

---

УДК 550.837

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ  
ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ  
ПО ДАННЫМ МАГНИТОВАРИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*Самойлова О.М.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
г. Петропавловск-Камчатский*

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

По данным магнитовариационных исследований, проведенных в 2010 г. на юго-восточном побережье Камчатки, рассчитана матрица Визе-Паркинсона. Определены векторы индукции на периодах вариаций 100 и 500 с. Они дают представление о действии берегового эффекта. Экспериментальные данные сопоставлены со схемами индукционных стрелок, полученных по результатам трехмерного численного моделирования. По данным МТЗ в стандартную модель введен проводящий слой на глубине 20 км. Наличие этого слоя «гасит» береговой эффект, поэтому экспериментальные и модельные данные векторов индукции согласуются между собой. Полученные результаты свидетельствуют о наличии проводящего слоя в зоне субдукции на Восточной Камчатке.

*Ключевые слова: матрица Визе-Паркинсона, векторы индукции, береговой эффект, трехмерное численное моделирование.*

## ВВЕДЕНИЕ

С 1979 г. и до настоящего времени на территории Камчатского края проводится изучение глубинной электропроводности с применением различных методов, основанных на использовании электрических и магнитных полей естественного происхождения. Большую часть информации получают с помощью МТЗ (магнитотеллурическое зондирование), но также проводят работы методами МВЗ (магнитовариационное зондирование) и МВП (магнитовариационное профилирование). В ряде публикаций [2], [4] и др. содержатся сведения о глубинной электропроводности, которые получены по профилям МТЗ, МВЗ и МВП, удаленным от восточной береговой линии. Поэтому информация об электропроводности земной коры и верхней мантии восточного побережья южной оконечности Камчатки

крайне ограничена. В последние годы здесь выполнены МТЗ и МВЗ компанией ООО «Северо-Запад» (рис.1). Полученные кривые МТЗ и МВЗ дают нам возможность исследовать береговой эффект и на этой основе получить представление о распределении электропроводности литосферы в зоне субдукции на юго-восточном побережье Камчатки. Этому вопросу и посвящается настоящая статья.

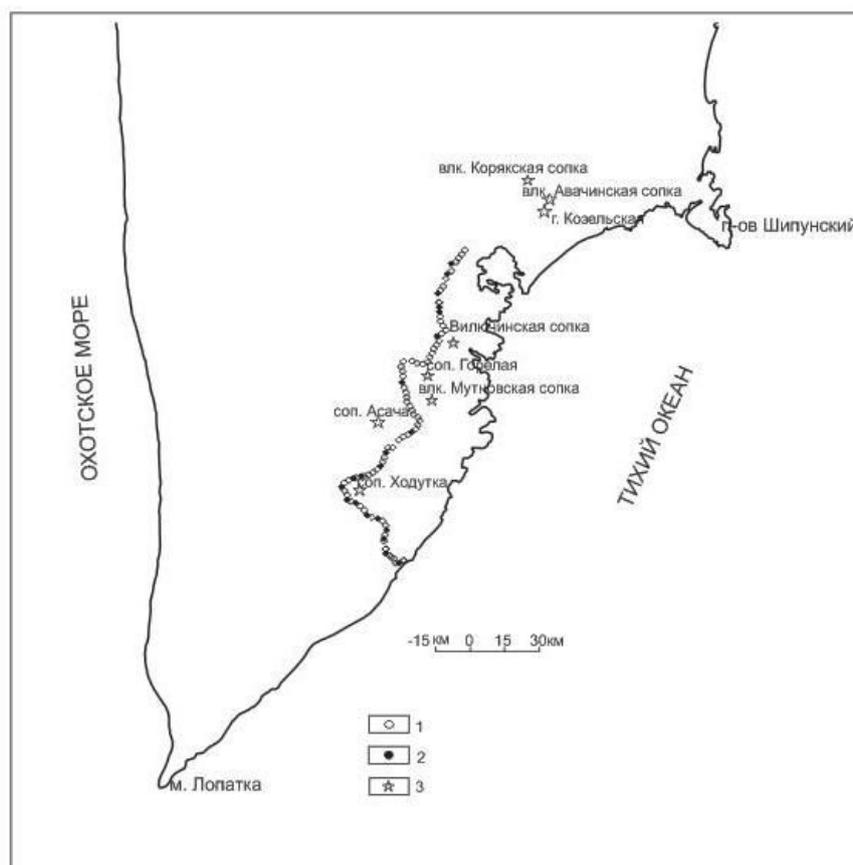


Рис.1. Схема расположения профилей МТЗ и МВЗ.  
1 – пункты МТЗ; 2 – пункты МВЗ; 3 – вулканы.

## МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

При полевых измерениях использовалась станция MTU-5A аппаратно-программного комплекса Phoenix Geophysics Ltd (рис. 2), предназначенная для регистрации пяти компонент ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ). Станция MTU-5A состоит из автономного регистратора MTU с вмонтированной GPS-системой, индукционных магнитных датчиков МТС-50 и электриче-

ских диполей с неполяризуемыми электродами. С помощью GPS для каждой записи поля определена дата измерения и точное время, а также координаты точки наблюдения.

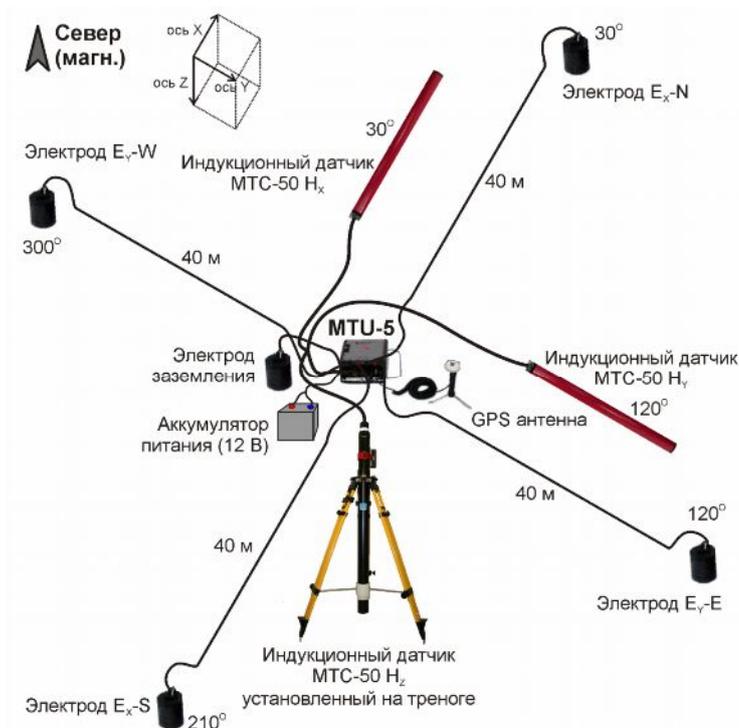


Рис.2. Схема расстановки станции MTU

Электрические линии длиной 80 м выкладывались по буссоли на магнитные азимуты  $30^\circ$  ( $E_X$ ) и  $120^\circ$  ( $E_Y$ ). Для обеспечения низкого уровня сопротивлений заземления и стабильности работы электродов они размещались в ямы глубиной до 20 см, в которых грунт размешивался с соленой водой и глиной до жидкого состояния. В случае отсутствия почвенного слоя, ямы заполнялись глиной. Магнитные датчики МТС-50 выставлялись по уровню и буссоли. Они также ориентировались по магнитным азимутам  $30^\circ$  ( $H_X$ ) и  $120^\circ$  ( $H_Y$ ). Для подавления влияния ветровых помех и микросейсм датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землей. Вертикальные датчики зарывались в землю, а в сложных условиях на каменистой почве устанавливались с помощью треноги. Их положение также выверялось при помощи уровня.

Обработка МВ данных проводилась в два этапа. Первичный этап выполнен компанией ООО «Северо-Запад» с помощью программ Synchro Time Series View и SSMT 2000 фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Перед обработкой записи МТ-поля просматриваются в программе Synchro Time Series View для оценки качества материала. При наличии в записи участков с высоким уровнем помех (например, от близкой грозы) они по возможности исключаются из дальнейшей обработки. В программе SSMT 2000 рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент поля, и проводится Фурье-преобразование, в результате чего определяются кросс-спектры мощности в широком частотном диапазоне на заданной сетке частот, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса и матрицы Визе-Паркинсона (типперы).

Второй этап обработки произведен лабораторией геофизических полей и предвестников землетрясений ИВиС ДВО РАН с помощью специальной программы, которая позволяет получить для каждого пункта наблюдений при различных периодах вариаций (от первых долей секунд до первых десятков минут) азимуты и модули вещественных и мнимых индукционных стрелок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ВИЗЕ-ПАРКИНСОНА

Существует передаточная функция, связывающая горизонтальную и вертикальную составляющие геомагнитного поля. Эта функция получила название магнитного типпера или индукционной матрицы, в основе получения которой лежит линейное уравнение вида [1]:

$$H_Z = \hat{\mathbf{W}} \mathbf{H}_{\text{ГОР}}, \text{ где } \hat{\mathbf{W}} = |W_{ZX} W_{ZY}| \text{ или } H_Z = W_{ZX} H_X + W_{ZY} H_Y,$$

где  $H_X, H_Y, H_Z$  – составляющие наблюдаемого магнитного поля,  $W_{ZX}, W_{ZY}$  – компоненты индукционной матрицы, которые зависят от частоты,

распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей. Задача сводится к определению компонент индукционной матрицы для каждого периода вариаций.

Магнитный типпер является комплексным числом, поэтому его действительную и мнимую части можно представить следующим образом [3]:

$$\text{Re}W = \text{Re}W_{ZX}\mathbf{i} + \text{Re}W_{ZY}\mathbf{j}$$

$$\text{Im}W = \text{Im}W_{ZX}\mathbf{i} + \text{Im}W_{ZY}\mathbf{j}$$

Магнитные вариации индуцируют в любой проводящей среде электрические токи, которые в свою очередь становятся источником магнитного поля. По компонентам матрицы определяют направление индукционных стрелок и получают информацию о наличии проводящей зоны [3]. На рисунках 3 и 4 представлены вещественные и мнимые векторы индукции для периодов вариаций, равных 100 и 500 с.

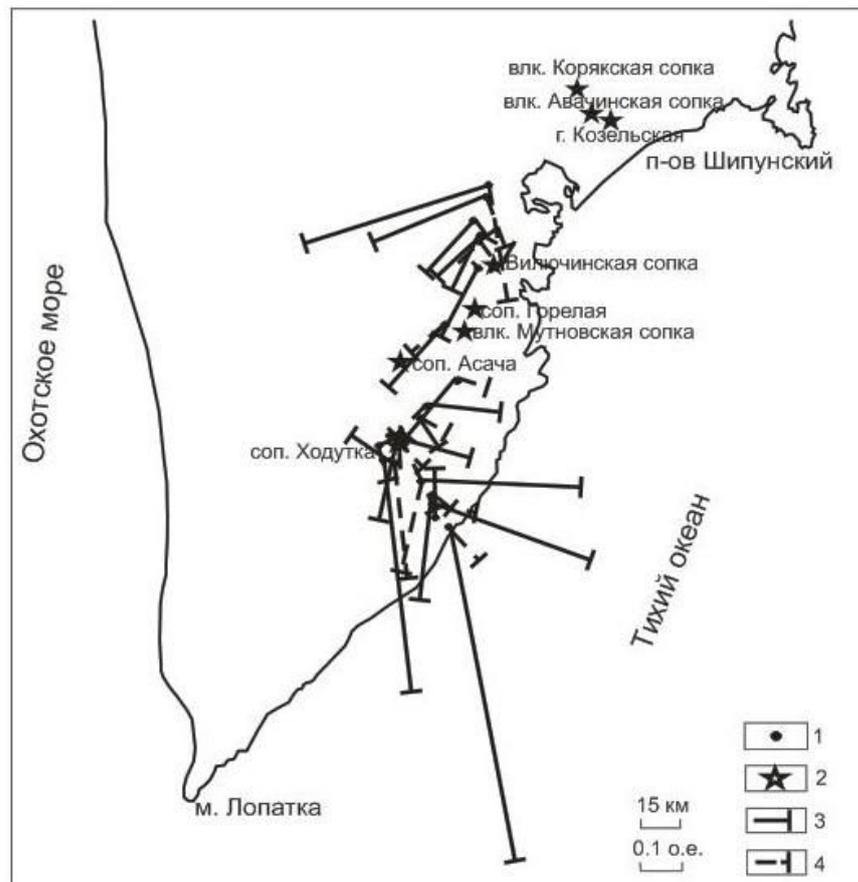


Рис. 3. Схема практических индукционных стрелок Визе-Паркинсона на периоде вариаций 100с. 1 – пункты МВЗ; 2 – вулканы; 3 – вещественные индукционные стрелки; 4 – мнимые индукционные стрелки.

Видно, что в тех пунктах МВЗ, которые расположены вдали от океана, вещественные стрелки направлены в сторону суши. По мере приближения к океану на юге азимуты векторов меняются, и они ориентируются в сторону проводящей зоны, а также происходит их увеличение по модулю. Это указывает на действие берегового эффекта, возникающего из-за контраста проводимости верхнего слоя на суше и водной толщи, который составляет 3-4 порядка.

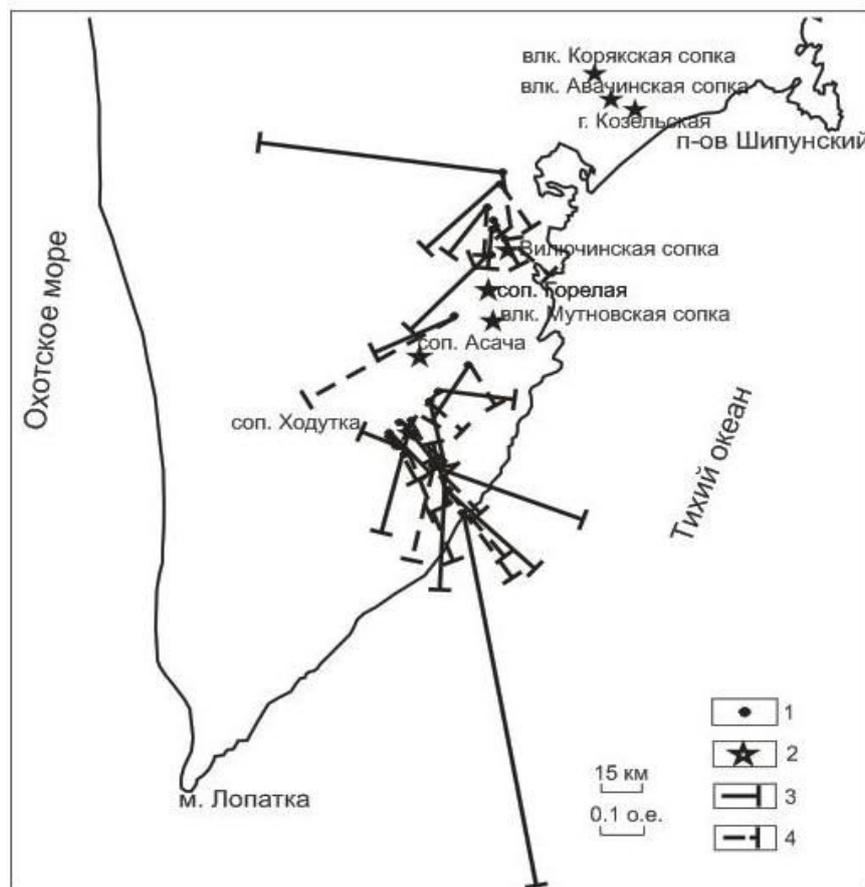


Рис. 4. Схема практических индукционных стрелок Визе-Паркинсона на периоде вариаций 500с. 1 – пункты МВЗ; 2 – вулканы; 3 – вещественные индукционные стрелки; 4 – мнимые индукционные стрелки.

Для изучения такого влияния использовано трехмерное численное моделирование магнитотеллурического поля [3]. В пробной модели Камчатки мощность и удельное электрическое сопротивление верхнего слоя на суше приняты с постоянными значениями, чтобы получить возможность

оценить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей в осадочно-вулканогенном чехле Камчатки. Так верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление составляет 30 Ом·м. Сопротивление воды - 0,25 Ом·м. В результате моделирования, выполненного по программе Makki [6], были построены представленные на рисунках 5 и 6 схемы индукционных стрелок для периодов вариаций 100 и 500 с. На обеих схемах вещественные векторы направлены в сторону проводящей зоны. С повышением периода вариаций наблюдается заметное увеличение модулей стрелок, благодаря

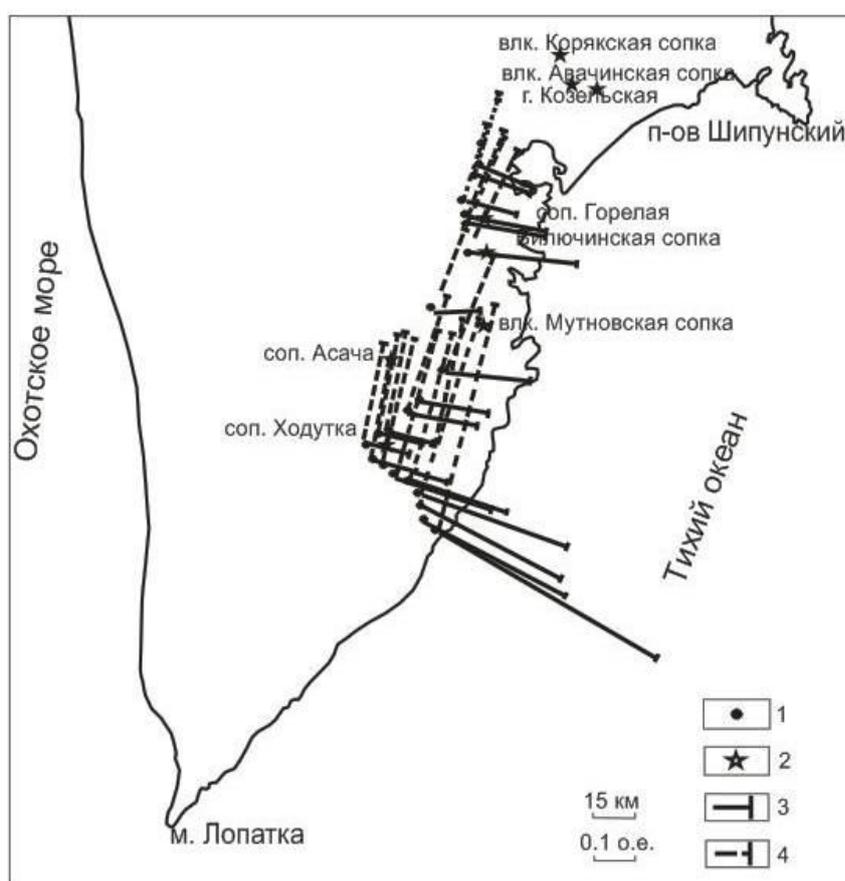


Рис. 5. Схема модельных индукционных стрелок Визе-Паркинсона на периоде вариаций 100с. 1 – пункты МВЗ; 2 – вулканы; 3 – вещественные индукционные стрелки; 4 – мнимые индукционные стрелки.

действию берегового эффекта.

При изучении поведения индукционных стрелок по профилю можно получить информацию об особенностях проявления берегового эффекта.

На рисунке 7 сопоставлены экспериментальные и модельные графики модулей индукционных стрелок. На периоде 100 с. модули практических и модельных вещественных векторов практически не отличаются друг от друга. На графиках, соответствующих периоду 500 с, модули модельных стрелок заметно превосходят модули практических стрелок. Такой результат дает основание предположить существование проводящего слоя литосферы юго-восточной Камчатки, который не учтен пробной моделью. Наличие проводника «гасит» действие берегового эффекта.

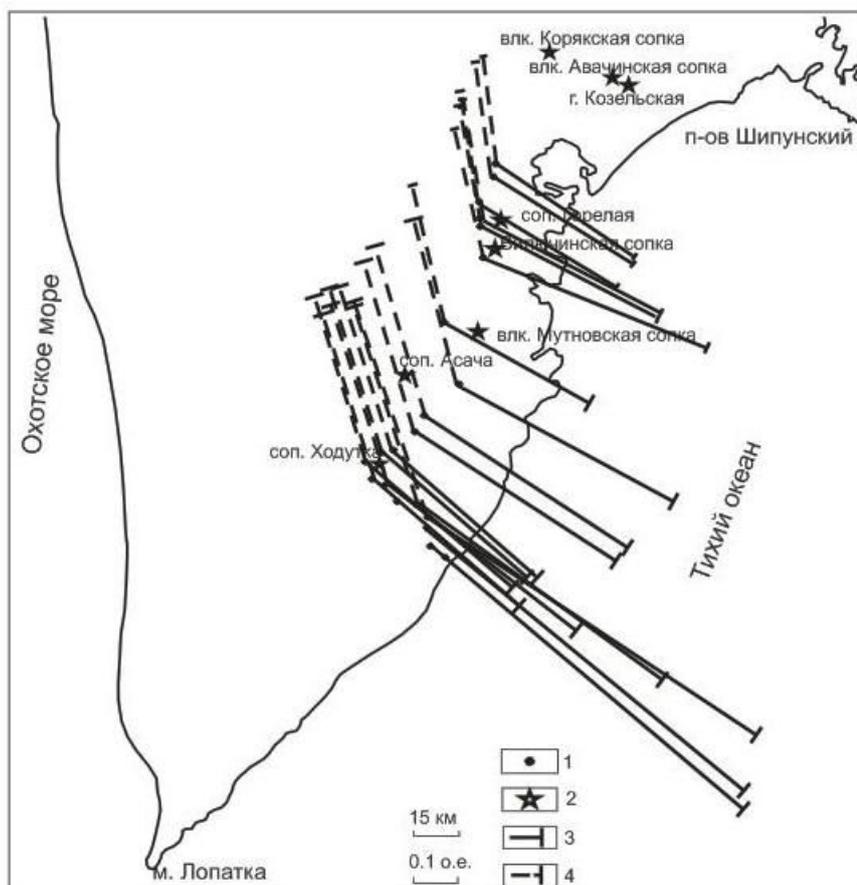


Рис. 6. Схема модельных индукционных стрелок Визе-Паркинсона на периоде вариаций 500с. 1 – пункты МВЗ; 2 – вулканы; 3 – вещественные индукционные стрелки; 4 – мнимые индукционные стрелки.

Для определения параметров проводящего слоя обратимся к данным МТЗ, полученным на рассматриваемом профиле в 2007-2010 гг. Анализ показывает, что продольные (вдоль Камчатки) и поперечные (поперек Камчатки) кривые МТЗ подвержены влиянию приповерхностных геоэлек-

трических неоднородностей. При этом поперечные кривые в большей мере искажаются влиянием регионального S-эффекта. Поэтому в основу интерпретации положены продольные кривые зондирования, которые, как показывает численное моделирование, в лучшей степени отражают распределение электропроводности с глубиной. Для погашения этого влияния кривые зондирования близкие по своей форме объединены в семейства, в каждом из которых получены средние кривые МТЗ. К сожалению, они также не совсем свободны от влияния локальных эффектов. Поэтому для получения обобщенных параметров геоэлектрического разреза предпринята вторая попытка осреднения кривых близких по форме [2]. Они сведены в два семейства, изображенные на рисунке 8.

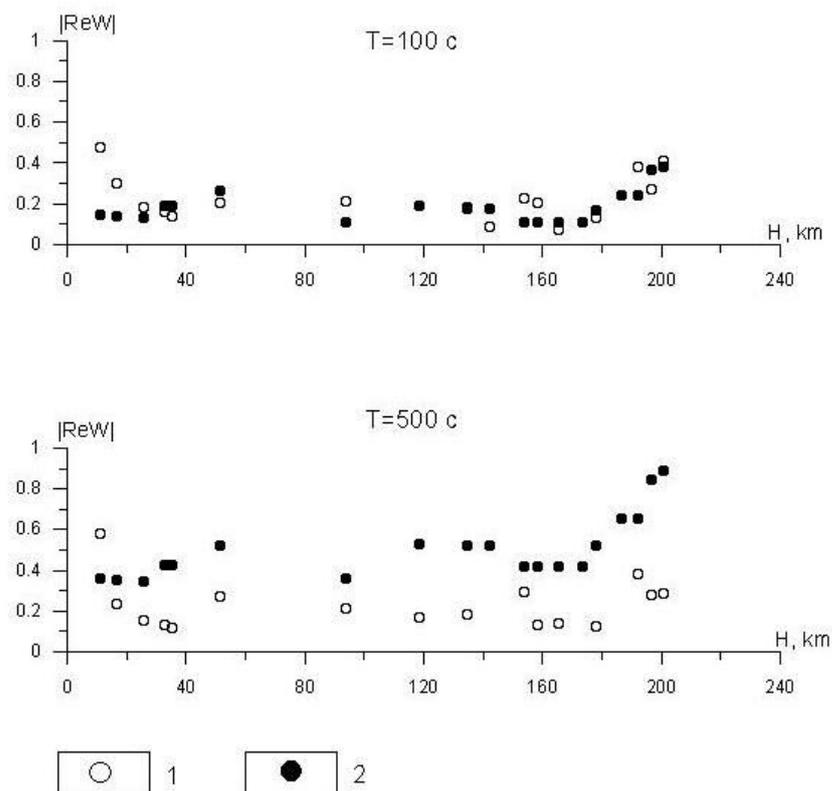


Рис. 7. Графики модулей вещественных индукционных стрелок: 1 - по экспериментальным данным за 2010г; 2 - построены по модели.

После второго этапа конформного осреднения выбраны две продольные кривые зондирования, которые представлены на рисунке 9. После

введения поправки за действие берегового эффекта и редуцирования кривой зондирования к средней проводимости осадочно-вулканогенного чехла получена кривая МТЗ, изображенная на рисунке 10.

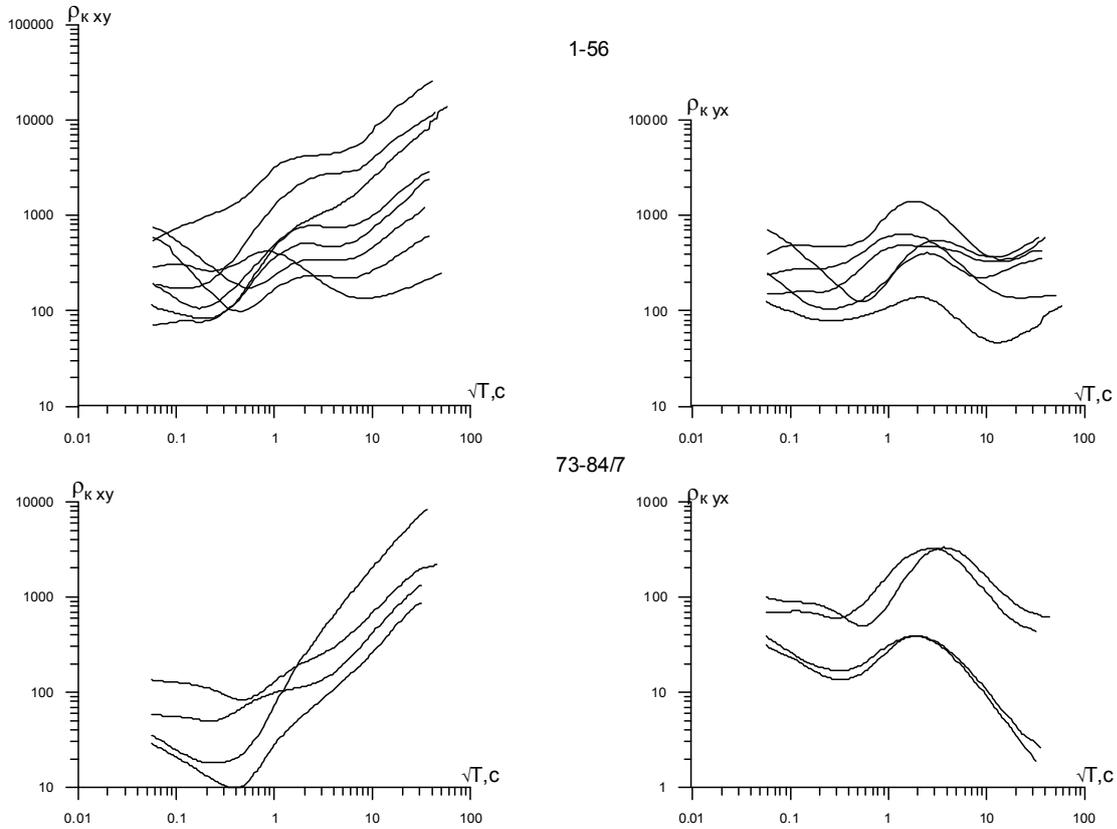


Рис. 8. Семейства средних амплитудных кривых МТЗ.  
 $\rho_{кху}$  – поперечная кривая;  $\rho_{кух}$  – продольная кривая.

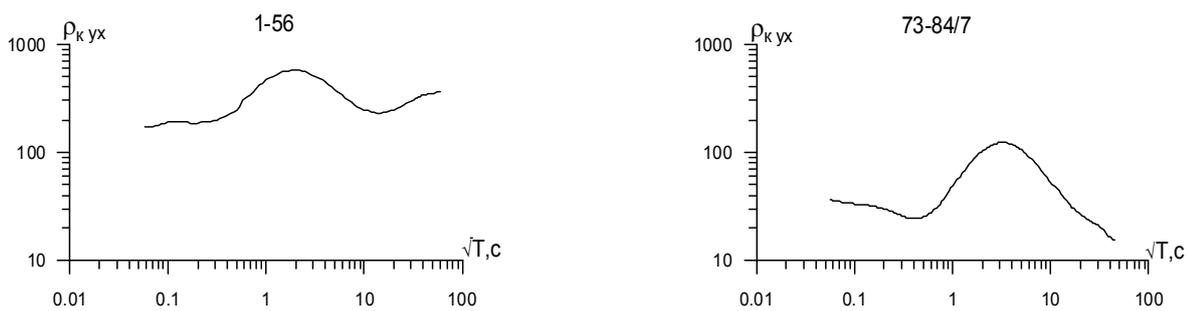


Рис. 9. Семейства продольных кривых МТЗ.  $\rho_{кху}$  – поперечная кривая;  $\rho_{кух}$  – продольная кривая.

На полученной кривой МТЗ отражено два минимума. Левый минимум связан с осадочно-вулканогенным чехлом. Максимум соответствует высокоомному слою земной коры. Правый минимум кривой отражает слой повышенной электропроводности в земной коре. По данным формальной

интерпретации проводящий слой находится на глубине около 20 км, его удельное электрическое сопротивление около 20 Ом·м, подошва слоя залегает на глубине 40 км (рис. 12).

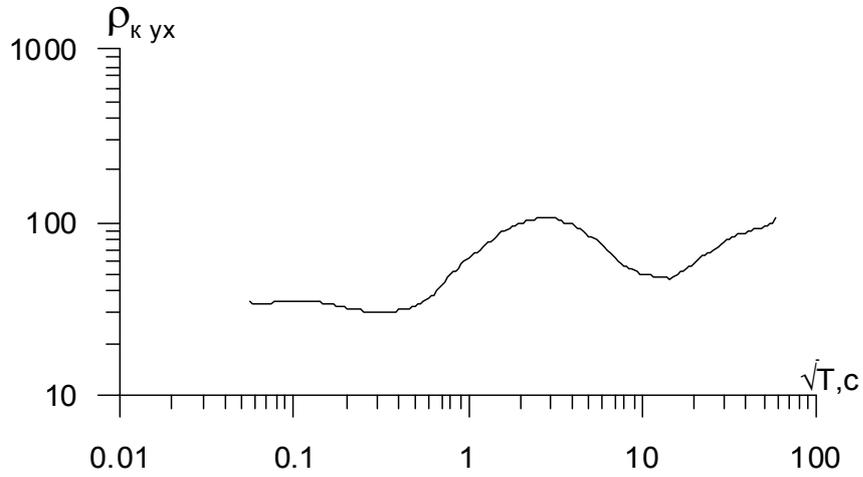


Рис.10. Продольная кривая МТЗ с учетом поправок.

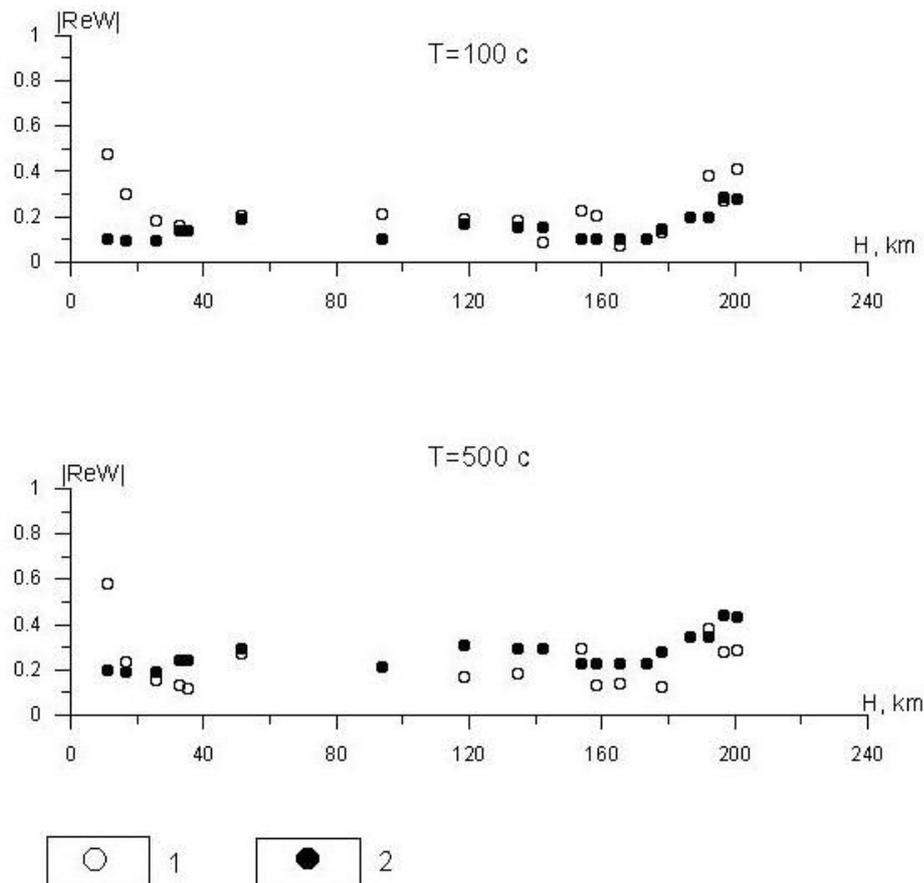


Рис. 11. Графики модулей вещественных индукционных стрелок:  
1 – по экспериментальным данным за 2010г; 2 – для модели с проводящим коровым слоем.

Выделенный проводник введен в пробную модель. В результате расчетов получены графики модулей вещественных и мнимых индукционных стрелок. Они практически совпадают с модулями индукционных стрелок (рис. 11). Это убедительно свидетельствует о наличии слоя повышенной электропроводности в литосфере.

На рисунке 12 видно, что слой повышенной электропроводности в земной коре расположен над сейсмофокальной зоны. Можно предположить, что повышенная электропроводность слоя может быть связана с наличием гидротермальных растворов и магматических расплавов, возникающих за счет поступления дополнительного тепла и флюидов, связанных с погружением океанической плиты под Камчатку. Выявленный слой может служить источником магматических расплавов, питающих современные активные вулканы на восточном побережье южной оконечности Камчатки.

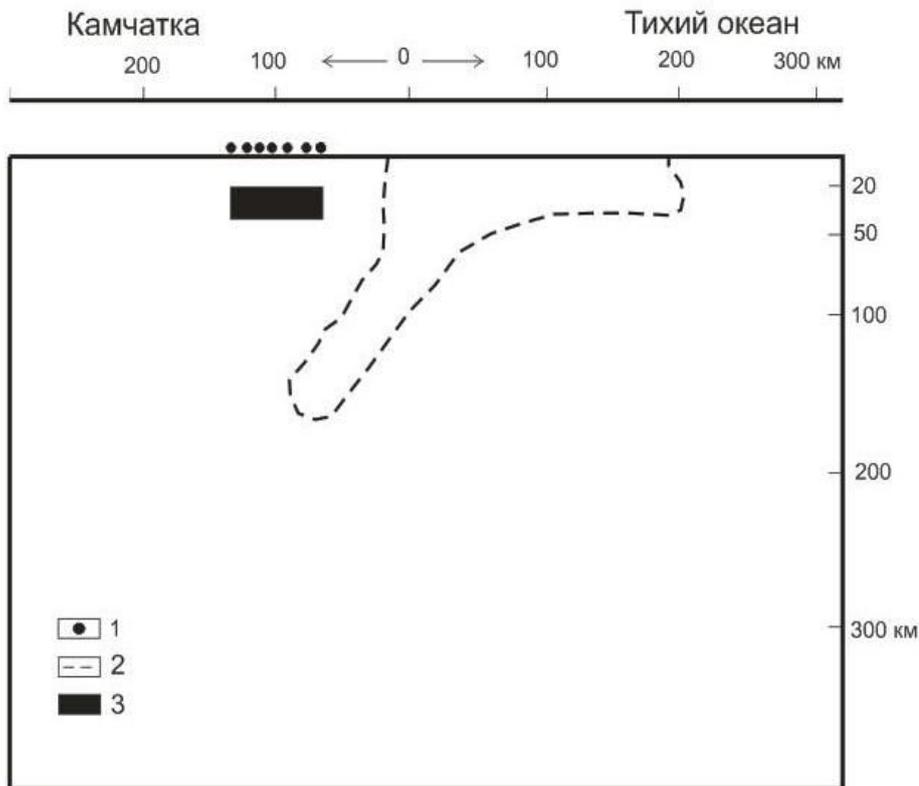


Рис. 12. Вертикальный разрез сейсмофокальной зоны. 1 - пункты МВЗ; 2 - контур фокальной зоны [5]; 3 – проводящий слой.

## ВЫВОДЫ

По данным МВЗ изучен береговой эффект. Он выражен в изменении азимутов и модулей индукционных стрелок при приближении их к проводящей зоне. Вещественные стрелки в этом случае ориентируются в сторону Тихого океана. Трехмерное численное моделирование показывает, что береговой эффект в действительности проявляется в меньшей степени. Это связано с наличием проводящего слоя в земной коре юго-восточной Камчатки. Выявленный проводник расположен над сейсмофокальной зоной. Он, по-видимому, связан с гидротермальными растворами и магматическими расплавами, возникающими в зоне субдукции при повышенном разогреве недр. Выявленный слой может выступать в качестве источника магматических расплавов, питающих современные активные вулканы исследуемой области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра. 1981. 207 с.
2. Мороз Ю.Ф., Лагуа Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и Сейсмология. 2008. № 3. С. 97-109.
3. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2006. № 3. С. 49-56.
4. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лошинская Т.А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры южной Камчатки // Физика Земли. 1996. № 11. С. 49-57.
5. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91-107.
6. 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.

LITHOSPHERE ELECTROCONDUCTIVITY  
OF KAMCHATKA SOUTH-EAST COAST ACCORDING TO DATA  
OF MAGNETOVARIATIONAL INVESTIGATIONS

*Samoylova O.M.*

*Institute of volcanology and seismology, Far East Division,  
Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatski*

*Scientific leader is Moroz Yu.F. d.g.-m.s.*

The induction matrix was computed according to the data of magneto-variation investigations, carried out in 2010 in the Kamchatka south-east coast. The induction vectors were defined for variation periods of 100 and 500 s. These vectors give presentation about shore effect. The experimental data were confronted with induction arrow schemes gained from 3D numerical modeling. According to the MTS data the conductive stratum was introduced into standard model. The presence of this stratum reduces shore effect and the experimental and model data conform. These results denote the stratum in subduction zone.

*Key words: induction matrix, induction vectors, shore effect, 3D numerical modeling.*