

УДК 553.078.2

ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РАЙОНА ОЧАГА ОЛЮТОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Логинов В.А.^{1,2}

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

²*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

Научный руководитель: д.г.-м.н. Ю.Ф. Мороз

Рассмотрена методика интерпретации магнитотеллурического зондирования. Показано, что в первом приближении геологическая среда может быть аппроксимирована двумерно-неоднородной моделью. На основании этого, выполнена бимодальная инверсия кривых МТЗ с помощью программы двумерного численного моделирования МТ поля (REBOCC). В результате инверсии получен геоэлектрический разрез, характеризующий структуру электропроводности земной коры и верхней мантии до глубины 100 км.

Ключевые слова: Олюторское землетрясение, магнитотеллурическое зондирование, тензор импеданса, геоэлектрический разрез.

ВВЕДЕНИЕ

В методе МТЗ для получения информации об электропроводности геологической среды используется передаточная функция между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности, которая получила название тензора импеданса. Анализ этого параметра даёт возможность оценить характер геоэлектрической неоднородности среды, и определить метод интерпретации магнитотеллурического зондирования, применимый к изучаемому району. Важной задачей методики является оценка геоэлектрической неоднородности среды, которая может быть одномерной, двумерной и трехмерной. Это дает возможность определить кривые МТЗ, которые в лучшей мере отражают структуру глубинной электропроводности и могут быть использованы для инверсии.

Большой интерес в изучении глубинной электропроводности, представляет район Олюторского землетрясения, где в последние годы пред-

приятиями «Камчатгеология» и «Геон» выполнены МТЗ. Этот район ранее изучен магнитотеллурическими исследованиями [2, 8], которые дают представление о структуре электропроводности литосферы. Однако в представленных разрезах слабо отражена информация о глубинных разломах. Это связано с тем, что интерпретация выполнена только по кривым МТЗ, ориентированным по простиранию геологических структур. В настоящей статье предпринята попытка получения геоэлектрического разреза литосферы по кривым МТЗ ориентированных как вдоль, так и поперек простирания структур. Можно полагать, что данный подход даст более полную информацию о глубинном строении исследуемого района.

Целью данной работы является определение методики интерпретации МТЗ и получение геоэлектрического разреза литосферы в районе очага Олюторского землетрясения.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Геологическая строение района изучено в работах [1, 6, 8, 4, 12]. Очаг Олюторского землетрясения располагается в области сочленения Олюторской и Корякской складчатых зон, которые разделены глубинным разломом.

Корякская зона сложена меловыми, палеогеновыми и неогеновыми образованиями. Здесь выделяются синклинии и антиклинории, которые осложнены разломами расчленяющие складчатые структуры на ряд узких протяженных блоков.

Олюторская складчатая зона имеет более сложное геологическое строение. В её основании залегает меловой складчатый комплекс, который выступает в поднятии Олюторского полуострова и в ядре Пылгинского антиклинория. На складчатом основании несогласно залегают вулканогенно-кремнистые и терригенные породы палеогена, перекрытые комплексом пород, представленных морскими молассовыми формациями

среднего и позднего миоцена. Верхний структурный ярус сложен грубо-обломочными морскими, континентальными и вулканогенными породами верхнего миоцена и четвертичного периода. Складчатые структуры Олюторской и Корякской зоны представляют собой сопряжённые антиклинории и синклинории, которые простираются в северо-восточном направлении на расстояние в первые сотни километров, а в поперечнике ширина их составляет первые десятки километров.

Данные комплексного анализа магнитотеллурического зондирования, магнитометрии, гравиметрии и других геолого-геофизических данных, дают представление о глубинном строении региона [8]. Глубинный разлом С-В простирания, разделяющий Корякскую и Олюторскую складчатые зоны, выражается в магнитном поле в виде интенсивных, положительных и отрицательных линейных аномалий. Он в гравитационном поле выделяется зонами высоких градиентов или интенсивными вытянутыми аномалиями. Наряду с разломами северо-восточного простирания выделяется ряд поперечных северо-западных разломов. Они отличаются меньшими размерами и слабее выражены в геофизических полях. Широко развитая сеть разломов определяет складчато-блоковое строение региона и играет большую роль в его сейсмичности и металлогении.

По данным МТЗ, ВЭЗ верхняя часть разреза, сложенная четвертичными и современными образованиями мощностью до 1000 м, имеет удельное электрическое сопротивление в первые сотни Ом·м и более. Ниже залегает кайнозойская толща мощностью от первых сотен метров до первых километров со средним продольным электрическим сопротивлением от первых сотен до первых десятков Ом·м. Осадочно-вулканогенная кайнозойская толща подстилается верхнемеловым комплексом пород с удельным электрическим сопротивлением 500 - 1000 Ом·м и более. По данным МТЗ литосфера содержит слой повышенной электропроводности на глубинах в первые десятки километров с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. В районе крупных глубинных раз-

ломов, проникающих в земную кору, проводящие зоны проявляются на глубинах 8 -10 км [8]. В работе [2] получена геоэлектрическая модель, в которой выделены проводники. Под Олюторской зоной, выделен проводник с удельным электрическим сопротивлением 100 Ом·м на глубине 20-30 км.

В области сочленения Олюторской и Корякской складчатых зон в апреле 2006 года произошло сильнейшее Олюторское землетрясение с магнитудой $M=7.6$, эпицентр которого определен по данным [5, 12, 15, 16] (рис. 1). Землетрясение сопровождалось мощной серией афтершоков, по которым определен контур очага, размеры которого 205 на 75 км [6]. В пределах очага выявлены сейсмотектонические разрывы [10, 11].

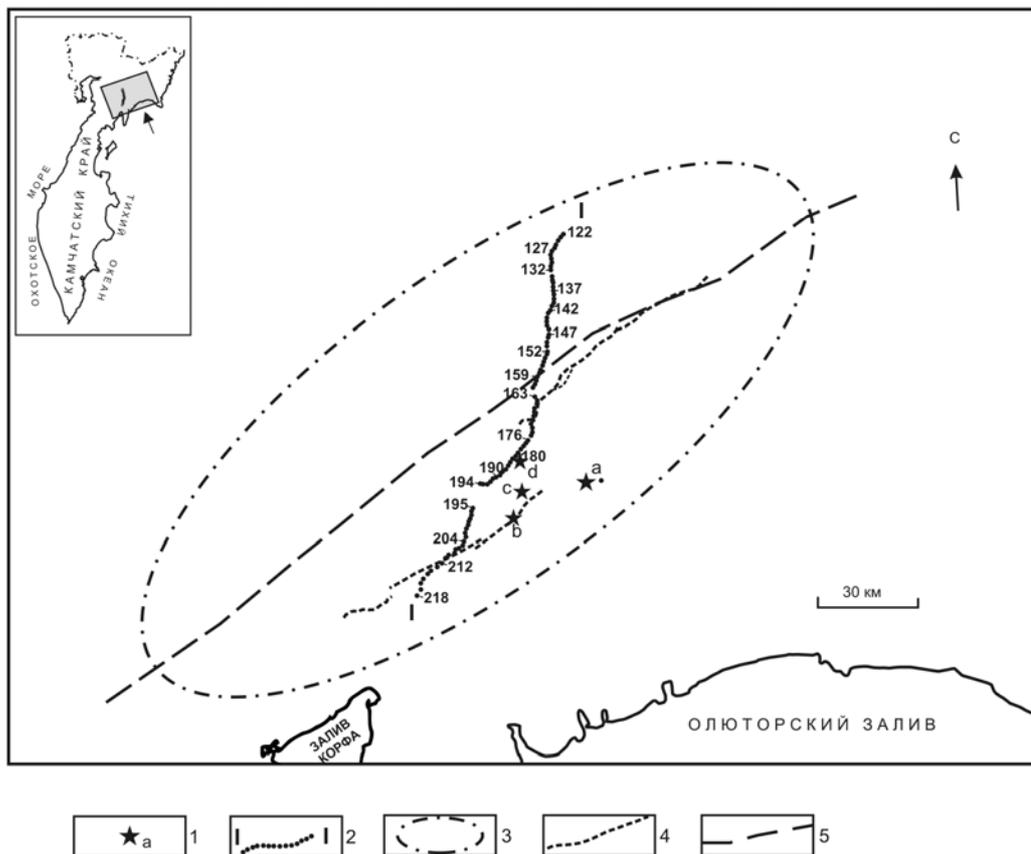


Рис. 1. Схема расположения профиля электромагнитного зондирования. Условные обозначения: 1- эпицентр Олюторского землетрясения по данным: а – КФГС РАН [5], b – СМТ [15], c - USGS [16], d – СБ ГС РАН [12]; 2 – профиль МТЗ I-I; 3 – контур очага Олюторского землетрясения [6]; 4 - сейсмотектонические разрывы [10, 11]; 5 – глубинный разлом в области сочленения Корякской и Олюторской складчатых зон [8]. На врезке показана исследуемая площадь с профилем МТЗ.

МЕТОДИКА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

в каждом пункте измерений. Электроразведочные работы выполнялись аппаратурой канадской компании «Phoenix Geophysics Ltd». Регистрировались четыре компоненты электромагнитного поля в диапазоне периодов 0,0025-1000 с. Электрические линии длиной 80 м выкладывались по азимутам 0 и 90 град. Шаг между пунктами измерений составлял 2-5 км. Обработка полученных материалов выполнена с помощью специального пакета программ. В результате обработки получены тензоры импеданса в каждом пункте измерений.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МТ ДАННЫХ

В методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для получения информации об электропроводности геологической среды используется связь (1.1)

$$\mathbf{E}_{\text{гор.}} = [\mathbf{Z}] \mathbf{H}_{\text{гор.}} \quad (1.1)$$

между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности, которая получила название тензора импеданса (1.2).

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Компоненты тензора импеданса Z_{xy} , Z_{yx} являются основными, а компоненты Z_{xx} , Z_{yy} - дополнительными. В однородной горизонтально-слоистой (1D) среде, дополнительные компоненты тензора импеданса значительно меньше основных и равны нулю, а основные компоненты равны между собой. Так как в реальности геологическая среда имеет более сложный характер, компоненты тензора импеданса зависят от нее. В двумерной (2D) среде в случае, когда одна ось направлена вдоль однородности структуры, а другая вкрест нее, компоненты тензора импеданса имеют

следующий вид: $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$; $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$. Для трехмерных (3D) случаев, электропроводность меняется по всем трем направлениям (x, y, z): $Z_{xx} \neq Z_{yy} \neq 0$; $Z_{xy} \neq Z_{yx}$. Анализ тензора импеданса даёт возможность оценить характер геоэлектрической неоднородности среды. Он выполняется графическим и аналитическим путем. В первом случае рассматриваются полярные диаграммы основных и дополнительных импедансов [3].

Из соотношения (1.3) рассчитываются диаграммы импедансов путём поворота исходной системы координат на угол α .

$$E_x = Z_{xx} \cdot H_x + Z_{xy} \cdot H_y \quad (1.3)$$

$$E_y = Z_{yx} \cdot H_x + Z_{yy} \cdot H_y$$

Этот расчёт осуществляется в интервале $0 - 360^\circ$. Рассмотрим на рис. 2 классический вид полярных диаграмм. Они дают возможность определить характер геоэлектрической неоднородности среды, которая может быть одномерной, двумерной и трехмерной.

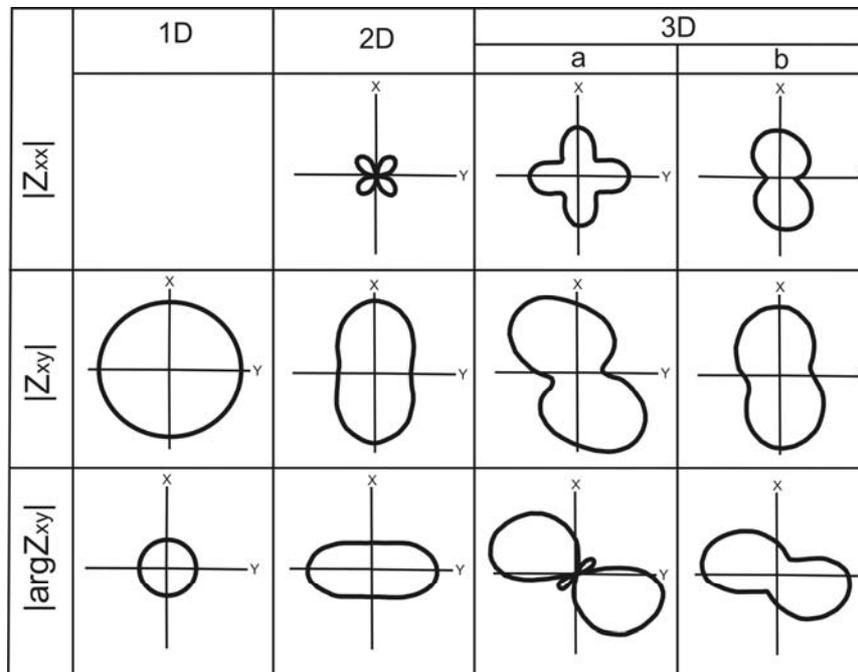


Рис.2. Классический вид полярных диаграмм основного и дополнительного импедансов [3].

В одномерной среде основной импеданс и фаза имеют вид окружности, а дополнительный импеданс равен нулю. В двумерной среде основ-

ной импеданс и фаза принимает форму овала со сжатием, а дополнительный импеданс имеет вид четырех лепестковой розы. В трехмерной среде диаграммы принимают более сложный вид.

Оценка геоэлектрической неоднородности производится также с помощью следующих выражений:

$$N = \left| \sqrt{1 - 4 \frac{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}{(Z_{xy} - Z_{yx})^2}} \right| \quad (1.4)$$

$$skews = \left| \frac{Z_{xx} + Z_{yy}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right| \quad (1.5)$$

Параметр N (1.4) дает представление о неоднородности геоэлектрической среды [14], а параметр асимметрии Skews (1.5) позволяет оценить двумерность геоэлектрической среды [18]. С помощью этих подходов выполнен анализ геоэлектрических неоднородностей в геологической среде очага Олюторского землетрясения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МТ ДАННЫХ

Экспериментальные данные МТЗ получены по профилю I-I (рис. 1). Для анализа геоэлектрических неоднородностей построены полярные диаграммы импедансов на различных периодах. На рис. 3 в качестве примера приведены полярные диаграммы импедансов на периодах 0.01 и 100 с. Импеданс на этих периодах характеризует электропроводность приповерхностных и более глубинных частей геоэлектрического разреза.

Диаграммы свидетельствуют, что на малых периодах геоэлектрическая среда является близкой к однородной, так как диаграммы основного импеданса имеют слабое сжатие, а значения дополнительного импеданса близка к нулю.

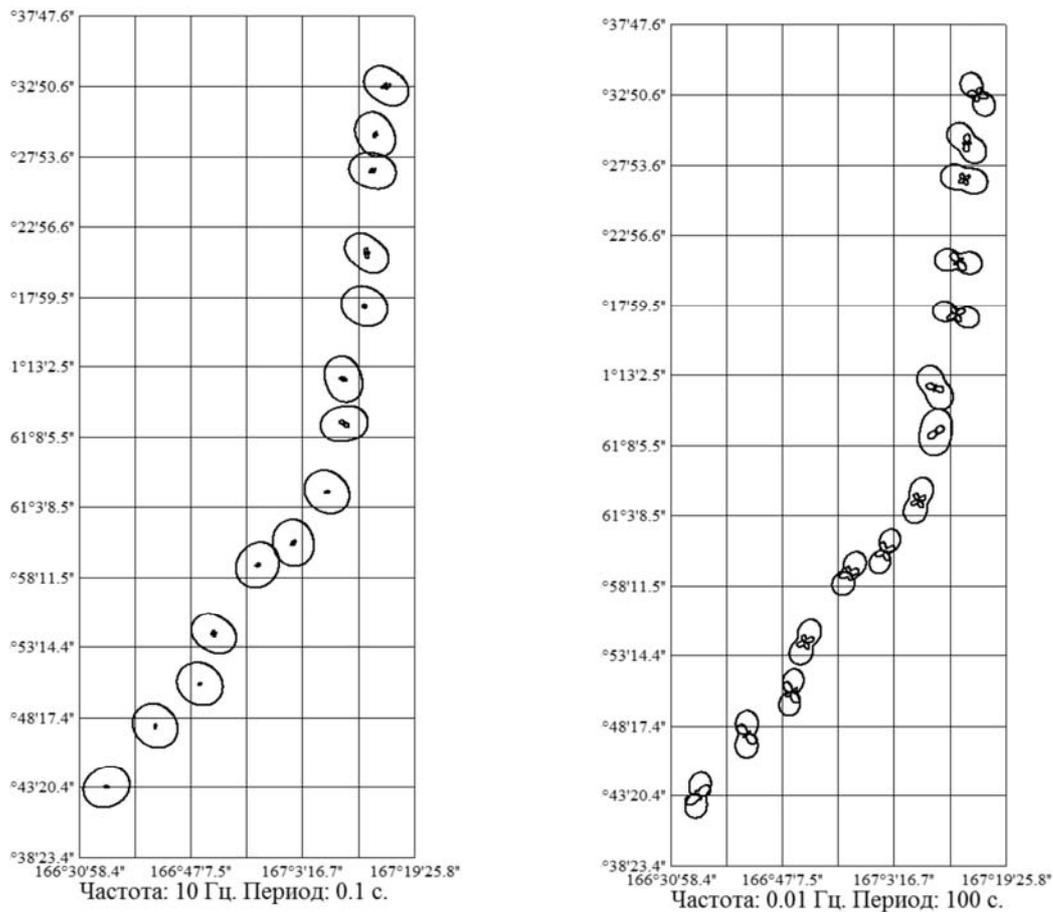


Рис. 3. Полярные диаграммы импеданса по профилю I-I на периоде 0.1 и 100 с.

С увеличением периода сжатие основного импеданса возрастает, а отношение основного и дополнительного импедансов остается небольшим, что даёт возможность рассматривать геоэлектрическую среду в виде двумерно-неоднородной модели. Поэтому, для интерпретации выбраны главные направления, отвечающие простиранию и вкрест простирания основных тектонических элементов. По ним построены продольные и поперечные кривые МТЗ, которые характеризуют изменение электропроводности с глубиной.

Для примера на рис. 4 приведены продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и их фазы на пунктах МТЗ № 163 – 170. Расхождение кривых кажущегося сопротивления по вертикальной оси в отличие от фазовых кривых свидетельствует о влиянии приповерхностных

геоэлектрических неоднородностей (ρ -эффект), которые необходимо погасить при изучении глубинной электропроводности.

МТЗ 163-170

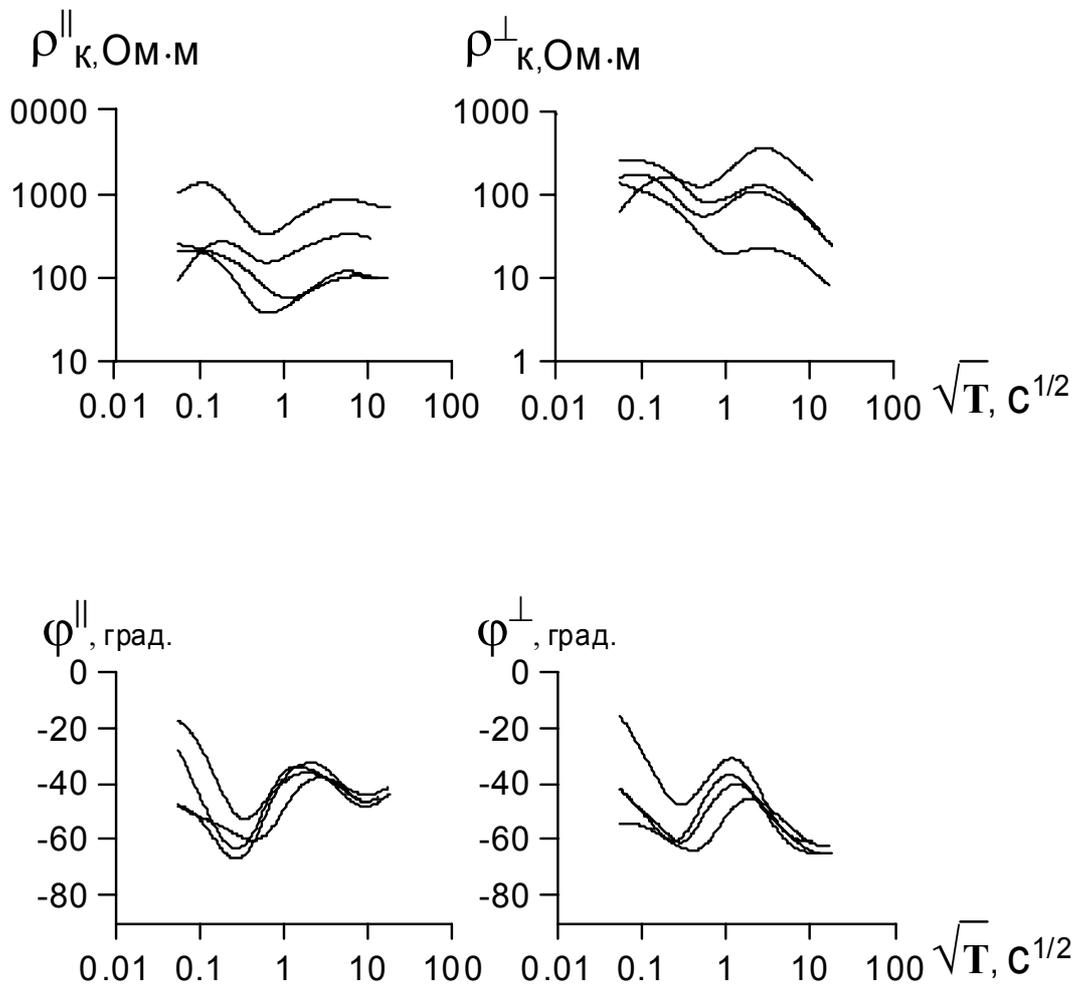


Рис. 4. Примеры продольных и поперечных кривых МТЗ на профиле I-I.

Оценка геоэлектрической неоднородности среды выполняется также по пространственно-частотным разрезам параметра неоднородности N и асимметрии $Skews$. На рис. 5 видно, что на большей части разреза, значения N не превышают 0.5, но есть участки с резко выраженной неоднородностью с $N > 0.6$.

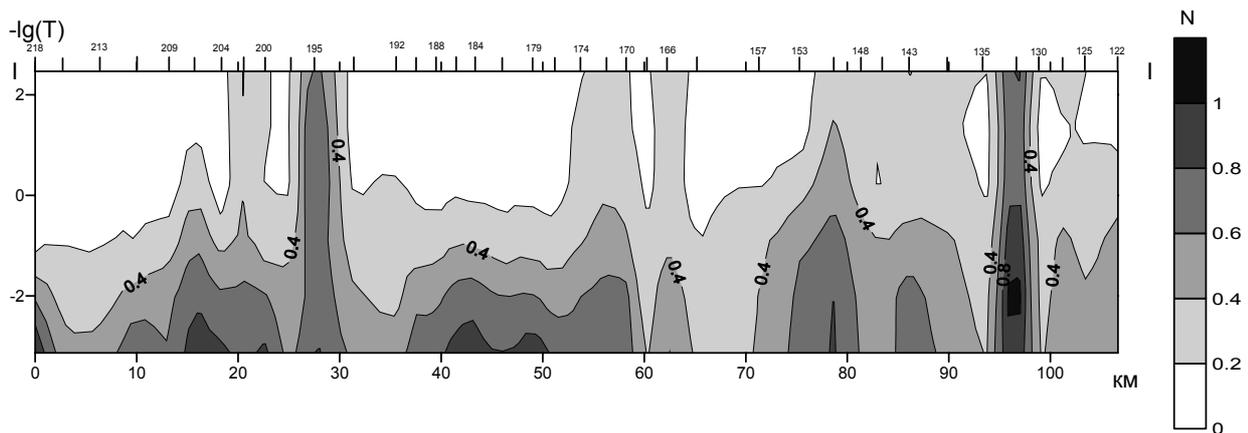


Рис. 5. Пространственно-временной разрез параметра неоднородности.

На рис. 6 показан пространственно-частотный разрез параметра Skews, значения которого на большей части разреза не превышают 0.35. Только на отдельных пунктах МТЗ данный параметр становится близкий к единицы.

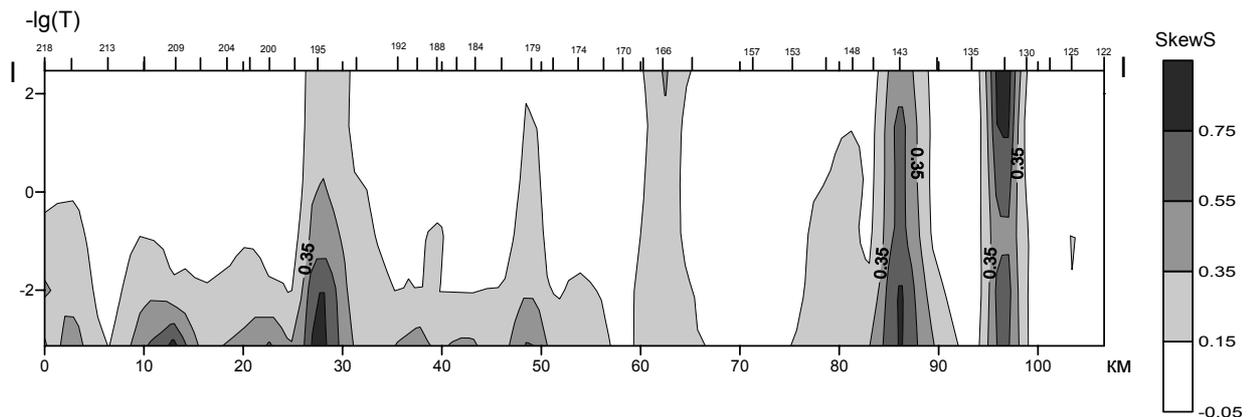


Рис. 6. Пространственно-временной разрез параметра асимметрии.

Выполненный анализ свидетельствует, что в первом приближении геоэлектрическая среда, может быть, аппроксимировать двумерно-неоднородной моделью. Это дает нам право решения обратной задачи с помощью двумерного численного моделирования. Для этого использована программа REBOCC [17]. Она имеет возможность выполнять совместную инверсию продольных и поперечных кривых. Бимодальная инверсия кривых позволяет выявить основные особенности геоэлектрической среды, такие как субвертикальные проводящие зоны. В программе предусмотрена процедура подавление р-эффекта.

В результате численного двумерного моделирования МТ данных по профилю I-I (пп. 218-122) получен разрез, характеризующий геоэлектрическую среду района до глубины 100 км (рис. 7).

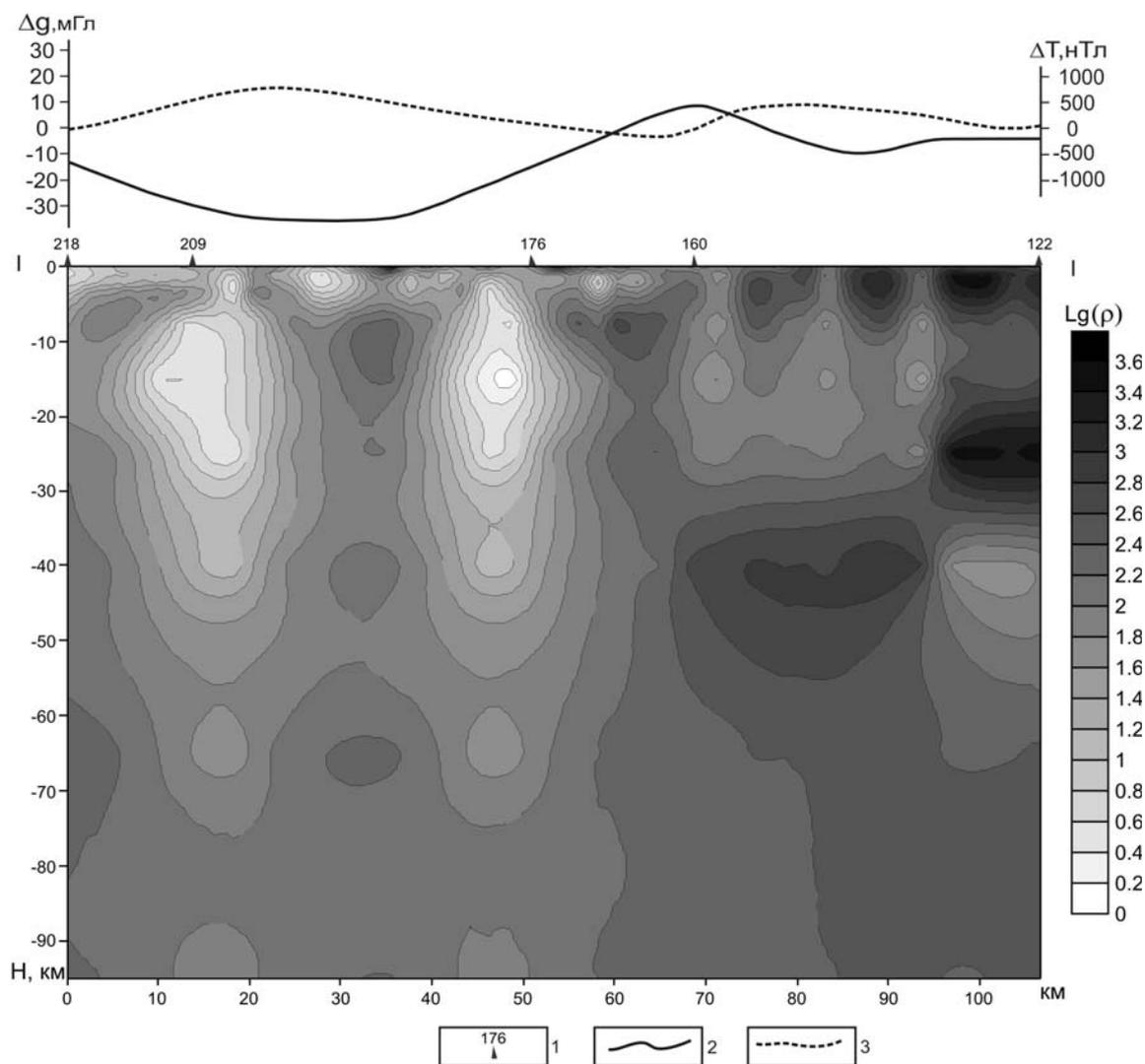


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю I-I.

Условные обозначения: 1 – примерные пункты МТЗ; 2 – график гравитационного поля; 3 – график магнитного поля.

Приповерхностные (первые километры) низкоомные аномалии (пункты 218-160) отражают осадочно-вулканогенный чехол Вывенского прогиба. Он характеризуется положительной аномалией магнитного поля, которая может быть связана с наличием магматических пород основного состава. В районах МТЗ 209 и 176 выделяются субвертикальные проводящие зоны от приповерхностных частей земной коры до глубин в первые десятки км., которые могут быть обусловлены глубинными разломами.

Повышенная проводимость разломов может быть связана с наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов. Гравитационное поле характеризуется пониженной интенсивностью, что свидетельствует о возможном разуплотнении литосферы. В зоне глубинного разлома (МТЗ № 160) верхняя часть земной коры имеет повышенное электрическое сопротивление, которое может быть обусловлено насыщенностью разреза магматическими породами. Это находит отражение в виде аномалий повышенной интенсивности гравитационного и минимума магнитного полей.

ВЫВОДЫ

По данным анализа тензора импеданса установлено, что геоэлектрическая среда в первом приближении может быть аппроксимирована двумерно-неоднородной моделью. Выполнено численное двумерное моделирование МТ данных на профиле I-I и получен геоэлектрический разрез, характеризующий электропроводность среды до глубины 100 км. Выделены субвертикальные проводящие зоны, связанные с глубинными разломами. Повышенная проводимость разломов может быть обусловлена наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апрельков С. Е. Попруженко С.В. Пенжинско-Западно-Камчатская складчатая зона и Укэляят-Срединный блок в структуре Корякского нагорья и Камчатки // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. №4. С. 90-104.
2. Белявский В.В., Золотов Е.Е., Ракитов В.А., Нурмухамедов А.Г., Попруженко С.В., Шпак И.П., Храпов А.В. Глубинная сейсмогеоэлектрическая модель Охотско-Чукотского вулканогенного пояса и Центрально-Корякской складчатой зоны в пределах профиля Корф – Верхнее Пенжино // Олюторское землетрясение 20 (21) апреля 2006 г. Корякское нагорье. Первые результаты исследований. - Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. - С. 277-288.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Научный мир. 2009. С. 677.
4. Геология СССР. 30, ч. 1. М.: Недра, 1970.

5. Каталог землетрясений Камчатки и командорских островов 1962-2006 КФ ГС РАН. <http://emsd.iks.ru>.
6. Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И. Сейсмическая история Корякского нагорья и афтершоковый процесс Олюторского землетрясения 20(21) апреля 2006 г. $M_W = 7.6$ // Вулканология и сейсмология Корякского Нагорья. 2010. № 2. С. 16–30.
7. Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дрознин Д.В. и др. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М. Наука, 1994. С. 103-122.
8. Мороз Ю.Ф. Глубинное строение юго-западной части Корякского нагорья // Советская геология. 1987. № 5. С. 118–123.
9. Некрасов Г.Е. //Геотектоника. 2003. № 6. С. 53-79.
10. Пинегина Т.К. Сейсмические деформации в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения // Олюторское землетрясение (20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. С. 126-169.
11. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В. и др. Олюторское землетрясение в Коряки 20(21) апреля 2006 г.: результаты геологического и макросейсмического изучения эпицентральной области // Олюторское землетрясение (20(21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. С. 170-206.
12. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2006 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: ГС РАН. ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_Catalog.
13. Чехович В.Д., Сухов А.Н., Кононов М.В., Паланджян С.А. 2009. Геодинамика северо-западного сектора Тихоокеанского подвижного пояса в поздне меловое–раннепалеогеновое время // Геотектоника. №4. С.37-62.
14. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. J. Geophysics. 1988. № 62. P. 119-127.
15. Harvard CMT catalog. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
16. National Earthquake Information Centre, US Geological Survey, Earthquake data base <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic.html>.
17. Siripunvaraporn W., Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magneto telluric data // Geophysics. V. 65. № 3. 2000. P. 791–803.
18. Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, M/T. Cambridge. 1967.

GEOELECTRIC MEDIUM CHARACTERISTIC OF OLYUTORSKIY
EARTHQUAKE FOCUSES AREA BY USING MT DATA

Loginov V.A.^{1,2}

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

²*Vitus Bering Kamchatka State University*

Considered the method interpretation of magnetotelluric data. It is shown that in a first approximation, geological medium can be approximated by two-dimensional of an inhomogeneous model. Based on this, made the bimodal inversion of magnetotelluric sounding in the program REBOCC. As a result of obtained by of geoelectric section characterizing the electrical conductivity of structure of the crust and upper mantle down to a depth 100 km.

Key words: Olyutorskiy earthquake, magnetotelluric sounding, impedance tensor, geoelectric section.