

УДК 550.837

## ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО И ЛОКАЛЬНОГО БЕРЕГОВЫХ ЭФФЕКТОВ В МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ ПОЛЕ КАМЧАТКИ

Ю.Ф. Мороз<sup>1,2</sup>, О.М. Самойлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия*

<sup>2</sup> *Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия*

Представлены результаты численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля п-ова Камчатка, которое было выполнено с целью изучения трехмерного берегового эффекта. Рассматриваются две модели: в одной электропроводность повышается с глубиной, во вторую введен коровый слой с низким удельным электрическим сопротивлением.

Анализируются магнитотеллурические полярные диаграммы, характеризующие размерность изучаемой среды на границе п-ова Камчатка с акваториями Охотского моря и Тихого океана и на удалении от них.

Предпринята попытка разделить два разных по природе береговых эффекта – региональный и локальный. По поведению кривых магнитотеллурического зондирования, полученных в разных районах п-ова Камчатка, прослеживаются особенности каждого из них. Определяются периоды, на которых береговой эффект проявляется, и обсуждаются возможные причины его возникновения.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, полярные диаграммы тензора импеданса, электропроводность, береговой эффект.

### Введение

Одним из наиболее сложных вопросов при интерпретации магнитотеллурических полей в прибрежных зонах морей и океанов является учет берегового эффекта, связанного с контрастом электропроводности хорошо проводящей морской воды и относительно высокоомной среды побережья. Во второй половине прошлого века изучению берегового эффекта были посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых (см., например, [Бердичевский, Колдаев, Яковлев, 1992; Parkinson, 1962; Parkinson, Jones, 1979; Варенцов и др., 1996] и др.). Их труды базировались на экспериментальных данных, полученных на побережьях Австралии, Новой Зеландии, Калифорнии, Западной Канады, Южной Америки, Японии, России. Благодаря широким масштабам этих исследований береговой эффект удалось изучить теоретически в рамках двумерных моделей [Бердичевский, Колдаев, Яковлев, 1992]<sup>1</sup>. Однако результаты зондирований, проводимых в прибрежных районах со сложной конфигурацией береговых линий, свидетельствуют о трехмерности эффекта. Сложную трехмерную ситуацию усугубляют островные дуги и глубоководные желоба, присутствие которых приводит к возникновению сильных аномальных электромагнитных полей, искажающих информацию о глубинной электропроводности.

Изучение трехмерного берегового эффекта стало возможным благодаря разработке программ трехмерного численного моделирования, позволяющих находить наиболее эффективные подходы к решению обратной задачи. Так, на Камчатке ранее были предприняты попытки изучения поведения магнитотеллурического поля в трехмерном варианте с помощью физического и численного моделирования [Мороз, Кобзова, 1994].

<sup>1</sup> На Камчатке данный вопрос в рамках двумерной модели исследован одним из авторов в [Мороз, 1991].

Однако в связи с ограничениями, существующими в физических и пленочных математических моделях, в названной работе использовались упрощенные модели. Позже было выполнено численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля на базе объемных моделей [Мороз, Мороз, 2011] и выявлены основные особенности поведения магнитных типперов и магнитотеллурических кривых.

Исследования, представляемые в настоящей работе, показали, что магнитотеллурические параметры в западных, центральных и восточных районах п-ова Камчатка подвержены влиянию трехмерного берегового эффекта. При этом отмечено, что степень влияния рассматриваемого эффекта, отображаемого на кривых магнитотеллурического зондирования (МТЗ), зависит от периодов вариаций, конфигурации береговой линии, а также удаленности от нее и от глубоководных желобов. Наблюдаемые при проведении магнитотеллурических исследований региональные и локальные береговые эффекты требуют более глубокого и детального изучения, чему и посвящена данная статья.

### Методика численного моделирования магнитотеллурического поля Камчатки

При изучении берегового эффекта авторы использовали модель, основанную на батиметрических данных из [Селиверстов, 2013]. Для верхнего слоя на суше были приняты средние для Камчатки геоэлектрические параметры [Мороз, 1991]: мощность осадочно-вулканогенного чехла – 3 км; его удельное электрическое сопротивление – 30 Ом·м; удельное электрическое сопротивление морской воды – 0.25 Ом·м. Глубинные геоэлектрические разрезы континента и дна океана взяты из [Ваньян, 1977] для теплового потока  $60 \text{ мВт/м}^2$  и возраста дна омывающих морей и океана 40 млн. лет [Геология..., 1970 а,б; Смирнов, 1980].

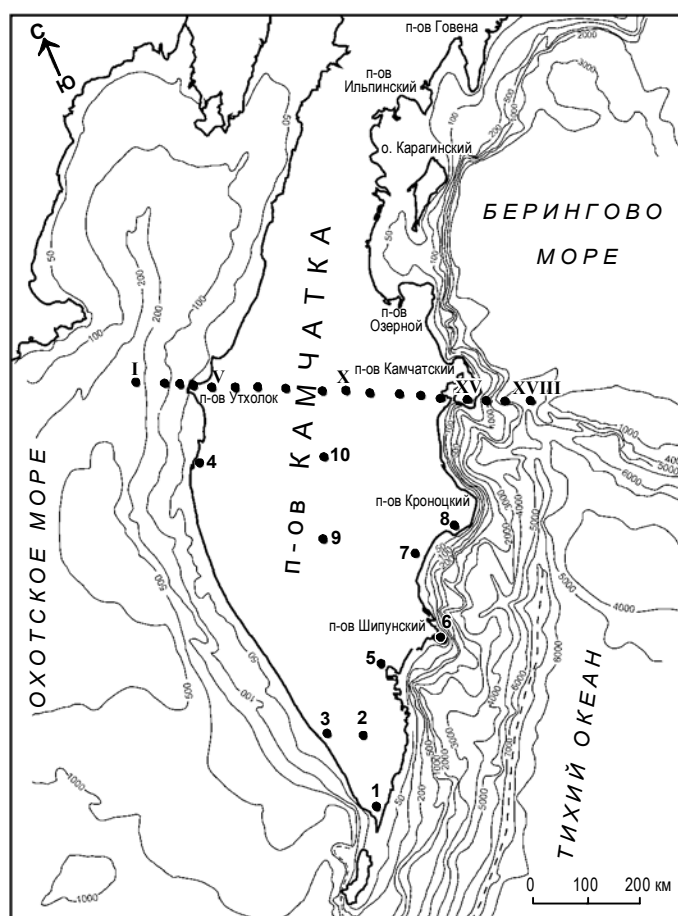
Моделирование было выполнено для региона, ограниченного  $50^\circ$  и  $62^\circ$  с.ш. и  $155^\circ$  и  $170^\circ$  в.д.; модель включала 60 ячеек по оси  $X$ , 150 по оси  $Y$  и 12 по оси  $Z$ . На суше в зависимости от положения точки относительно береговой линии размер ячеек по оси  $X$  менялся от 15 до 7.5 км; по мере удаления в акваторию Охотского моря и Тихого океана – от 15 до 200 км. По оси  $Y$  почти на всей территории суши исследуемого региона размер ячеек составлял 15 км; только на севере (крайние северные ячейки) и за южной оконечностью п-ова Камчатка размер ячеек постепенно увеличивался с 15 до 200 км.

Считалось, что осадочно-вулканогенный чехол подстилается “нормальным” глубинным геоэлектрическим разрезом, которому соответствует распределение удельного сопротивления с глубиной, характерное для наиболее стабильных регионов Земли, например, для Восточно-Европейской платформы [Ваньян, Шиловский, 1983].

При моделировании прямая задача решалась с использованием программы Макки [Mackie, Smith, Madden, 1994]; вычисления осуществлялись в диапазоне периодов от 0.1 до 10000 с. Пункты, в которых были рассчитаны модельные амплитудные и фазовые магнитотеллурические кривые, расположены на субширотном профиле “П-ов Утхолук-п-ов Камчатский” (рис. 1, т.т. I–XVIII). Необходимо отметить, что получаемые кривые отвечают двум взаимно-перпендикулярным направлениям –  $XU$  и  $YX$ . Для удобства кривые, соответствующие первому направлению, будем называть поперечными, второму – продольными.

В каждом пункте моделирования рассчитывалась также локально-нормальная кривая, отвечающая геоэлектрическому разрезу, не искаженному влиянием Охотского моря и Тихого океана.

Аналогичные расчеты были выполнены в точках 1–10, расположенных на разных удалениях от береговой линии в южном, западном, восточном и центральном районах п-ова Камчатка (см. рис. 1). Кривые, полученные в этих точках, использовались для изучения имеющих разную природу регионального и локального береговых эффектов.



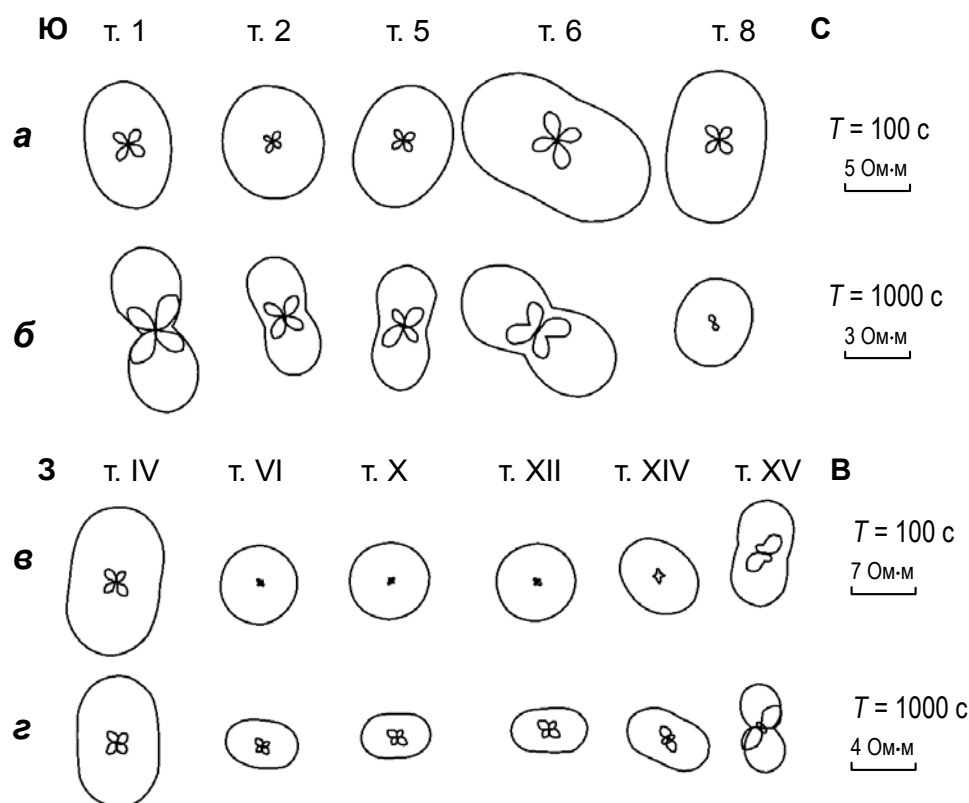
**Рис. 1.** Местоположение пунктов моделирования магнитотеллурического поля на территории п-ова Камчатка и прилегающих акваториях Охотского моря и Тихого океана

1–10 – пункты, находящиеся в южном, западном, восточном и центральном районах полуострова; I–XVIII – пункты на субширотном профиле “П-ов Утлолок – п-ов Камчатский”. Батиметрические данные (изобаты со значениями в метрах) даны по [Селиверстов, 2013]

### Магнитотеллурические полярные диаграммы

Информацию о геометрии геоэлектрических неоднородностей и относительных изменениях электропроводности по вертикали несут амплитудные полярные диаграммы тензора импеданса  $|Z_{xy}|$  и  $|Z_{xx}|$ . Сначала рассмотрим полярные диаграммы, полученные в нескольких точках, расположенных на восточном побережье п-ова Камчатка при  $T=100$  с и  $T=1000$  с (частоты 0.01 и 0.001 Гц).

В т. 1, расположенной вблизи южного окончания полуострова, при  $T=100$  с диаграмма  $|Z_{xy}|$  имеет форму овала (рис. 2, а), при  $T=1000$  с – овала с “зауженной талией” (рис. 2, б). При этом диаграмма ориентирована по нормали к границе неоднородности, что объясняется эффектом концентрации электрического тока в Охотском море и Тихом океане, являющихся зонами повышенной электропроводности [Бердичевский, Ваньян, Нгуен Тхань Ван, 1993]. Диаграмма  $|Z_{xx}|$  в обоих случаях имеет по четыре почти одинаковых лепестка, соответствующих нулевым значениям параметров асимметрии Свифта ( $skew_S$ ) и Бара ( $skew_B$ ) [Бердичевский, Дмитриев, 2009]; отмеченное означает, что в данной точке моделирования можно говорить о двумерности среды.



**Рис. 2.** Амплитудные полярные диаграммы тензора импеданса в т.т. 1–8, расположенных вдоль восточного побережья (*а, б*) и в т.т. IV–XV на субширотном профиле (*в, г*), полученные на периодах 100 с (*а, в*) и 1000 с (*б, г*). Внешняя диаграмма – диаграмма  $|Z_{xy}|$ , внутренняя –  $|Z_{xx}|$ . Положение точек см. на рис. 1

В т.т. 2, 5 при  $T=100$  с форма диаграмм иная (см. рис. 2, *а*). Диаграмма  $|Z_{xy}|$  приобретает вид почти окружности, а диаграмма  $|Z_{xx}|$  уменьшается в размере и имеет форму лепестков, стягивающихся в точку. Это указывает на то, что среда занимает промежуточное положение между одно- и двумерной. При увеличении периода до 1000 с (см. рис. 2, *б*) полярные диаграммы снова принимают вид, характерный для двумерной модели. Большая ось диаграммы  $|Z_{xy}|$  в обоих пунктах направлена по нормали к восточной береговой линии.

В т. 6 направление большой оси диаграммы  $|Z_{xy}|$  меняется (см. рис. 2, *а*) и становится перпендикулярным к побережью п-ова Шипунский. Это объясняется обтеканием полуострова электрическим током и его концентрацией в Авачинском и Кроноцком заливах. При  $T=100$  с лепестки диаграммы  $|Z_{xx}|$  почти одинаковы по размерам; при увеличении периода правильность формы диаграммы нарушается, в связи с чем можно говорить о квазитрехмерной среде.

В т. 8, находящейся на п-ове Кроноцкий, диаграммы принимают форму, близкую к характерной для двумерной среды.

Рассмотрим диаграммы, полученные в точках на профиле “П-ов Утхолк – п-ов Камчатский”, пересекающем п-ов Камчатка с запада на восток (рис. 2, *в, г*).

В точках, расположенных на концах профиля в районах п-овов Утхолок (т. IV) и Камчатский (т. XV), на обоих периодах диаграммы  $|Z_{xx}|$  ориентированы вдоль береговых линий, а в т.т. VI–XIV – почти перпендикулярно к ним. При этом форма диаграмм на западном окончании профиля (т. IV) говорит о хорошо выраженной двумерной среде – мы видим четыре одинаковых по размеру лепестка диаграммы  $|Z_{xx}|$  и овальную форму диаграммы  $|Z_{xy}|$ . На восточном окончании (т. XV) амплитудные диаграммы  $|Z_{xx}|$  имеют неправильную форму при  $T=100$  с (см. рис. 2, в) и приобретают вид “восьмерки с бантиком” при  $T=1000$  с (см. рис. 2, з). Диаграмма  $|Z_{xy}|$  при этом превращается в овал с заметно “зауженной талией”. Все это – свидетельство того, что параметры асимметрии Бара и Свифта не равны нулю, т.е. среда в районе п-ова Камчатский на восточном окончании профиля близка к трехмерной.

В т.т. VI, X, XII, XIV при  $T=100$  с (см. рис. 2, в) диаграммы  $|Z_{xx}|$  стягиваются к нулю, а диаграммы  $|Z_{xy}|$  по форме приближаются к окружности, что говорит о квазидвумерной модели. При  $T=1000$  с (см. рис. 2, з) отчетливо различаются четырехлепестковые диаграммы  $|Z_{xx}|$  и овальные  $|Z_{xy}|$ , указывающие на двумерность среды. Большая ось диаграмм  $|Z_{xy}|$  направлена по нормали к береговой линии, где в водной толще концентрируется ток.

Авторами были проанализированы также полярные диаграммы фазового тензора  $\phi_{xx}$  и  $\phi_{xy}$ , на которых по-иному, но прослеживаются геоэлектрические особенности, нашедшие отражение в поведении амплитудных диаграмм.

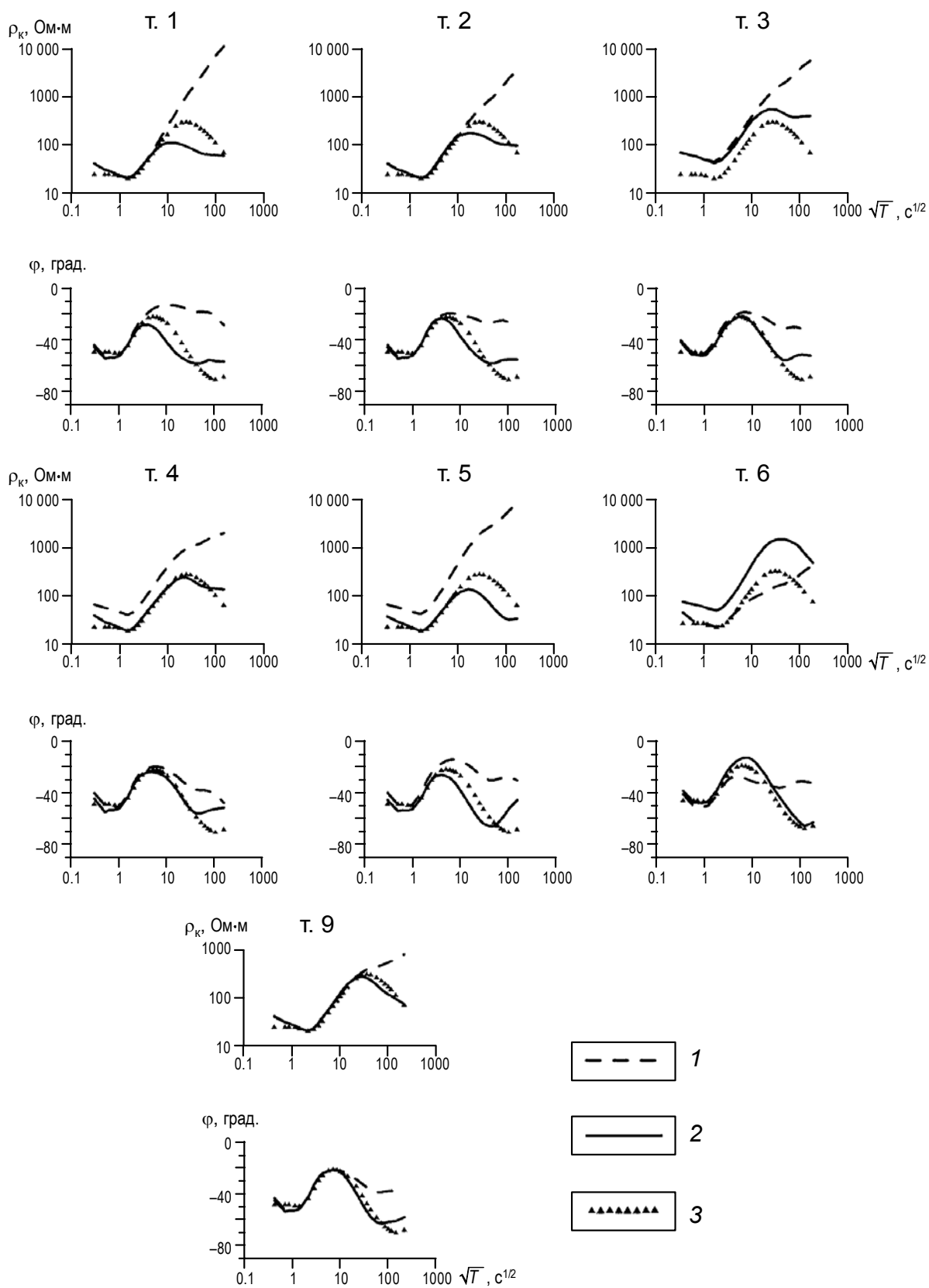
### Региональный береговой эффект

Согласно имеющимся батиметрическим данным, глубина морского дна в акватории Охотского моря в районе западного побережья п-ова Камчатка не превышает 500 м, а в акватории Тихого океана достигает 7 км (см. рис. 1). Здесь располагается Курило-Камчатский глубоководный желоб, который вытянут вдоль полуострова почти на 700 км и в своей северной части сочленяется с Алеутским глубоководным желобом. П-ов Камчатка представляет собой вытянутую в северо-восточном направлении трехмерную неоднородность с максимальной шириной 430 км. На северо-востоке эта неоднородность сужается до 100 км, образуя так называемый Камчатский перешеек, на юге замыкается в виде угла. Западная береговая линия имеет плавную форму, здесь имеется лишь небольшой п-ов Утхолок. Восточная же отличается весьма сложной конфигурацией – выделяется целый ряд полуостровов (Говена, Ильпинский, Озерной, Камчатский, Кроноцкий, Шипунский), разделяемых заливами.

О влиянии трехмерного регионального эффекта, связанного с очертаниями береговой линии п-ова Камчатка и присутствием глубоководных желобов, можно судить по модельным кривым, полученным для т.т. 9, 10<sup>1</sup>, расположенных в средней части полуострова на удалении от побережья (рис. 3).

---

<sup>1</sup> Поскольку форма кривых в названных точках практически одинакова, на рис. 3 представлены кривые только для т. 9. Положение точек см. на рис. 1.



**Рис. 3.** Модельные поперечные (1), продольные (2) и локально-нормальные (3) кривые магнито-теллурического зондирования (МТЗ), полученные в точках, расположенных в разных районах п-ова Камчатка. Положение точек см. на рис. 1

В т. 9 (см. рис. 3) расхождение между амплитудной поперечной и локально-нормальной кривыми при  $T=10000$  с достигает почти половины порядка. Фазовая поперечная кривая начинает отклоняться от локально-нормальной на периоде  $\sim 80$  с. Примечательно, что продольные амплитудная и фазовая кривые в низкочастотной области подобны локально-нормальным кривым. Эти особенности характерны для берегового эффекта в двумерных моделях. Необходимо отметить, что на продольных амплитудной и фазовой кривых в области длинных периодов проявился минимум. При этом фазовая кривая при  $T > 1000$  с отличается наличием восходящей ветви, пересекающей локально-нормальную кривую, что может быть связано с влиянием регионального трехмерного эффекта.

Еще сильнее влияние трехмерного берегового эффекта проявляется в южной части п-ова Камчатка, что прослеживается по кривым, полученным в т.т. 1, 2 (см. рис. 3). В этих точках на больших периодах отмечаются наиболее крутые углы наклона восходящих ветвей поперечных кривых; на продольных амплитудных кривых прослеживается минимум при  $T=4900$  с, на фазовых – при  $T=1600$  с. Можно видеть, что поперечная и продольная кривые в короткопериодном диапазоне почти совпадают с локально-нормальной кривой – отклонение обеих кривых от нее начинается с периодов 200–300 с. При этом поперечная кривая с ростом периода вариаций “затягивается” вверх по уровню сопротивлений.

Вблизи западной береговой линии п-ова Камчатка (т.т. 3, 4) на амплитудных продольных и поперечных кривых проявляются гальванические эффекты, выраженные их смещением относительно локально-нормальной кривой. Можно видеть, что в короткопериодном диапазоне фазовые продольные и поперечные кривые практически совпадают. Характерно, что в этой части полуострова трехмерный региональный береговой эффект заметно усиливается и проявляется на периодах 2500 с как на амплитудных, так и на фазовых кривых.

### Локальный береговой эффект

Как уже отмечалось, восточное побережье п-ова Камчатка характеризуется сложными очертаниями береговой линии и наличием небольших полуостровов, разделенных морскими заливами. Индуцированные морские электрические токи обтекают эти полуострова и концентрируются в заливах, создавая локальные трехмерные эффекты, которые в зависимости от места наблюдения разным образом проявляются на продольных и поперечных кривых (рис. 3, т.т. 5, 6<sup>1</sup>).

Влияние локального берегового эффекта начинается с периодов, составляющих первые десятки секунд, и проявляется в отклонении продольной и поперечной кривых от локально-нормальной. В заливах поперечная кривая в области больших периодов занимает более высокий уровень, что обусловлено действием концентрирующихся здесь токов. Следует обратить внимание на то, что в районе восточных полуостровов и заливов проявился и региональный береговой эффект, выраженный на длинных периодах ( $T=2500–15000$  с) отклонением продольных или поперечных амплитудных и фазовых кривых от локально-нормальных значений. Видно, что в районе восточных полуостровов в большинстве случаев продольные кривые по своей форме близки к локально-нормальной кривой. Это позволяет получать приближенную информацию о распределении электропроводности с глубиной по экспериментальным кривым.

<sup>1</sup> В т.т. 7, 8, расположенных также на восточном побережье, получены кривые, по форме практически совпадающие с приведенными, в связи с чем в данной статье они не приводятся.

### Анализ кривых магнитотеллурических зондирований, полученных по субширотному профилю “П-ов Утхолок – п-ов Камчатский”

Напомним, что моделирование было выполнено для двух моделей: в первой электропроводность повышалась с глубиной (Модель 1), во вторую был введен коровый слой с низким значением  $\rho$  (Модель 2). Далее сначала приводится анализ кривых МТЗ, полученных для этих моделей в точках на субширотном профиле “П-ов Утхолок – п-ов Камчатский”, которые дают более полное представление о влиянии берегового эффекта со стороны Охотского моря и Тихого океана.

**Модель 1.** Рассмотрим основные особенности кривых МТЗ в точках профиля в направлении с запада на восток. Отметим, что расчеты выполнены для всех точек профиля, но поскольку кривые в близко расположенных точках почти совпадают по форме, в статье приводятся наиболее выразительные из них.

На шельфе Охотского моря (рис. 4, т.т. I–III) продольные и поперечные кривые практически совпадают с локально-нормальной кривой во всем диапазоне периодов. Действие регионального берегового эффекта проявляется в поведении поперечной кривой, занимающей более низкий уровень относительно локально-нормальной при  $T > 50$  с в т. I и  $T > 100$  с в т. II. Это объясняется перераспределением индуцированного электрического тока в зоне шельфа в связи с высокой проводимостью верхнего слоя, включающего толщи морской воды и осадочного чехла. Можно видеть, что в т. III влияние регионального берегового эффекта еще больше усиливается.

В т. IV, находящейся на п-ове Утхолок, и продольная, и поперечная амплитудные кривые расположены выше локально-нормальных, что является результатом влияния локального гальванического эффекта. При этом обе фазовые кривые – продольная и поперечная – совпадают с локально-нормальной кривой в короткопериодной области. В длиннопериодном диапазоне проявился локальный береговой эффект, вследствие чего изменилась форма продольной кривой по сравнению с локально-нормальной.

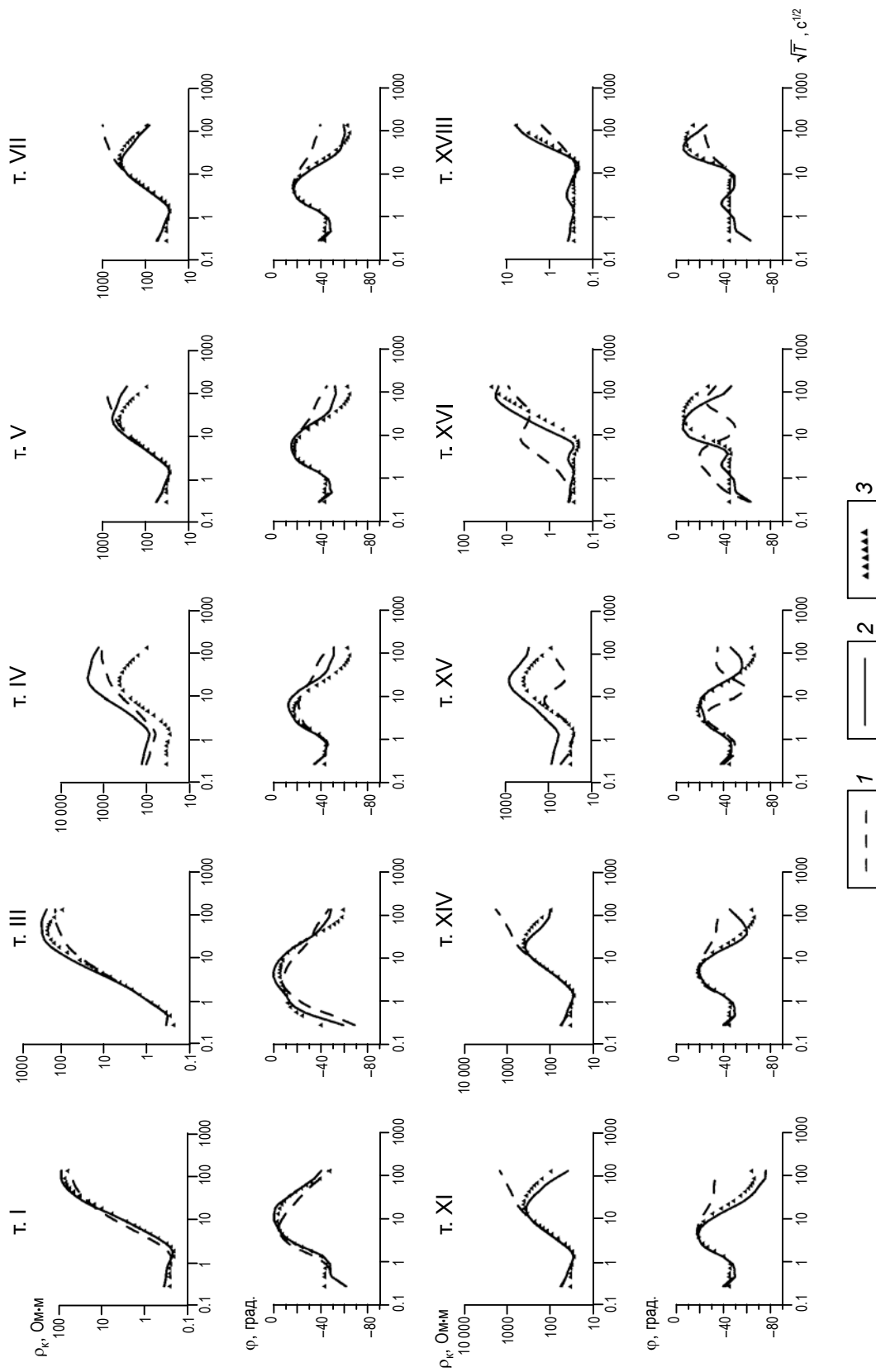
В направлении от т. V к т. XIV (с запада на восток) отмечается влияние только регионального берегового эффекта, приводящее к появлению в области длинных периодов восходящей ветви поперечной кривой. Это связано с кондуктивным взаимодействием токов, перетекающих из океана, где концентрируется океанический ток, в осадочно-вулканогенный чехол континента. Эффект начинает проявляться с периодов  $\sim 400$ – $500$  с – продольная кривая отклоняется вниз от локально-нормальной кривой (в сторону уменьшения  $\rho_k$ ).

Наблюдаемый эффект связан с индуктивным взаимодействием токов через их магнитное поле. В прибрежной зоне п-ова Камчатка магнитное поле возрастает, а электрическое убывает, заметно понижая уровень ветви продольной кривой в диапазоне периодов  $400$ – $10000$  с. По направлению к побережью Тихого океана влияние регионального берегового эффекта усиливается, что проявляется в больших отклонениях продольной и поперечной кривых за счет действия индукционного и  $S$ -эффектов.

Важно, что поведение кривых МТЗ на большей части профиля, за исключением п-овов Утхолок и Камчатский, подобно поведению аналогичных кривых для двумерно-неоднородной модели п-ова Камчатка [Мороз, 1991]. Продольные кривые близки к локально-нормальной и более корректно отображают распределение электропроводности с глубиной.

На п-ове Камчатский (т. XV) в поведении кривых выражен локальный береговой эффект, связанный с обтеканием этого полуострова индукционными электрическими токами. Влияние локального берегового эффекта проявляется начинающимся на коротких периодах отклонением продольной кривой от локально-нормальной.





**Рис. 4.** Модельные поперечные (1), продольные (2) и локально-нормальные (3) кривые МГЗ, полученные в точках на профиле «П-ов Утхолок – п-ов Камчатский». Расчеты выполнены для Модели 1. Положение точек см. на рис. 1

На шельфе Тихого океана форма поперечной кривой (т. XVI, см. рис. 4) подобна форме поперечной кривой на п-ове Камчатский (т. XV), что связано с влиянием локального берегового эффекта, вызванного индуцированным электрическим током. Продольная кривая сравнительно близка к локально-нормальной, за исключением правой части длиннопериодного диапазона. Здесь она пересекается с локально-нормальной кривой, что может быть результатом влияния регионального трехмерного берегового эффекта, обусловленного геоэлектрической неоднородностью области сочленения Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов. Это может быть и следствием ограниченных размеров сетки моделирования. По мере смещения пунктов наблюдения в Тихий океан (т.т. XVII, XVIII) локальный береговой эффект гаснет, а региональный усиливается, что наглядно иллюстрируется поведением амплитудных кривых (см. рис. 4, т. XVIII).

**Модель 2.** Рассмотрим теперь поведение кривых МТЗ, полученных при моделировании с использованием модели исследуемого региона, содержащей на глубине 25 км коровый проводящий слой мощностью 20 км с удельным электрическим сопротивлением 20 Ом·м. Соответствующие продольные, поперечные и локально-нормальные амплитудные и фазовые кривые приведены на рис. 5.

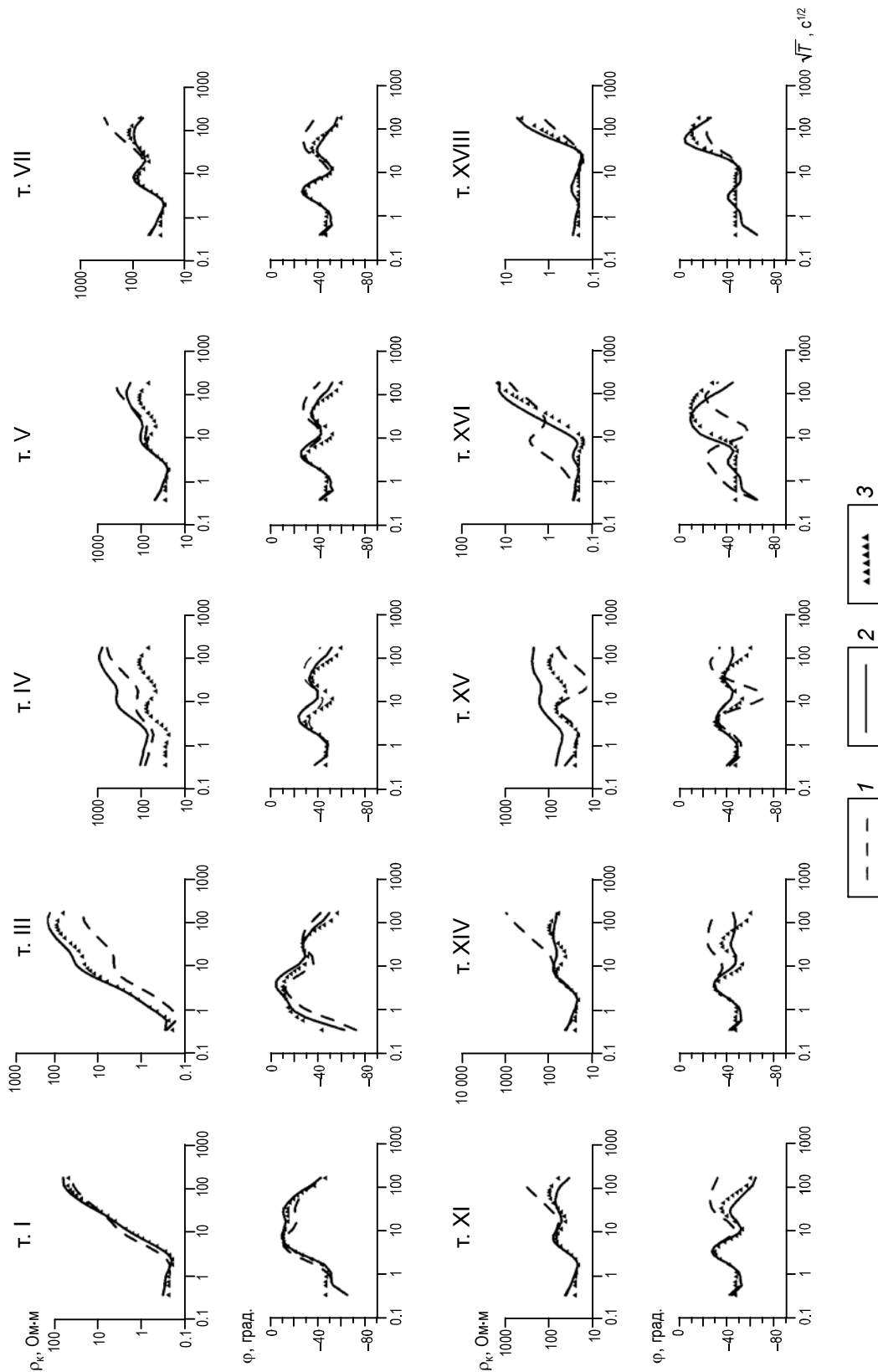
Напомним, что, как и в вышеприведенном описании результатов моделирования по пересекающему п-ов Камчатка субширотному профилю, кривые для соседних точек, имеющие близкую форму, не приводятся.

На большинстве точек профиля (т.т. I–XVI) форма кривых в диапазоне периодов 100–500 с в той или иной степени явно отображает присутствие корового слоя. Исключение составляют кривые для шельфовой зоны Тихого океана, где в рассматриваемом диапазоне периодов коровый слой не проявился из-за высокой проводимости толщи морской воды. На большей части сухопутного профиля (т.т. V–XIV) продольные кривые при  $T=1-1500$  с практически совпадают с локально-нормальной кривой. Это обусловлено тем, что индукционный эффект от влияния электрических токов в Охотском море и Тихом океане по существу гаснет на фоне более сильного индукционного влияния электрических токов в коровом проводящем слое. Поперечные кривые в центральной части сухопутного профиля (т.т. VII–XII) в этой области частот также близки к локально-нормальной кривой за счет кондуктивного взаимодействия электрических токов, индуцированных в толще морской воды и коровом проводнике.

При приближении пунктов наблюдения к побережьям Охотского моря и Тихого океана усиливается региональный береговой эффект, благодаря которому поперечные и продольные кривые отклоняются от локально-нормальной. При этом, чем ближе к береговой линии, тем на более ранних периодах поперечные кривые начинают отклоняться от локально-нормальных значений. На продольных кривых региональный береговой эффект выражен при  $T>1500$  с. Характерно, что на п-овах Утхолок и Камчатский локальный береговой эффект при наличии корового слоя не затухает и выражен в поведении как продольной, так и поперечной кривых.

### Заключение

Как показали результаты численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля п-ова Камчатка, импедансные кривые в сильной степени подвержены влиянию трехмерного берегового эффекта, возникающего в силу контраста электропроводности суши и морской воды.



**Рис. 5.** Модельные поперечные (1), продольные (2) и локально-нормальные (3) кривые МТЗ, полученные в точках на профиле “П-ов Угтолок – П-ов Камчатский”. Расчеты выполнены для Модели 2. Положение точек см. на рис. 1

В рамках настоящей работы авторам удалось разделить имеющие разную природу региональный и локальный береговые эффекты. Главное различие между ними связано с диапазонами периодов, на которых проявляется их влияние. Так, искажение амплитудных и фазовых кривых под влиянием регионального эффекта наблюдается в области больших периодов –  $T > 400$  с. При этом его влияние проявляется отклонением продольных и поперечных амплитудных и фазовых кривых от локально-нормальных: поперечные кривые в длиннопериодной области сильно “затянуты” вверх по уровню сопротивления, а продольные отклоняются от локально-нормальной кривой в сторону его уменьшения.

Локальный эффект, в свою очередь, начинает действовать на длинных периодах от первых десятков секунд и проявляется разным положением поперечных кривых относительно локально-нормальных на полуостровах и в заливах. Так, на полуостровах поперечная амплитудная кривая в длиннопериодном диапазоне расположена ниже локально-нормальной кривой, а в заливах занимает более высокий уровень. Важно отметить, что под влиянием локального берегового эффекта возможно изменение формы амплитудных и фазовых кривых по сравнению с локально-нормальной.

Анализ магнитотеллурических кривых, полученных после введения в модель слоя повышенной электропроводности (Модель 2), показал, что влияние регионального берегового эффекта заметно ослабевает, но по мере приближения к береговой линии его влияние на поведение поперечной кривой снова усиливается. Локальный эффект не затухает и проявляется в поведении как поперечных, так и продольных кривых.

В средней части п-ова Камчатка поведение продольной и поперечной кривых подобно поведению кривых для двумерно-неоднородной модели. При изучении глубинной электропроводности это дает основание использовать численное двумерное моделирование и инверсию, как это было сделано в эксперименте ЭМСЛАБ на Тихоокеанском побережье США [Варенцов и др., 1996].

В прибрежной зоне п-ова Камчатка, отличающейся сложной конфигурацией береговой линии, для интерпретации магнитотеллурических данных необходимо привлечение модели с трехмерным распределением электропроводности верхнего слоя.

Полученные в настоящем исследовании результаты представляют научно-практический интерес и могут быть использованы при интерпретации данных магнитотеллурического зондирования в области перехода от континента к океану.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-35-00088, 16-05-00059) и ДВО РАН (проект № 15-И-2-008).

### Литература

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
- Бердичевский М.Н., Колдаев Д.С., Яковлев А.Г. Магнитотеллурическое зондирование на берегу океана // Физика Земли. 1992. № 6. С.87–96.
- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Нгуен Тхань Ван. Фазовые полярные диаграммы магнитотеллурического импеданса // Физика Земли. 1993. № 2. С.19–23.
- Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1977. 219 с.
- Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Наука, 1983. 88 с.

- Варенцов Ив.М., Голубев Н.Г., Гордиенко В.В., Соколова Е.Ю. Исследование глубинной геоэлектрической структуры вдоль профиля Линкольн Лайн (эксперимент EMSLAB) // Физика Земли. 1996. № 4. С.124–144.
- Геология СССР. Северо-Восток СССР. Геологическое описание. Т. 30. Кн. I. М.: Недра, 1970а. 547 с.
- Геология СССР. Северо-Восток СССР. Геологическое описание. Т. 30. Кн. II. М.: Недра, 1970б. 536 с.
- Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Мороз Ю.Ф., Кобзова В.М. Физическое и численное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С.86–98.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С.64–71.
- Селиверстов Н.И. Подводные морфоструктуры Кулило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. 162 с.
- Смирнов Я.Б. Карта глубинных температур территории СССР и сопредельный районов в масштабе 1:100000. М.: ГУГЛ, 1980. 150 с.
- Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. N 4. P.923–935.
- Parkinson W.D. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1962. V. 6. P.441–449.
- Parkinson W.D., Jones F.W. The geomagnetic coast effect // Reviews of geophysics and space physics. 1979. V. 17, N 8. P.1999–2015.

#### Сведения об авторах

**МОРОЗ Юрий Федорович** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(4152) 30-25-02. E-mail: morozyf@kscnet.ru; Геологический институт СО РАН. 670047, г. Улан-Удэ, ул. Павлова, д. 2. Тел.: +7(3012) 43-62-64. E-mail: morozyf17@mail.ru

**САМОЙЛОВА Ольга Михайловна** – младший научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: +7(4152) 30-25-02. E-mail: olgasm415@mail.ru

## FEATURES OF REGIONAL AND LOCAL COAST EFFECTS IN MAGNETOTELLURIC FIELD OF KAMCHATKA

Yu.F. Moroz<sup>1,2</sup>, O.M. Samoylova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Geology SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

**Abstract.** The results of three dimensional numerical modeling of Kamchatka magnetotelluric (MT) field are considered in the study of three dimensional coast effect. We used two models. The first one has conductivity rising with the depth, the second one includes conductive layer in the crust. We attempted to divide the coast effect into regional and local components and present the analysis of MT polar diagrams that characterize the medium dimensionality at the boundary between the Okhotsk Sea and Pacific Ocean and the distant coastline. Also we give detailed description of modelled amplitude and phase MT curves obtained in western, central, southern, and eastern Kamchatka areas. The behavior of these curves outlines peculiarities of regional and local coast effects. The periods of the coast effect manifestation are determined and possible reasons for its origin are discussed.

**Keywords:** magnetotelluric sounding, impedance tensor polar diagrams, conductivity, coast effect.

## References

- Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. *Models and Methods of Magnetotellurics*, Berlin: Springer, 2008.
- Berdichevsky M.N., Koldaev D.S., and Yakovlev A.G. Magnetotelluric soundings of an oceanic coast, *Izv. Phys. Solid Earth*, 1992, no. 6, pp. 87-96.
- Berdichevsky M.N., Vanyan L.L., and Nguen Than Van. Polar phase diagrams of MT impedance, *Izv. Phys. Solid Earth*, 1993, no. 2, pp. 19-28.
- Geologya SSSR. Severo-Vostok SSSR. Geologicheskoe opysanie* (Geology of the USSR. North-East of the USSR. Geological description), vol. 30, book I, Moscow: Nedra, 1970a.
- Geologya SSSR. Severo-Vostok SSSR. Geologicheskoe opysanie* (Geology of the USSR. North-East of the USSR. Geological description), vol. 30, book II, Moscow: Nedra, 1970b.
- Mackie K.L., Smith J.T., and Madden T.R. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example, *Radio Science*, 1994, no. 4, pp. 923-935.
- Moroz Yu.F. *Electroprovodnost zemnoi kory i verkhnei mantii Kamchatky* (Conductivity of Kamchatka crust and upper mantle), Moscow: Nayka, 1991.
- Moroz Yu.F. and Kobzova V.M. Physical and numeric modeling of the magnetotelluric field of Kamchatka, *Volcan. Seismol.*, 1994, no. 2, pp. 86-98.
- Moroz Yu.F. and Moroz T.A., Numerical 3D modeling of the magnetotelluric field in Kamchatka, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 138-146.
- Parkinson W.D. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 1962, vol. 6, pp. 441-449.
- Parkinson W.D. and Jones F.W. The geomagnetic coast effect, *Reviews of geophysics and space physics*, 1979, vol. 17, no. 8, pp. 1999-2015.
- Seliverstov N.I. *Podvodnye morfostruktury Kurilo-Kamchatskoi i Aleutskoi ostrovnnykh dug* (Underwater morphostructures of Kurilo-Kamchatskaya and Aleutskaya island arc). Petropavlovsk-Kamchatskii: IVS FEB RAS, 2013.
- Smirnov Ya.B. *Karta glubinykh temperatur territorii SSSR i sopridelnykh raionov v masshtabe 1:100000* (Map of deep temperatures of USSR territories and adjacent regions in scale of 1:100000), Moscow: GUGL, 1980.
- Vanyan L.L. *Electromagnitnye zondirovaniya* (Electromagnetic soundings), Moscow: Naychnyi mir, 1977.
- Vanyan L.L. and Shilovskii P.P. *Glubinnaya elektroprovodnost okeanov i kontinentov* (Deep conductivity of oceans and continents), Moscow: Nayka, 1983.
- Varentsov Iv.M., Golubev N.G., Gordienko V.V., and Sokolova E.Yu. Study of the deep geoelectrical structure along Linkoln Line profile (EMSLAB experiment), *Izv. Phys. Solid Earth*, 1996, no. 4, pp. 124-144.