

БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ В ВАРИАЦИЯХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КАМЧАТКЕ COAST EFFECT IN THE GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS IN KAMCHATKA

Ю.Ф. Мороз, Т.А. Мороз

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, e-mail: morozyf@kscnet.ru; moroz@irk.ru

This paper considers the behavior of magnetic trippers associated with the sharp contrast of conductivity of the shore and seawater of the Sea of Okhotsk and the Pacific Ocean washing Kamchatka. The results of the study revealed zones with different degree of the coastal effect. The maximum of the coastal effect is observed in Eastern Kamchatka that is associated with the induction currents concentrated in the Kamchatka deep trench. The 3-D effects are observed in Eastern Kamchatka due to the complex coastline contours. These effects in geomagnetic variations attenuate and go down with an increase of the time interval. At low frequencies new effects are emerged related to the current flowing of Kamchatka. The revealed effects should be considered during the analysis of geomagnetic variations.

Береговой эффект изучен с помощью численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля. Трехмерная модель Камчатки содержит следующие геоэлектрические параметры. Мощность и удельное электрическое сопротивление верхнего слоя приняты постоянными на суше, чтобы оценить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей в осадочно-вулканогенном чехле Камчатки. Верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление 30 Ом·м. Эти параметры являются примерно средними по данным электромагнитных исследований Камчатки [1]. Удельное электрическое сопротивление морской воды составляет 0.25 Ом·м. Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным. Он закономерно уменьшается с глубиной.

Моделирование выполнено по известной программе Макки [2]. Оси сетки y и x ориентированы вдоль и поперек Камчатки. Общие размеры сетки 150 элементов по оси « Y » и 60 по оси X . Размеры элементов (ячеек) сетки 10 x 10 км, в районе сложных очертаний береговой линии они сгущались до 5 x 5 км. Такая густота сетки принята с целью её использования в дальнейшем для расчетов пробных моделей с неоднородным верхним слоем на суше. На краях сетки размеры ячеек увеличены в десятки, сотни и тысячи раз для обеспечения условий двумерности и одномерности граничных условий. Это позволило существенно ускорить сходимость итерационного процесса. Расчеты выполнены для 25 значений периодов в диапазоне от 1 до 2500 с. Для каждого фрагмента модели рассчитаны частотные кривые магнитного типпера, вещественных и мнимых частей индукционной матрицы (типпера), вещественные и мнимые индукционные стрелки, кривые кажущихся сопротивлений и фазовые кривые импеданса по направлениям осей y и x . Полученные результаты сопоставлены с данными трехмерного моделирования выполненными нами ранее в районе северной Камчатки [3]. Расхождение электрических параметров не превышает 5%, что свидетельствует о достаточной точности модельных расчетов.

Анализ данных магнитовариационного зондирования

Напомним смысл магнитовариационных параметров [4], [5]. В основе магнитовариационных исследований лежит соотношение:

$$Hz = \hat{W} \mathbf{H}_{\text{аод}}, \text{ где } \hat{W} = [W_{zx}, W_{zy}] \text{ - магнитный типпер.}$$

$$H_z = W_{zx} H_x + W_{zy} H_y,$$

где H_z , H_x , H_y - составляющие геомагнитного поля; W_{zx} , W_{zy} - компоненты матрицы, зависящие от частоты распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

По компонентам индукционной матрицы (типпера) определяются индукционные стрелки

$$\mathbf{Re} \mathbf{W} = \mathbf{Re} \mathbf{W}_{zx} + \mathbf{Re} \mathbf{W}_{zy}$$

$$\mathbf{Im} \mathbf{W} = \mathbf{Im} \mathbf{W}_{zx} + \mathbf{Im} \mathbf{W}_{zy}$$

Частотные кривые типпера, индукционных стрелки и их азимуты характеризуют особенности проявления берегового эффекта на территории Камчатки. Рассмотрим частотные кривые $\mathbf{Re} \mathbf{W}$. Они по своей форме организованы в IV группы, отвечающие зонам с разной степенью проявления берегового эффекта. На рис.1 и 2 приведены выделенные зоны и соответствующие им типичные кривые типпера.

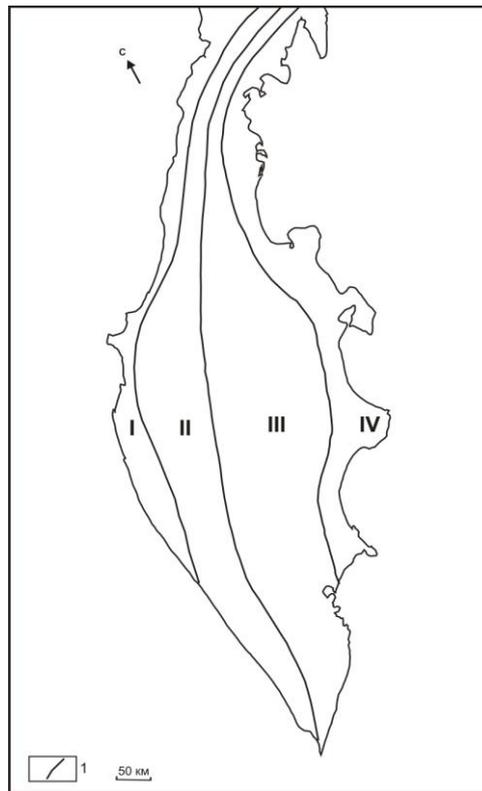


Рис. 1. Зоны Камчатки с различной степенью проявления берегового эффекта в восточных кривых магнитного типпера.

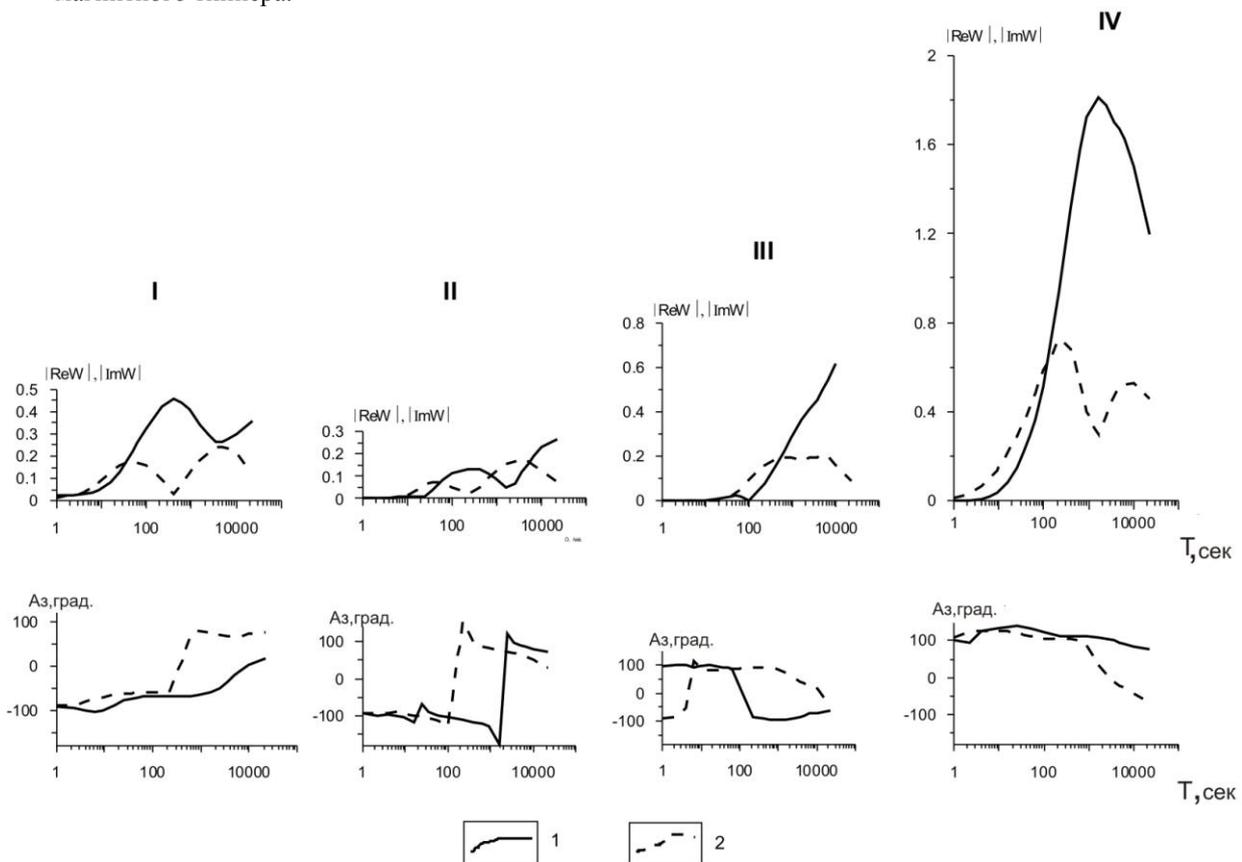


Рис. 2. Типичные частотные кривые магнитного типпера для зон, изображенных на рис.2. 1 и 2 – кривые модулей, азимутов вещественной и мнимой индукционных стрелок.

Первая зона расположена в прибрежной части Охотского моря. Здесь вещественные и мнимые стрелки на коротких периодах (до 200 с) ориентированы в сторону Охотского моря. Модули вещественной индукционной стрелки имеют хорошо выраженный максимум на периодах

400 – 500 с. Величина максимумов не превышает 0.5. Максимуму модуля вещественной индукционной стрелки отвечает минимум мнимой индукционной стрелки. При этом азимут мнимой индукционной стрелки меняется на 180° . Эти особенности стрелок характерны для двумерно-неоднородных моделей. Максимум $|\text{Re } W|$ связан с насыщением электрическим током водной толщи шельфа Охотского моря. В области низких частот вещественная и мнимая стрелки становятся неколлинарными, что обусловлено влиянием крупной трехмерной геоэлектрической неоднородности, к которой, по-видимому, можно отнести южное замыкание Камчатки.

Вторая зона расположена восточнее первой зоны. В данной зоне на кривой модуля вещественной стрелки проявляется максимум на периодах 400 – 500 с. Однако, интенсивность его в 3 – 4 раза меньше, чем в первой зоне. Максимуму $|\text{Re } W|$ отвечает также минимум на кривой $|\text{Im } W|$. Вещественная и мнимая индукционные стрелки коллинальны на высоких частотах (до 100 с). Они направлены в сторону Охотского моря. Максимум модуля вещественной стрелки связан с влиянием электрических токов, индуцированных в Охотском море. Характерно, что в области низких частот возрастают значения модуля вещественной стрелки. При этом направление стрелки меняется на 180° . Она ориентируется в сторону Тихого океана. Выявленные особенности свидетельствуют, что во второй зоне ослабляется береговой эффект со стороны Охотского моря и начинается влияние морских электрических токов, индуцированных в Тихом океане.

Третья зона находится восточнее второй зоны. Здесь на кривой $|\text{Re } W|$ не проявляется максимум, связанный с влиянием морских токов в Охотском море. Кривая $|\text{Re } W|$ представлена восходящей асимптотической ветвью. Кривая $|\text{Im } W|$ имеет максимум и нисходящую ветвь. По форме кривые $|\text{Re } W|$ и $|\text{Im } W|$ имеют вид «ножниц», что характерно для двумерной зоны. Отсутствие максимума на частотной кривой $|\text{Re } W|$ на периодах 400-500 с и восходящая ветвь в низкочастотной области свидетельствуют о полном затухании берегового эффекта со стороны Охотского моря и заметном влиянии берегового эффекта со стороны Тихого океана.

Четвертая зона расположена на восточном побережье Камчатки, включающем п-ова и заливы. Кривая модуля вещественной индукционной стрелки имеет хорошо выраженный максимум на периодах 1000 – 2000 с, связанный с насыщением электрическим током глубоководного желоба, вытянутого вдоль Камчатки в Тихом океане. Значения модуля вещественной индукционной стрелки достигают в максимуме 1.8, что указывает на сильный береговой эффект. Максимуму модуля вещественной стрелки отвечает минимум мнимой стрелки. При этом азимут мнимой стрелки меняется почти на 130° . Вещественная индукционная стрелка на коротких периодах ориентирована под азимутом примерно $100-130^\circ$, которая постепенно возрастает до 100° . В области низких частот угол составляет 120° . Выявленные особенности в поведении частотных кривых магнитного типпера свидетельствует, что в третьей зоне в магнитотеллурическом поле преобладают двумерные эффекты до периодов 1000 – 2000 с. С увеличением периода вариаций возникают трехмерные эффекты, связанные, по-видимому, с ограничением Камчатки в южном направлении.

Более наглядное представление о береговом эффекте дают схемы индукционных стрелок на периодах 100, 400, 1600 и 10000 с (рис.3). На периоде 100 с береговой эффект проявляется в прибрежных зонах Охотского моря и Тихого океана. В средней части Камчатки береговой эффект практически не выражен. На западном побережье индукционные стрелки закономерно ориентированы в сторону Охотского моря. На восточном побережье ориентация вещественных и мнимых стрелок меняется в связи со сложным очертанием береговой линии. Угол между стрелками в большинстве случаев отличается от 0 или 180° . При этом мнимые стрелки соизмеримы с вещественными стрелками. Это свидетельствует о трехмерных эффектах в связи со сложными очертаниями береговой линии.

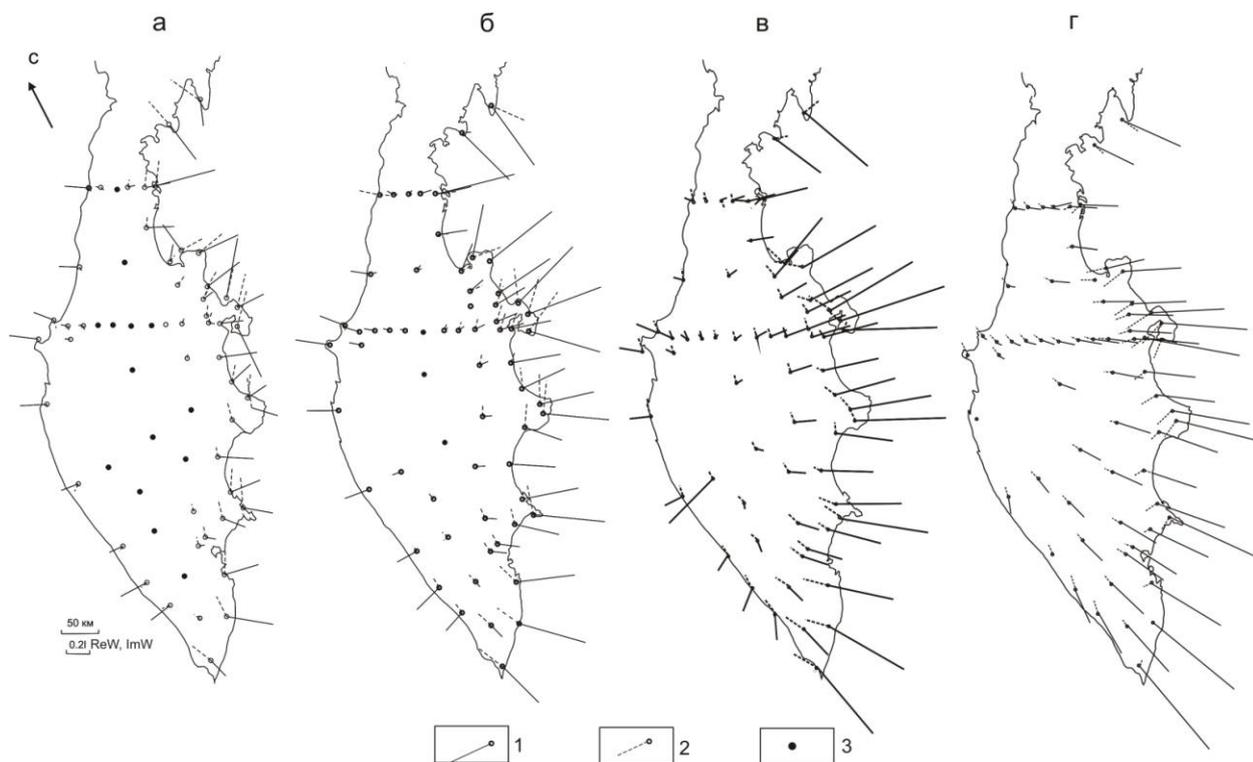


Рис.3. Схема поведения индукционных стрелок на периодах 100 с (а), 400 с (б), 1600 с (в) и 10000 с (г).

На периоде 400 с возрастает область действия берегового эффекта. Только в центральной части Камчатки сохраняется узкая зона, где не выражен береговой эффект. На западном побережье поведение индукционных стрелок практически не меняется по сравнению с их поведением на периоде 100 с. На восточном побережье (в прибрежной зоне) вещественные стрелки заметно превышают мнимые, что свидетельствует об усилении индукционного влияния электрических токов в Тихом океане.

На периоде 1600 с береговым эффектом охвачена практически вся территория Камчатки. В средней части п-ова возрастают вещественные и мнимые индукционные стрелки, связанные с береговым эффектом. На западном побережье сохраняется влияние электрических токов в Охотском море. На восточном побережье возрастают по величине вещественные стрелки, которые во много раз превышают мнимые. Это свидетельствует об усилении берегового эффекта за счет концентрации электрических токов в глубоководном желобе.

На периоде 10000 с береговой эффект усиливается. Им охвачена большая часть Камчатки. В юго-западной части Камчатки индукционные стрелки ориентируются в сторону глубоководной впадины Охотского моря. На восточном побережье затухает влияние сложных очертаний береговой линии.

По направлению вглубь Камчатки береговой эффект ослабевает. Какова природа ослабления эффекта? Согласно [6], ослабление складывается из геометрического ослабления и поглощения в проводящей среде. Геометрическое ослабление пропорционально расстоянию до источника, т.е. некоторой вытянутой полосе аномальных токов, концентрирующихся в морской воде. Геометрическое ослабление приводит к уменьшению модуля вещественной индукционной стрелки, но не меняет форму частотной характеристики. Это хорошо видно на примере кривых в зонах I и II до периода 2000 с, так как на больших периодах начинается действие берегового эффекта во II зоне со стороны Тихого океана. Поглощение проявляется в области коротких периодов. В результате поглощения максимум частотной кривой смещается в область длинных периодов. Так, в зоне IV максимум частотной характеристики модуля вещественной стрелки проявляется на периоде 2000 с, а при движении вглубь Камчатки (зона III) максимум не выражен, потому что он находится за пределами рассматриваемого диапазона периодов.

Рассмотрим каким образом на береговой эффект влияет повышение электропроводности литосферы Камчатки. С этой целью в первоначальную модель со стандартным распределением глубинной электропроводности введен слой пониженного электрического сопротивления на глубине 15 км. Мощность слоя 20 км, удельное электрическое сопротивление 10 Ом·м.

Результаты расчетов приведены на рис. 4, где изображены частотные кривые $|\text{Re } W|$ и $|\text{Im } W|$, что и на рис.3. Сравнительный анализ частотных кривых типпера свидетельствует, что появление слоя с проводимостью в 2000 Сим в литосфере Камчатки, приводит к уменьшению $|\text{Re } W|$ и $|\text{Im } W|$ в несколько раз. Это является важным признаком выявления крупных проводящих зон под Камчаткой.

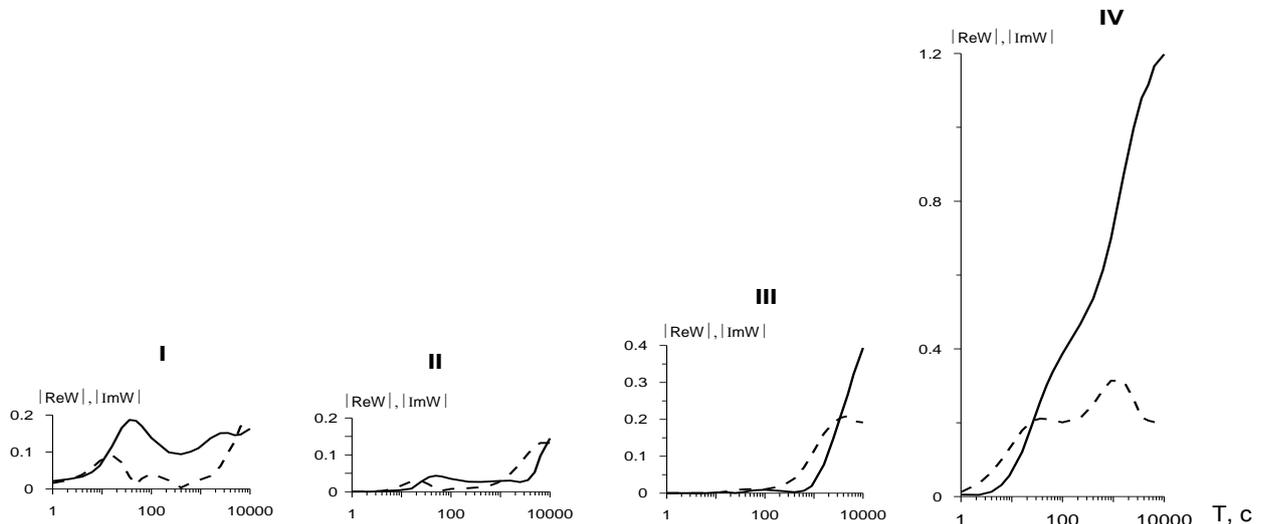


Рис. 4. Типичные частотные кривые магнитного типпера в модели Камчатки с коровым проводящим слоем. Римскими цифрами указаны номера типичных кривых, соответствующие зонам на рис.2.

Литература

1. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука. 1991. 181 с.
2. Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference 7. equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. № 29. P. 923-935.
3. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004. №6. С. 54-67.
4. Бердичевский М.М., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. М.; Недра. 1981. 327 с.
5. Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98-141.
6. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Из-во. Наукова Думка. 1975. 269 с.