

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

*Ахметова Я.А. (5 курс)*

*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

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

Рассмотрены данные магнитотеллурических зондирований, полученных в последние годы на юго-восточном побережье Камчатки. Длина профиля 170 км. Шаг наблюдений составил в среднем около 1,5 км, магнитотеллурическое поле регистрировалось в диапазоне от 0,001 до 10 000 с. Методика интерпретации МТЗ определена в результате анализа возможных искажений кривых кажущегося сопротивления за счёт влияния локальных и региональных геоэлектрических неоднородностей. Показано, что амплитудные кривые МТЗ в значительной мере подвержены влиянию локальных геоэлектрических неоднородностей. Для погашения этого влияния использована методика конформного осреднения. Региональный (береговой) эффект изучен с помощью численного трехмерного моделирования. На основе выполненного анализа определена методика интерпретации МТЗ. В качестве основных приняты кривые МТЗ, ориентированные вдоль Камчатки. По данным формальной интерпретации этих кривых получена предварительная глубинная геоэлектрическая модель. В земной коре и верхней мантии выявлены проводящие зоны. Рассмотрена возможная природа выявленных зон. Полученную предварительную геоэлектрическую модель необходимо уточнить с помощью двумерного и трёхмерного моделирования магнитотеллурического поля.

*Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, кажущееся сопротивление, геоэлектрические неоднородности, береговой эффект, геоэлектрический разрез.*

### **Введение**

П-ов Камчатка характеризуется высокой сейсмичностью, современным вулканизмом и гидротермальной активностью. Представление о глубинной электропроводности вулканических зон Камчатки получено по данным большого объёма магнитотеллурических зондирований (МТЗ), выполненных в предшествующие годы [5-8]. К сожалению, ряд районов Камчатки не изучен магнитотеллурическими методами. Одним из таких районов является юго-восточное побережье Камчатки. Здесь в последние

годы выполнены наблюдения МТЗ и МВЗ (магнитовариационное зондирование) ООО «Северо-Запад». Исследования проведены с использованием современной аппаратуры, позволяющей получить магнитотеллурические параметры с высокой точностью. По этим данным имеется возможность с использованием современных подходов и методик получить дополнительную информацию о структуре электропроводности земной коры указанного района. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

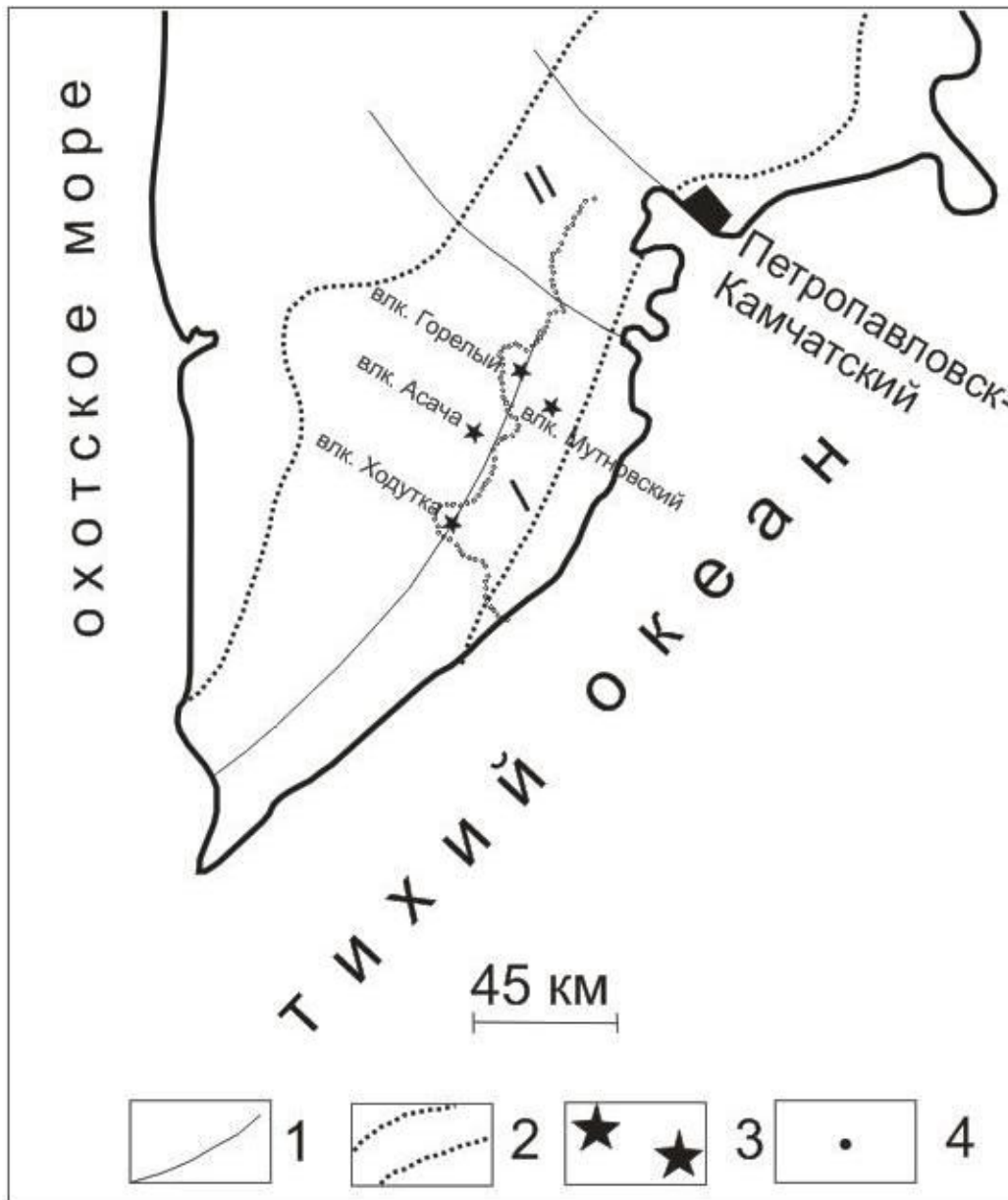


Рис. 1. Схема основных тектонических структур Юго-Восточного побережья Камчатки и расположение профиля МТЗ. 1 – Границы структур; 2 – Наложенный вулканический пояс; 3 – Современные вулканы; 4 – Пункты МТЗ; I – Южно-Камчатский антиклинорий; II – Начикинская складчато-глыбовая зона.

### **Краткая геолого-геофизическая характеристика района**

Исследуемый район включает крупные структуры: Южно-Камчатский антиклинорий и Начикинскую складчато-глыбовую зону. Геологическое строение антиклинория отличается значительной сложностью, что связано с большим числом крупных разломов, опрокидыванием местами слоёв на восток и северо-восток, наличием надвигов, пестрым составом разновозрастных, преимущественно неогеновых, эффузивных и интрузивных пород [4]. По Г.М. Власову осевая часть антиклинория совпадает с берегом Тихого океана, а его юго-восточное крыло погружено под воду. Между Малкой и Петропавловском антиклинорий осложнён крупной впадиной северо-западного направления – Начикинским грабеном. Пространственно зона совпадает с Начикинской складчато-глыбовой зоной, ограниченной крупными разломами. Зона выполнена неогеновыми и четвертичными вулканическими породами. Здесь широко распространены различного характера сбросы, надвиги, взбросы. Складки имеют отчётливое северо-западное простирание [1].

В осреднённом остаточном поле силы тяжести по направлению к океану происходит закономерное возрастание интенсивности поля, что связано с увеличением плотности коры и приближением мантийных слоёв к поверхности [10]. Данные аэромагнитной съёмки свидетельствуют о сложном характере поля, обусловленным наличием в разрезе интрузивных и эффузивных магматических образований [4].

Геоэлектрический разрез осадочно-вулканогенного чехла изучен по данным бурения, ВЭЗ и МТЗ [5]. Сопротивление горных пород зависит от фациального состава, наличия минерализованных вод и температуры. В верхней части разреза залегают четвертичные вулканогенные и осадочные образования сопротивлением сотни – первые тысячи Ом·м и более, мощностью первые сотни метров. Ниже залегает кайнозойская толща со средним продольным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков омметров, мощностью до 5 км. Она подстилается ком-

плексом верхнемеловых осадочно-вулканогенных образований со средним продольным сопротивлением от первых единиц до первых десятков и первых сотен Ом·м. Консолидированный фундамент имеет сопротивление первые тысячи Ом·м. Глубинная часть разреза содержит проводящие слои.

### Методика наблюдений

Наблюдения МТ-поля выполнены с помощью аппаратуры «Phoenix Geophysics Ltd.» (Канада). При полевых измерениях использовались две модификации аппаратуры: станции MTU-5A, предназначенная для регистрации пяти компонент ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ) и станции MTU-2E, регистрирующие две электрические компоненты ( $E_x$ ,  $E_y$ ) магнитотеллурического поля. Станция состоит из автономного регистратора MTU с вмонтированной GPS-системой, индукционных магнитных датчиков МТС-50 и электрических диполей с неполяризуемыми электродами. В станции используется 24-разрядный АЦП. Частота дискретизации составляет 24 кГц для станций MTU-5A и 10 кГц для MTU-2E. Точное время и координаты определяются станцией с помощью встроенной системы GPS. Для каждой записи поля определена дата измерения и точное время, а также координаты точки наблюдения.

Для регистрации электрического поля использована пятиэлектродная крестообразная измерительная установка, заземленная слабополяризуемыми электродами. Электрические линии длиной 80 м выкладывались по азимутам  $30^\circ$  ( $E_x$ ) и  $120^\circ$  ( $E_y$ ). Магнитные датчики выставлялись по уровню и буссоли. Они также ориентировались по магнитным азимутам  $30^\circ$  ( $H_x$ ) и  $120^\circ$  ( $H_y$ ). Длительность записи электромагнитного поля Земли в пунктах МВЗ составляла 2 суток, а в пунктах МТЗ 14 – 18 часов. Диапазон изучаемых периодов 0.001 до 10 000 с. Протяжённость профиля составляет около 170 км. На данном участке выполнено 94 зондирования. Шаг между пунктами наблюдений составил от 0.5 до 2.5 км.

### Методика обработки и анализа данных

В методе МТЗ основной характеристикой является тензор импеданса  $[Z]$ , определяемый из соотношений между горизонтальными компонентами магнитного и электрического полей:

$$\mathbf{E}_{\text{гор}} = [Z] \mathbf{H}_{\text{гор}}, \text{ где } [Z] = \begin{bmatrix} Z_{XX} & Z_{XY} \\ Z_{YX} & Z_{YY} \end{bmatrix}$$

или в развёрнутом виде:

$$E_X = Z_{XX} H_X + Z_{XY} H_Y, \quad E_Y = Z_{YX} H_X + Z_{YY} H_Y,$$

где  $E_X$ ,  $E_Y$  - компоненты электрического поля,  $H_X$ ,  $H_Y$ ,  $H_Z$  - компоненты магнитного поля,  $Z_{XX}$ ,  $Z_{XY}$ ,  $Z_{YX}$ ,  $Z_{YY}$  - комплексные компоненты тензора импеданса.

По данным компонент тензора импеданса рассчитаны полярные диаграммы. Они дают возможность оценить степень горизонтальной неоднородности среды. Полярные диаграммы на высоких частотах характеризуют различную степень неоднородности среды. На низких частотах они свидетельствуют в пользу двумерной неоднородной среды. Это связано с вытянутостью полуострова в северо-восточном направлении. В качестве основных направлений для изучения глубинной электропроводности приняты кривые МТЗ ориентированные по простиранию и вкрест простирания Камчатки. Эти кривые в дальнейшем соответственно названы продольными и поперечными.

Форма полученных кривых МТЗ характеризует тип геоэлектрического разреза. В качестве примера рассмотрим кривые для зоны I (см. рис. 4), приведённые на рис. 2. Кривые достаточно дифференцированы и свидетельствуют о наличии в разрезе высокоомных и низкоомных слоёв. Левая часть кривых характеризует проводящий осадочно-вулканогенный чехол. Максимум МТ-кривых связан с высокоомной частью коры. Наиболее отчётливо он выражен на продольных кривых. Надо отметить, что в самой правой части поперечные и продольные кривые различны. Первые имеют минимум и восходящую ветвь, вторые, начиная с  $T=100$  с. выражены вос-

ходящей ветвью в область высоких значений электрического сопротивления.

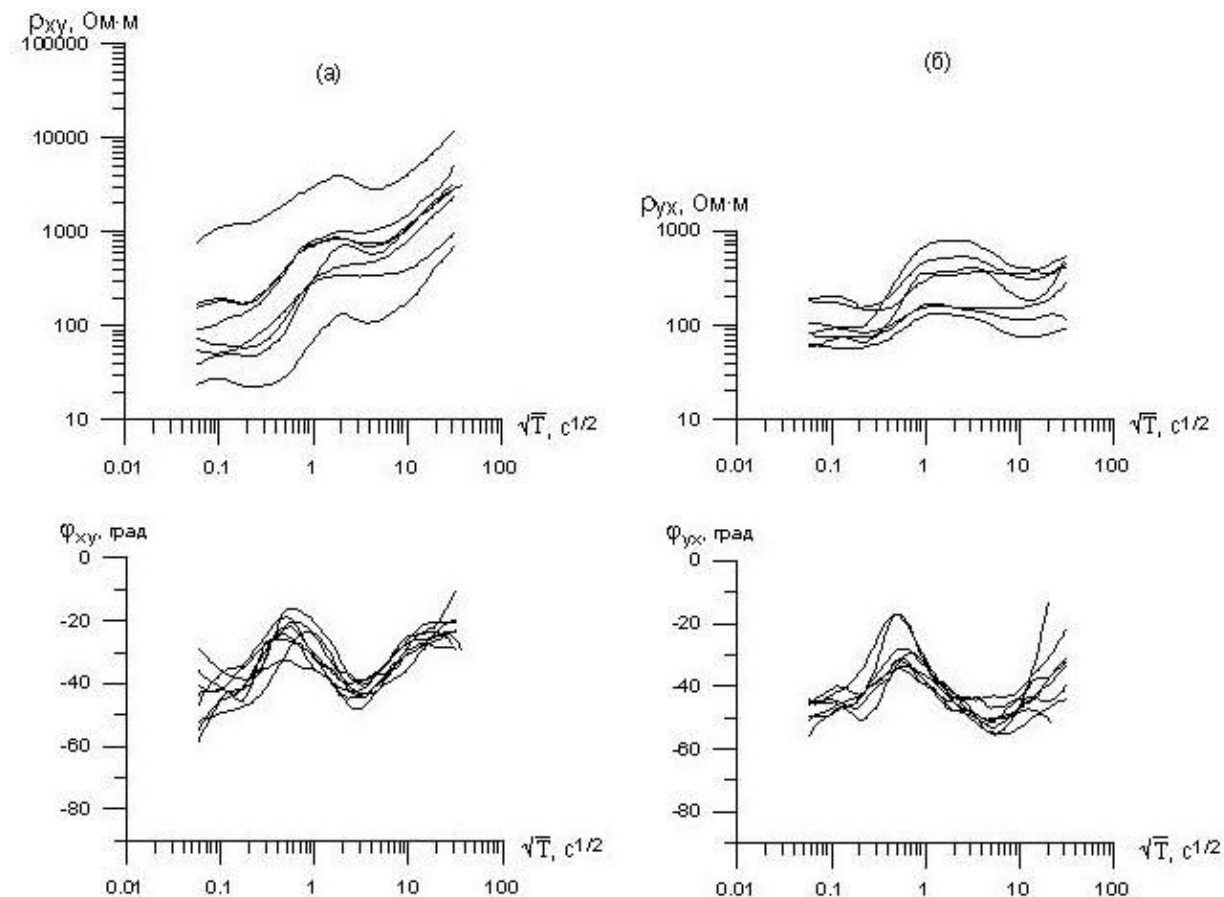


Рис. 2 Семейство амплитудных и фазовых кривых МТЗ для зоны I.  
а, б – поперечные и продольные кривые МТЗ.

Анализ показывает, что продольная и поперечная кривые подвержены влиянию приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Это выражено в том, что амплитудные кривые расходятся по уровню электрического сопротивления, а фазовые кривые практически совпадают. Такое поведение кривых МТЗ связано с влиянием приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Для исключения влияния этих эффектов использован способ конформного осреднения [2].

Кривые МТЗ, близкие по форме, организованы в семейства. Таких семейств получилось 15. В каждой группе выполнено осреднение и получены средние кривые кажущихся сопротивлений (рис. 3).

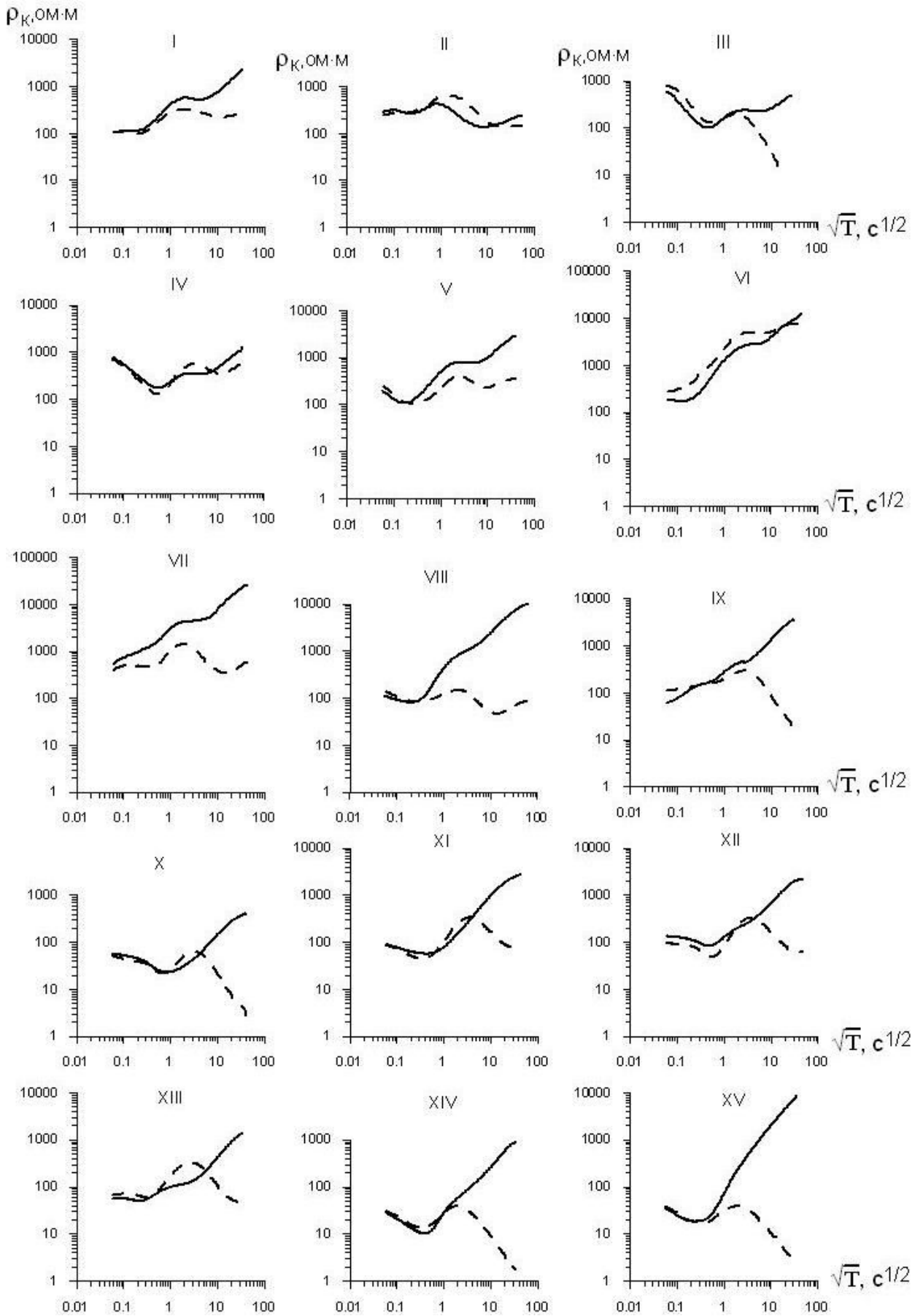


Рис. 3. Графики средних кривых МТЗ для различных зон (см. рис. 4).

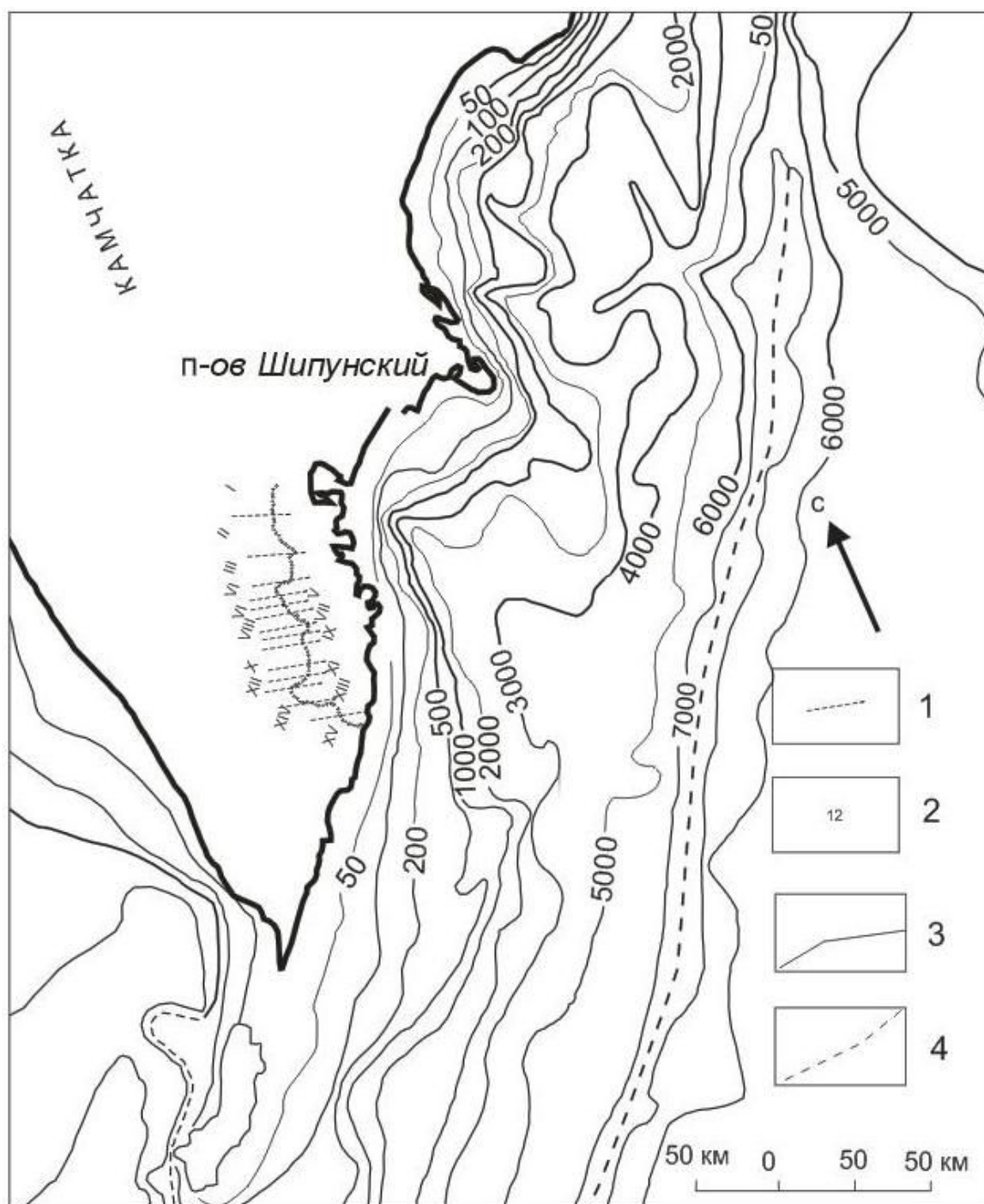


Рис. 4. Батиметрическая карта акваторий Камчатки со схемой расположения профиля. 1, 2 – границы зон и номера семейств соответственно; 3 – изобаты; 4 – ось Камчатского глубоководного желоба.

Наряду с влиянием локальных эффектов, кривые МТЗ могут быть подвержены действию регионального эффекта за счёт резкого контраста проводимости суши и морской воды. Для оценки данного влияния использованы данные численного трёхмерного моделирования из работы [9].



В основу моделирования положена батиметрическая карта Южной Камчатки (рис. 4). На ней видно, что глубины морского дна на восточном побережье Камчатки достигают 7 км. В принятой пробной модели верхний слой на суше имеет мощность 3 км, удельное электрическое сопротивление составляет 30 Ом·м, морской воды - 0.25 Ом·м. Моделирование выполнено по программе Макки [11]. Оси сетки Y и X ориентированы, соответственно, вдоль и поперек Камчатки.

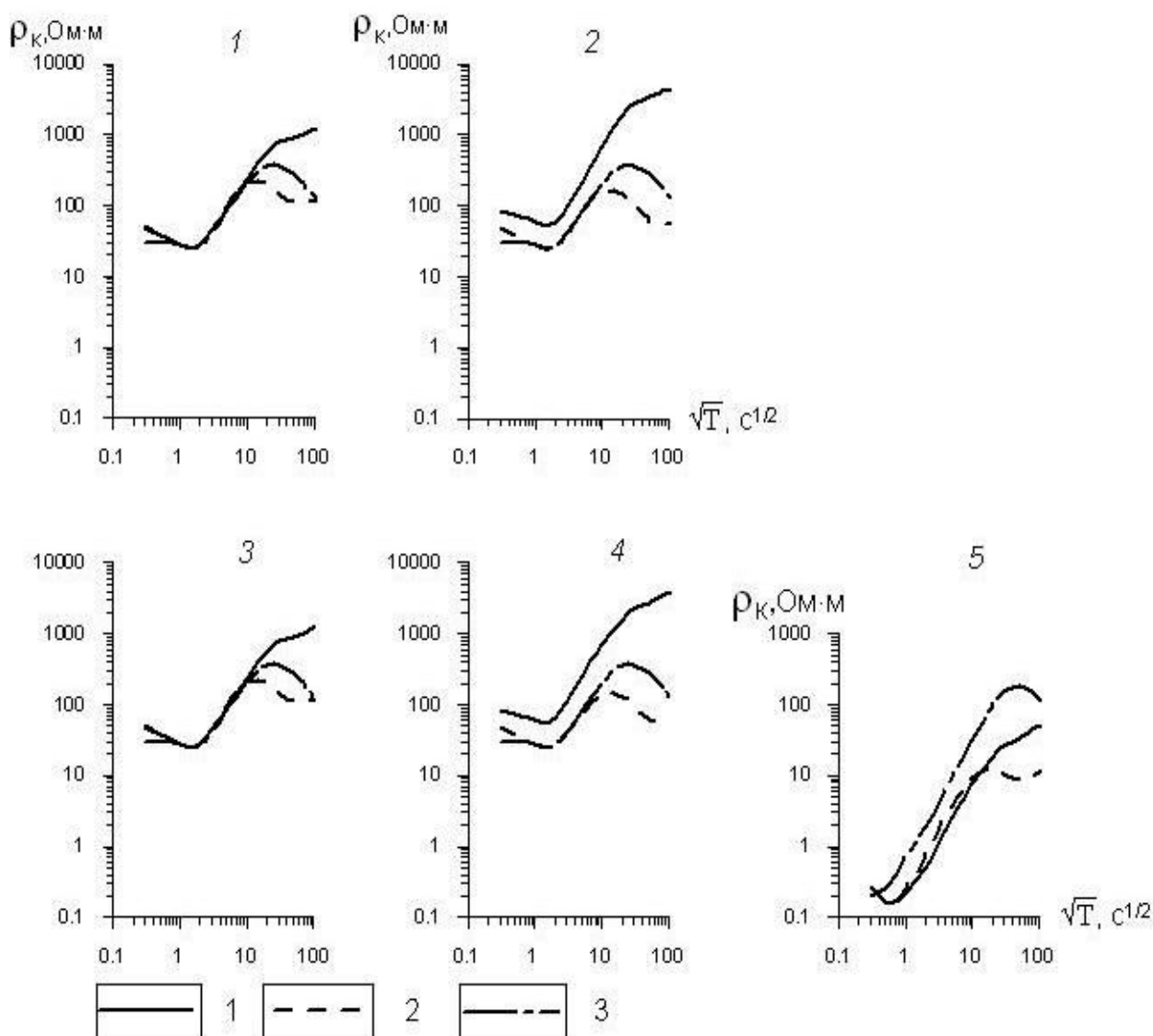


Рис. 5. Модельные кривые МТЗ.

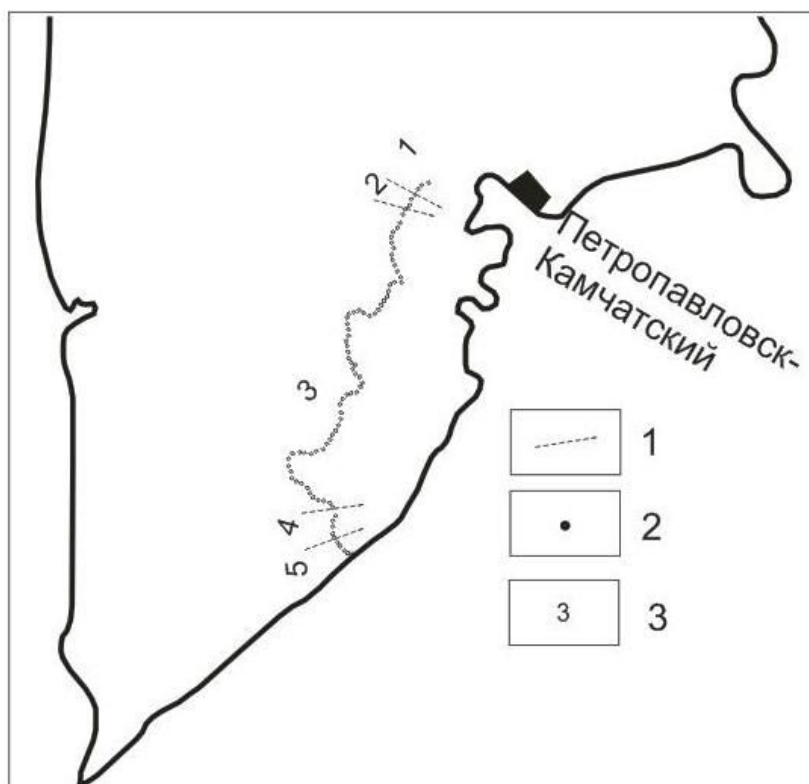


Рис. 6. Схема расположения кривых МТЗ, полученных в результате моделирования.

1 – границы групп; 2 – пункты МТЗ; 3 – номера групп.

По данным моделирования выделено 5 групп, характеризующих береговой эффект (рис. 5, 6). Заметное влияние берегового эффекта начинается с периода 60–100 с. Расхождение поперечной и локально-нормальной амплитудных кривых достигает на периоде 10 000 более порядка. На продольной амплитудной кривой проявляется минимум в низкочастотной области, связанный с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в Тихом океане. Влияние индукционного эффекта начинается на периоде 100-150 с, что выражено отклонением продольной кривой от локально-нормальной.

Таким образом, результаты моделирования свидетельствуют о том, что поперечные кривые в сильной мере подвержены действию берегового эффекта. Продольные кривые практически свободны от индукционного влияния Тихого океана. Поэтому они приняты в качестве основных для изучения глубинной электропроводности. В дальнейшем для исключения влияния индукционного эффекта, на основе модельных кривых введена

поправка в экспериментальные кривые. Полученные кривые, после введения поправки, использованы для изучения геоэлектрического разреза земной коры и верхней мантии. Разрез построен с привлечением дифференцированной трансформации, т. е. преобразования зависимости кажущегося электрического сопротивления от периода к зависимости от глубины.

### **Результаты интерпретации**

На рис. 7 изображён полученный приближённый глубинный геоэлектрический разрез.

В верхней части разреза на глубинах в первые километры выделяется зона пониженных значений сопротивлений, характеризующих осадочно-вулканогенный чехол. Ниже расположена зона с высокими значениями кажущихся сопротивлений до 1000 Ом·м, которая соответствует верхним частям кристаллической земной коры. На глубинах 10 – 30 км отмечается проводящая зона с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. Природа слоя может быть связана с наличием жидких флюидов. Грубые оценки показывают, что достаточно десятых долей процента относительно объёма флюида в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшение удельное электрическое сопротивления горной породы от тысяч-сотен до десятков-единиц Ом·м [7].

Следует отметить, что в южной части профиля коровый проводящий слой приближен к дневной поверхности до глубин 10-20 км. При этом удельное электрическое сопротивление слоя понижается до первых единиц Ом·м. Предполагается, что возрастание электропроводности может быть связано с глубинным разломом, к которому приурочена зона современного вулканизма «Ходутка». В районе вулкана Мутновский литосфера характеризуется повышенным электрическим сопротивлением, что может быть обусловлено насыщенностью разреза интрузивными магматическими породами. Это находит отражение в повышении интенсивности геомагнитного поля до первых сотен Гамм.

### Выводы

Выполнена обработка и интерпретация данных МТЗ. В основу интерпретации положены средние продольные кривые МТЗ свободные от влияния локальных приповерхностных геоэлектрических неоднородностей п-ова. Кривые редуцированы с учётом влияния индукционного эффекта, рассчитанного по данным численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля. По редуцированным средним продольным кривым с помощью дифференцированной трансформации получен глубинный геоэлектрический разрез (рис. 7).

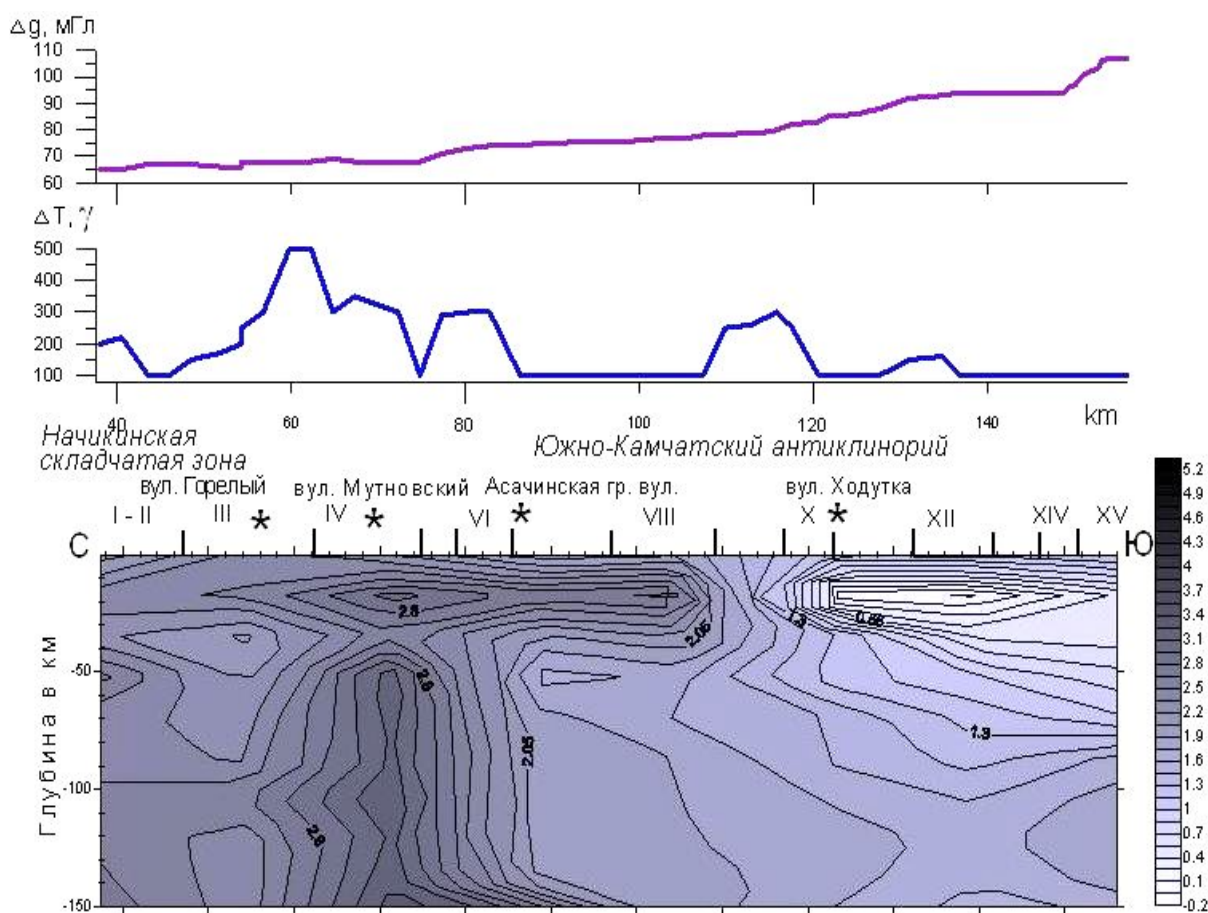


Рис. 7. Геоэлектрический разрез Юго-Восточной Камчатки.

В литосфере юго-восточного побережья Камчатки выявлены зоны повышенной проводимости на глубинах 10-30 км, которые могут быть связаны с наличием жидких флюидов. В южной части профиля земная кора на глубинах 10-20 км содержит зону аномально-высокой проводимости. Не

исключено, что данная зона отражает наличие глубинного разлома, к которому приурочена вулканическая зона «Ходутка». Литосфера Мутновской группы вулканов характеризуется повышенным электрическим сопротивлением в связи с насыщенностью разреза магматическими породами.

В дальнейшем предусматривается дополнить и уточнить полученные результаты по средствам двухмерного и трехмерного численного моделирования магнитотеллурического поля.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Априлков С.Е. Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // Геотектоника. 1971. № 2. С. 47-61.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцова Н.С. и др. Магнитовариационное зондирование: новые возможности // Физика Земли. 2003. № 9. С. 3-30.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. – 680 с.
4. Геология СССР. Камчатка и Курильские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Наука, 1991. 181 с.
5. Мороз Ю.Ф. Стрoение осадочно-вулканогенного чехла Камчатки по геофизическим данным. // АН СССР. Тихоокеанская геология. 1991. № 1. С. 59-67 с.
6. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. – 182 с.
7. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лощинская Т.А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры южной Камчатки // Физика Земли. 1996. № 11. С. 49-57.
8. Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 97-109.
9. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 1. С. 1-10.
10. Павлов Ю.А., Портнягина П.В. Об изостазии земной коры на Камчатке // Труды СахКНИИ. 1975. вып. 3. С. 130-136.
11. Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equation: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. № 29. P. 923-935.

## GEOELECTRIC SECTION OF THE SOUTHEAST OF KAMCHATKA

*Akmetova Ya.A.**Kamchatka Vitus Bering State University**Scientific leader Moroz Yu.F.*

Data magnetotelluric sounding, which were received in a recent years on the southeast coast of Kamchatka, were reviewed. Profile length is 170 km. step of observations was averaged about 1.5 km, magnetotelluric field was recorded in the range of 0.001 to 10 000 s. Method of interpretation MTS is defined by analysis of possible distortions curves of apparent resistivity due to influence local and regional geoelectric homogeneousness. It was shown that the amplitude curves of MTS are influenced extend to a large of local geoelectric in homogeneousness. Technique of conformal averaging was used for repayment of this effect. Regional (coastal) effect was studied by three-dimensional numerical modeling. Method of MTS interpretation was determined on the base of analysis. As the main curves take MTS curves oriented along the Kamchatka. According to the formal interpretation of these curves was got the preliminary deep geoelectric model. In the crust and upper mantle conductive zones was identified. The possible nature identified areas was considered. Received preliminary geoelectric model should be clarified with the help of 2D and 3D modeling of magnetotelluric field.

*Key words: magnetotelluric sounding, magnetotelluric field, conformal averaging, three-dimensional numerical modeling, geoelectric model, coastal effect.*