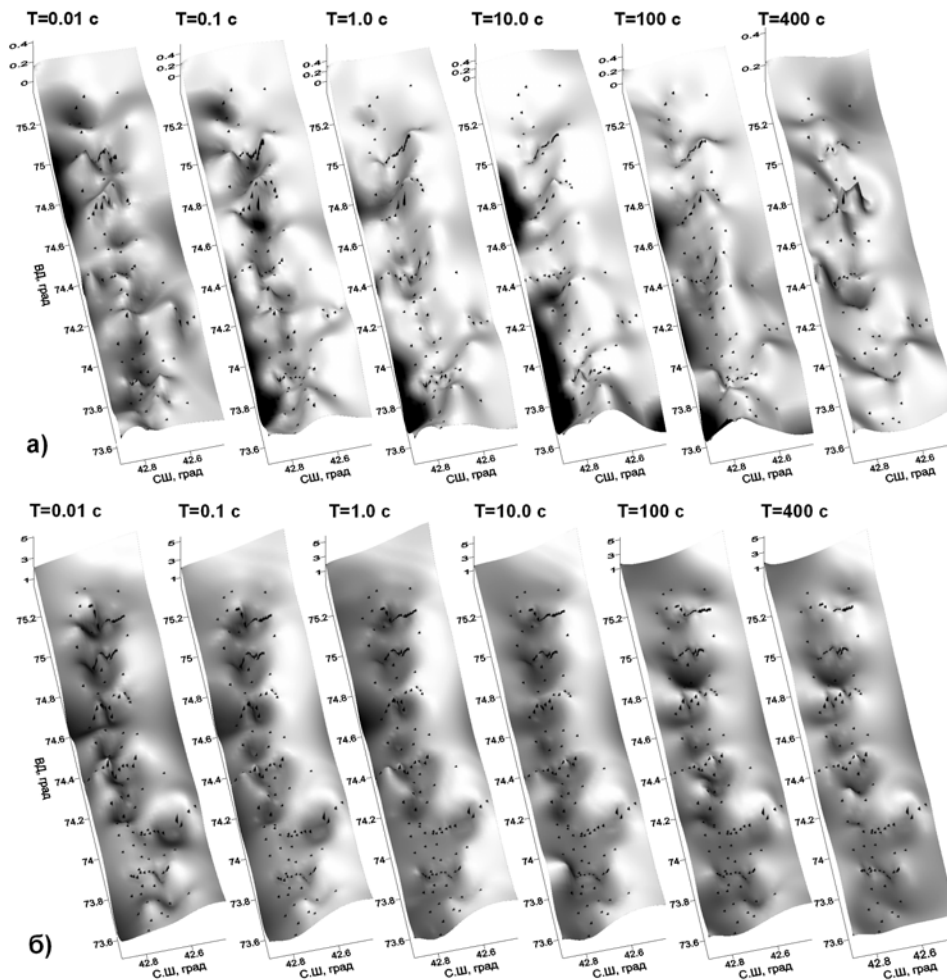


Рисунок 1 – Псевдорельефы: а – нормы матрицы Визе-Паркинсона $\|W\|$ (вертикальная ось безразмерная; б – Ro_{brd} (на вертикальной оси \log_2 , Ом,м), построенные для территории БГП. Треугольники – пункты МТЗ. Север слева, один градус по широте – 111 км, по долготе – 86 км

впадины с юга. Сеть наблюдений МТЗ не выходит на северный борт Чуйской впадины и краевой максимум $\|W\|$ с севера не наблюдается. На длинных периодах максимум, окаймляющий Чуйскую впадину с юга, сглаживается и расширяется, так как разрешающая способность матрицы Визе-Паркинсона падает с глубиной [1]. Здесь преобладают эффекты от нижнекорового проводящего слоя, который судя по поведению $\|W\|$, существенно не меняет своих характеристик в южной части Чуйской впадины и при переходе от впадины к Киргизскому хребту, что выражается в выравнивании псевдорельефа на нижнем уровне на периоде $T=400$ с и появлении на нем региональных особенностей, которые не наблюдались на высоких частотах.

Рассмотрим магнитотеллурические функции отклика в сопоставлении с магнитовариационными

функциями. На рисунке 1 б показан псевдорельеф кажущегося сопротивления Ro_{brd} , построенный на шести уровнях в диапазоне периодов от 0,01 до 400 с. На периоде $T=0,01$ с мы видим осложненный геологическим шумом геоэлектрический образ верхней части предгорного прогиба Чуйской впадины в виде вытянутой зоны пониженного сопротивления Ro_{brd} . Киргизский хребет характеризуется повышенными значениями сопротивления, так же как и повышенными значениями нормы матрицы Визе-Паркинсона. Псевдорельефы на периодах $T=0,1$ и $T=1$ с в несколько сглаженном виде копируют все особенности, наблюдаемые на периоде $T=0,01$ с. При дальнейшем увеличении периода от $T=10, 100$ с до 400 с также наблюдается унаследованность особенностей псевдорельефов. Таким образом, эффект статического сдвига кажу-

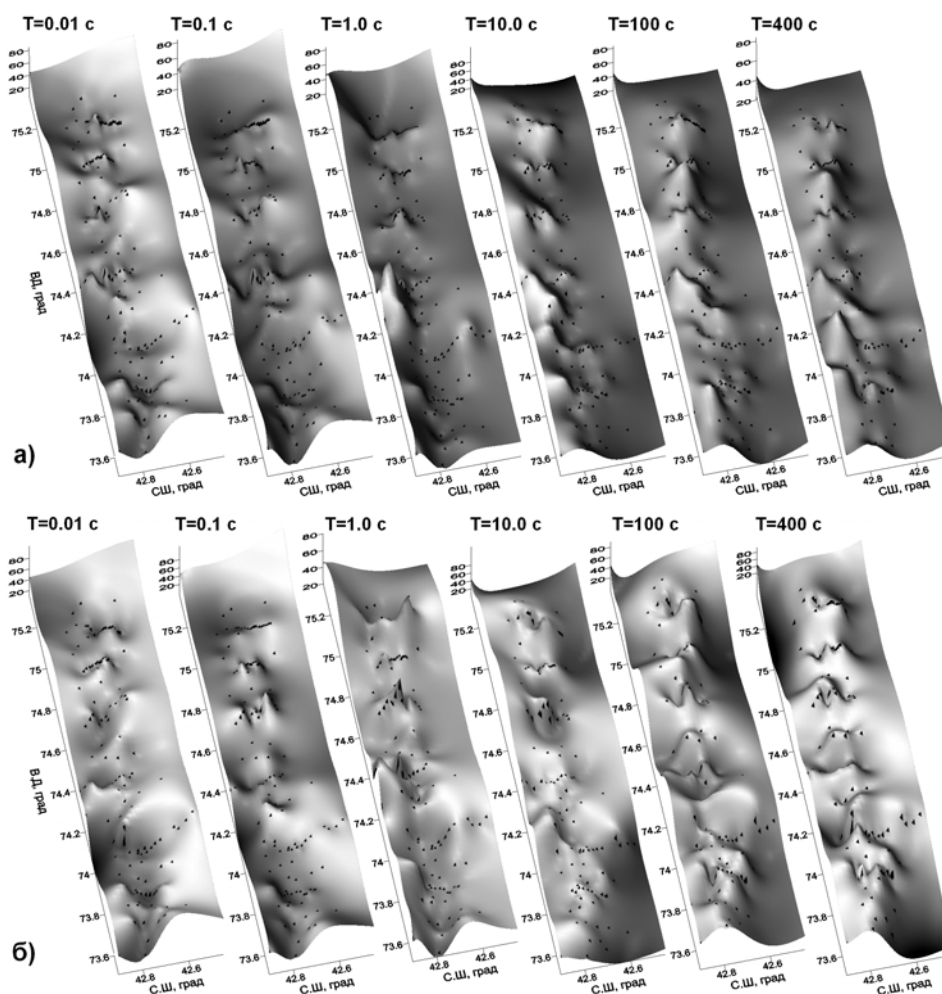


Рисунок 2 – Псевдорельефы: а – фазы $F_{i_{brd}}$; б – фазы F_{i_k} (вертикальная ось в градусах), построенные для территории БП. Треугольники – пункты МТЗ. Север слева, один градус по широте – 111 км, по долготе – 86 км

щегося сопротивления $R_{o_{brd}}$, созданный локальными приповерхностными неоднородностями верхнего уровня псевдорельефа, заполняет все уровни – от $T=0,1$ до 400 с. На таком фоне эффект от коровых аномалий не может быть определен.

Верхний уровень ($T=0,01$ с) псевдорельефа фазы $F_{i_{brd}}$ изображен на рисунке 2 а. Влияние геологического шума (изрезанность) в южной части псевдорельефа значительно меньше, чем в частях, соответствующих Чуйской впадине, а электропроводность самой верхней части разреза для Чуйской впадины меньше, чем в южной части, соответствующей Киргизскому хребту. С понижением частоты влияние высокоомного слоя довольно быстро затухает, уступая место эффекту от осадочного чехла Чуйской впадины, в целом характеризующегося суммарной продольной проводимостью около 300 См.

На периодах $T=10, 100$ и 400 с выделяется субширотная зона повышенных значений фазы $F_{i_{brd}}$, вероятно, соответствующая локальной зоне повышенной электропроводности корового проводящего слоя, расположенной под северной частью Чуйской впадины. Для периода 10 с это суперпозиция влияния осадочного чехла Чуйской впадины и верхов коровой аномалии. На $T=100$ и 400 с влияние осадочного чехла Чуйской впадины уже отсутствует.

Псевдорельеф кажущейся фазы F_{i_k} , определяемой по фазовому тензору $[\Phi]$, показан на рисунке 2 б. При сравнении псевдорельефов F_{i_k} и $F_{i_{brd}}$ видно, что для территории БП поведение фазы F_{i_k} очень сходно с поведением фазы $F_{i_{brd}}$, и она характеризуется таким же иммунитетом к влиянию

приповерхностных неоднородностей. В обоих псевдорельефах с увеличением периода влияние поверхностных структур ослабевает и заменяется влиянием более глубоких коровых структур.

Таким образом, по результатам анализа построенных для территории Северного Тянь-Шаня псевдоразрезов нормы матрицы Визе-Паркинсона и фаз $F_{i_{brd}}$ и F_{i_k} , для периодов $T=100$ и 400 с выделен расположенный под северной частью Чуйской впадины участок корового проводника с пониженным сопротивлением. Этот результат может быть использован как при построении стартовых моделей для дальнейших расчетов, так и для верификации уже имеющихся геоэлектрических моделей.

Выделение и трассирование структур для “синтетических” моделей с наложенным геологическим шумом производится без особых усилий, в то время как выделение и трассирование структур неправильной формы для реальных сред с неравномерной сетью наблюдений – непростая задача. Но она решается при совместном анализе данных матрицы Визе-Паркинсона с фазами $F_{i_{brd}}$ и F_{i_k} с учетом того, что отображение одной и той же аномалии на них будет разным по форме и площади. Например, проводящее тело на псевдорельефах матрицы Визе-Паркинсона будет выделяться по кайме (краевым максимумам), а на псевдорельефах фаз оно выделится непосредственно по высоким значениям над зоной проводника. Очевидно, что анализ псевдорельефов фаз $F_{i_{brd}}$ и F_{i_k} позволяет проконтролировать и дополнить результаты анализа псевдорельефа матрицы Визе-Паркинсона.

Метод псевдорельефа является удобным инструментом для представления трехмерной качественной модели реальной геоэлектрической среды. Основное достоинство метода состоит в том, что поверхности МТ и МВ инвариантов дают достаточно полное и наглядное представление о форме и вза-

имном расположении основных геоэлектрических структур в разрезе, о взаимодействии создаваемых ими эффектов, о характеристиках геоэлектрического шума. Первый опыт построения псевдорельефов для сложных условий Тянь-Шанского орогена показывает, что приоритетное использование фаз магнитотеллурического импеданса и матрицы Визе-Паркинсона предоставляет достаточно надежную основу для построения геоэлектрических моделей.

Представленные исследования осуществляются при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, госконтракт №02.740.11.0730 и частично при поддержке РФФИ, грант 10-05-00572-а и грант 11-05-12042-офи-м.

Литература

1. Бердичевский М.Н., Кузнецов В.А. Метод псевдорельефа – новый подход к анализу магнитовариационных и магнитотеллурических данных // Физика Земли. 2006. №8. С.66–77.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.
3. Рыбин А.К. Глубинные электромагнитные зондирования в Центральной части Киргизского Тянь-Шаня: Автореф. дис... канд. ф.-м. наук. М.: МГУ. 2001. 20 с.
4. Баталев В.Ю. Глубинное строение и геодинамика западной части Киргизского Тянь-Шаня по данным магнитотеллурических и магнитовариационных зондирований: Автореф. дис... канд. г.-м. наук. Новосибирск, 2002. 22 с.
5. Dmitriev V.I., Berdichevsky M.N. A generalized impedance model // Physics of the Solid Earth. 2005. Vol. 38. P. 897–903.
6. Simpson F. and Bahr K. Practical magnetotellurics. 2005. Cambridge University Press. 246 с.