

УДК 550 837

## ЧИСЛЕННОЕ ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КАМЧАТКИ

© 2011 г. Ю. Ф. Мороз, Т. А. Мороз

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

Поступила в редакцию 12.01.2010 г.

Рассмотрены основные особенности в поведении магнитных типперов и кривых МТЗ в связи с резким контрастом электропроводности суши и морской воды Охотского моря и Тихого океана, омывающих Камчатку. Выделены зоны с различной степенью проявления берегового эффекта. В большей мере он выражен на Восточной Камчатке в связи с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в глубоководном Камчатском желобе. На Восточной Камчатке в магнитотеллурическом поле проявились также трехмерные эффекты из-за сложных очертаний береговой линии. Эти эффекты в геоманнитных вариациях с увеличением периода затухают и гаснут. Однако, в магнитотеллурическом поле в низкочастотном диапазоне появляются эффекты, связанные с обтеканием электрическим током Камчатки. Показано, что поперечные кривые МТЗ на всей территории Камчатки подвержены действию эффекта “S” в низкочастотной области и не характеризуют глубинный геоэлектрический разрез. Продольные кривые МТЗ только в средней части Западной и Центральной Камчатки слабо подвержены индукционному эффекту и отражают распределение глубинной электропроводности. На восточном побережье Камчатки продольные и поперечные кривые МТЗ в сильной мере искажены трехмерными эффектами в связи с заливами и полуостровами. Интерпретация МТЗ здесь возможна лишь с привлечением трехмерного численного моделирования МТ-поля.

### ВВЕДЕНИЕ

Камчатка расположена в области перехода от материка к Тихому океану и характеризуется сложным геологическим строением. Для изучения глубинной электропроводности региона используются методы магнитотеллурического (МТЗ) и магнитовариационного (МВЗ) зондирования. Проблемы интерпретации зондирования связаны с влиянием геоэлектрических неоднородностей. В первую очередь к ним следует отнести резкий контраст проводимости верхнего слоя на суше и водной толщине в акваториях Охотского моря и Тихого океана. Этот контраст составляет 3–4 порядка. Он проявляется в виде берегового эффекта. Ситуация осложняется еще и тем, что восточное побережье Камчатки со стороны Тихого океана имеет сложное очертание береговой линии с заливами и полуостровами. Здесь возникают различного рода эффекты, затрудняющие интерпретацию кривых МТЗ и МВЗ.

Ранее нами были предприняты попытки изучения влияния неоднородного верхнего слоя на поведение магнитотеллурического поля с помощью физического и численного пленочного моделирования [Мороз, Кобзова, 1994]. Однако, в этих работах были использованы упрощенные модели в связи с ограничениями, существующими в физических и пленочных моделях. Полученные результаты не дают полного представления о поведении кривых МТЗ и МВЗ. Поэтому для изучения берегового эффекта привлечено трехмерное численное модели-

рование магнитотеллурического поля. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

### 1. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ КАМЧАТКИ И МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В основу моделирования МТ-поля Камчатки положена батиметрическая карта, изображенная на рис. 1. На ней видно, что в районе западного побережья Камчатки (в акватории Охотского моря) глубины морского дна не превышают 500 м. В акватории Тихого океана глубины морского дна достигают 7 км. Здесь располагается глубоководный желоб, вытянутый вдоль Камчатки на расстояние почти 700 км. Он в своей северо-восточной части сочленяется с Алеутским глубоководным желобом. Камчатка представляет собой вытянутую в северо-восточном направлении трехмерную неоднородность, максимальная ширина которой составляет 430 км. На северо-востоке она сужается до 100 км, образуя, так называемый, Камчатский перешеек, а на юге замыкается в виде угла. Западная береговая линия Камчатки имеет плавную форму (здесь выделяется лишь небольшой полуостров Утхолок), а восточная имеет весьма сложную форму. В ее поведении выделяются п-ова Говена, Ильпинский, Озерной, Камчатский, Кроноцкий, Шипунский, между которыми располагаются заливы.

Трехмерная модель Камчатки характеризуется следующими геоэлектрическими параметрами.

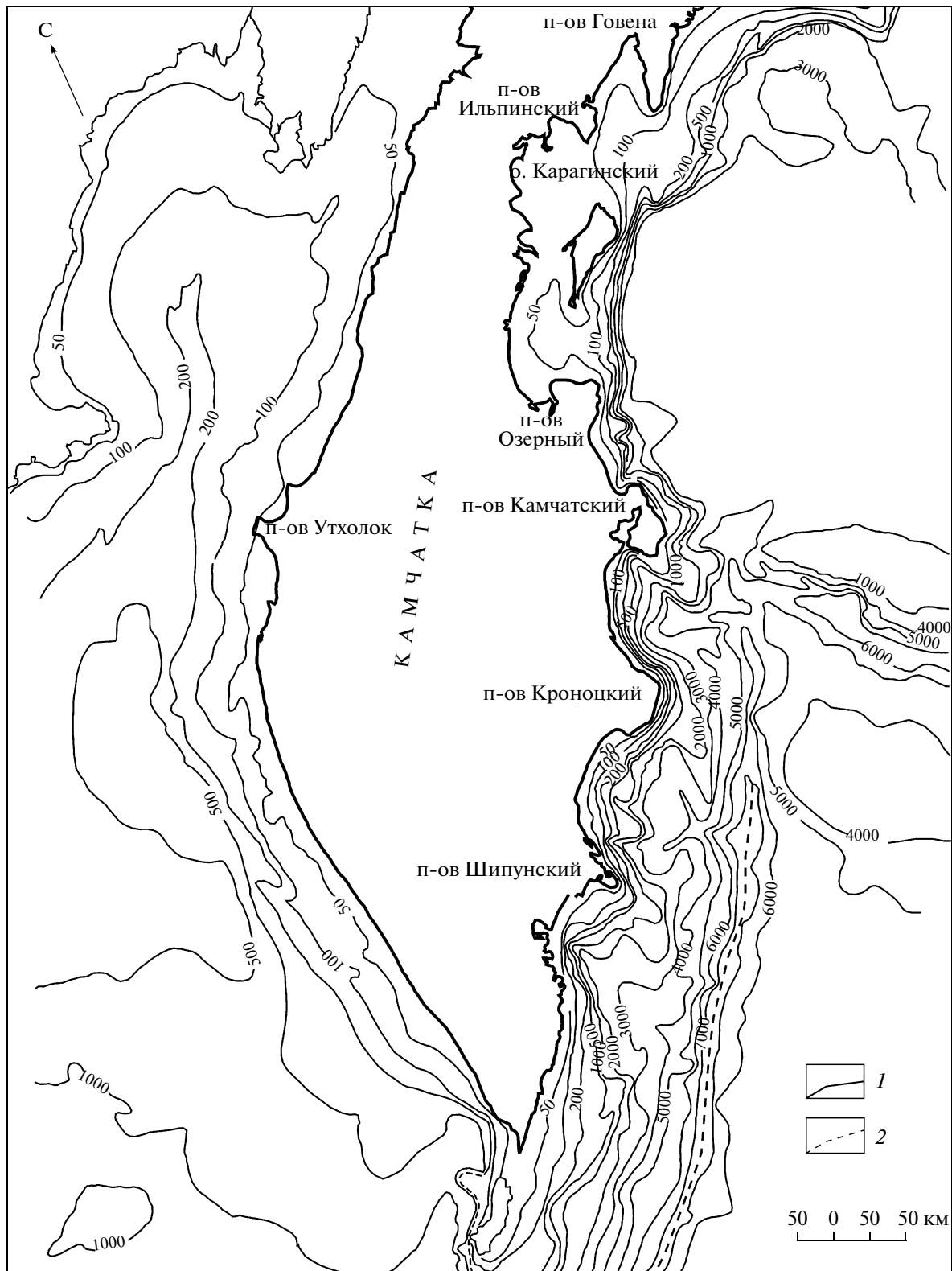


Рис.1. Батиметрическая карта акваторий Камчатки: 1 – изобаты, 2 – ось Камчатского глубоководного желоба.

Мощность и удельное электрическое сопротивление верхнего слоя приняты на суше постоянными, чтобы оценить влияние берегового эффекта неза-

висимо от влияния геоэлектрических неоднородностей в осадочно-вулканогенном чехле Камчатки. Верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а

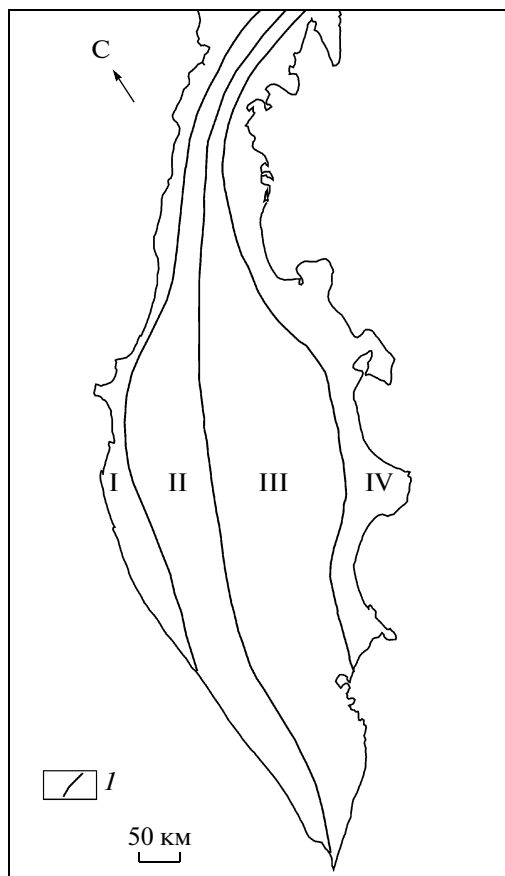


Рис. 2. Зоны Камчатки с различной степенью проявления берегового эффекта в частотных кривых магнитного типпера: 1 – границы зон.

удельное электрическое сопротивление составляет 30 Ом м. Эти параметры являются примерно средними по данным электромагнитных исследований Камчатки [Мороз, 1991]. Удельное электрическое сопротивление морской воды составляет 0.25 Ом м. Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным [Рокитянский, 1975; Мороз; 1994]. Вертикальные толщины слоев в модели приняты сверху вниз следующими: 0.1, 0.2, 0.2, 1.5, 1, 1, 1, 1, 80, 120, 100, 100, 300 км.

Моделирование выполнено по известной программе Макки [MacKie et al., 1994]. Оси сетки  $Y$  и  $X$  ориентированы, соответственно, вдоль и поперек Камчатки. Общие размеры сетки: 150 элементов по оси  $Y$  и 60 по оси  $X$ . Размеры ячеек сетки составляют  $10 \times 10$  км, в районе сложных очертаний береговой линии они сгущались до  $5 \times 5$  км. Такая густота сетки принята с целью ее 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, выполненного нами ранее в районе северной Камчатки [Мороз, Нурмухамедов, 2004]: расхождение электрических параметров не превышает 5%, что свидетельствует о достаточной точности модельных расчетов.

## 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ МАГНИТОВАРИАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Напомним смысл магнитовариационных параметров [Бердичевский, Жданов, 1981; Vozoff, 1972; Schmucker, 1970; Wiese, 1965; Parkinson, 1959]. В основе магнитовариационных исследований лежит соотношение:

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

где  $\mathbf{W} = |W_{zx}, W_{zy}|$  – магнитный типпер,  $H_z, H_x, H_y$  – составляющие геомагнитного поля;  $W_{zx}, W_{zy}$  – компоненты матрицы, зависящие от частоты распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

По компонентам индукционной матрицы определяются индукционные стрелки:

$$\text{ReW} = \text{Re} W_{zx} 1_x + \text{Re} W_{zy} 1_y,$$

$$\text{ImW} = \text{Im} W_{zx} 1_x + \text{Im} W_{zy} 1_y.$$

Частотные кривые типпера, индукционных стрелок и их азимутов характеризуют особенности проявления берегового эффекта на территории Камчатки. Рассмотрим частотные кривые  $\text{ReW}$ . Они по своей форме организованы в IV группы, отвечающие зонам с разной степенью проявления берегового эффекта. На рис. 2 и рис.3 приведены выделенные зоны и соответствующие им типичные кривые типпера.

Первая зона расположена в прибрежной части Охотского моря. Здесь вещественные и мнимые стрелки на коротких периодах (до 200 с) ориентированы в сторону Охотского моря. Вещественная индукционная стрелка имеет хорошо выраженный максимум на периодах 400–500 с, равный 0.45. Максимуму модуля вещественной индукционной стрелки отвечает минимум мнимой индукционной стрелки. При этом азимут мнимой индукционной стрелки меняется на  $180^\circ$ . Эти особенности стрелок характерны для двумерно-неоднородных моделей. Максимум  $|\text{ReW}|$  связан с насыщением электрическим током водной толщи шельфа Охотского моря.

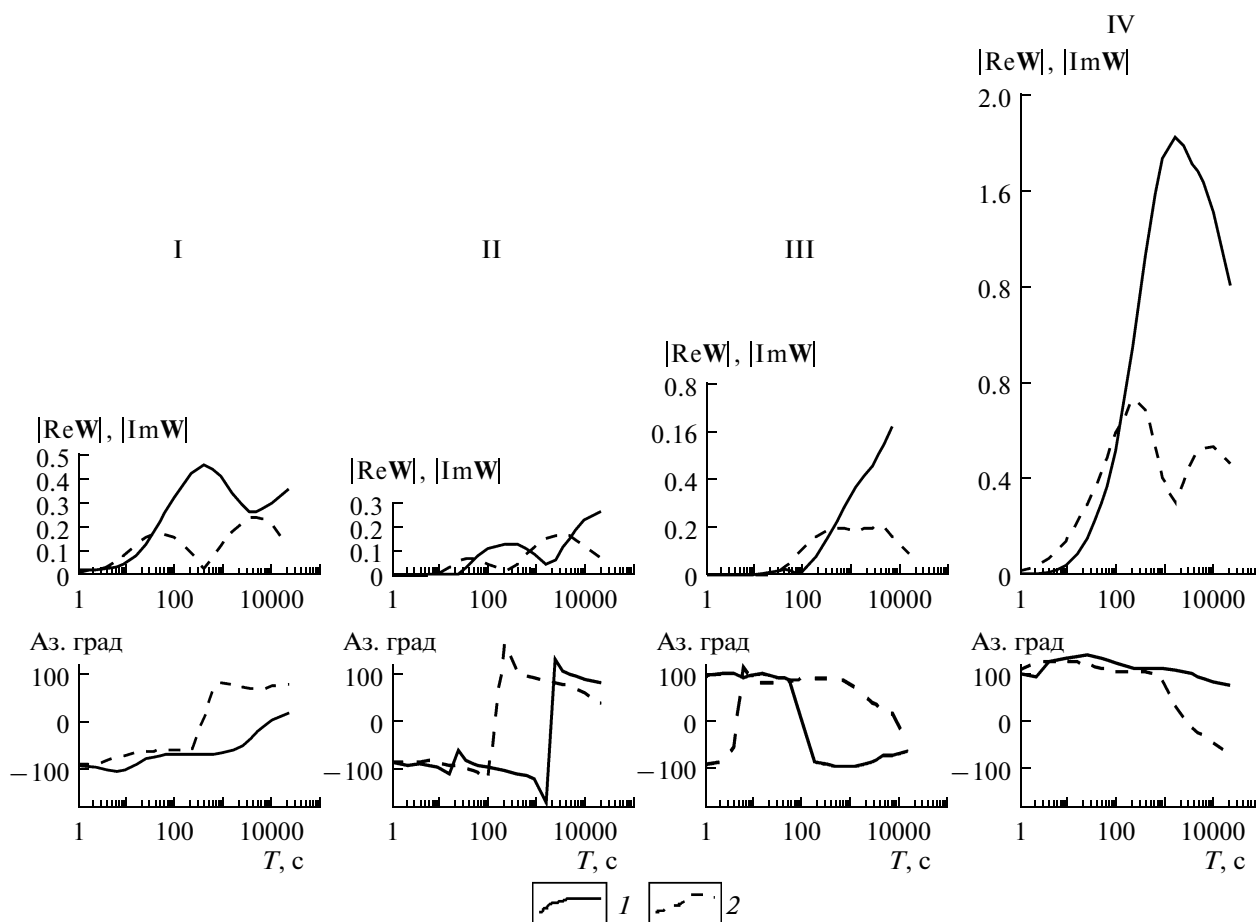


Рис. 3. Типичные частотные кривые магнитного типпера для зон, изображенных на рис. 2: 1 и 2 – кривые модулей, азимутов вещественной и мнимой индукционных стрелок.

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. В данной зоне на кривой модуля вещественной стрелки проявляется максимум на периодах 400–500 с, однако, его интенсивность в 3 раза меньше, чем в первой зоне. Максимуму  $|ReW|$  отвечает также минимум на кривой  $|ImW|$ . Вещественная и мнимая индукционные стрелки коллинеарны на высоких частотах (до 100 с) и 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 ее направление меняется на  $180^\circ$ , 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. Здесь на кривой  $|ReW|$ , представленной восходящей асимптотической ветвью, не проявляется максимум, связанный с влиянием морских токов в Охотском море. Кривая  $|ImW|$  имеет максимум и нисходящую ветвь. Отсутствие максимума на частотной кривой  $|ReW|$  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 полуострова 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 веществен-

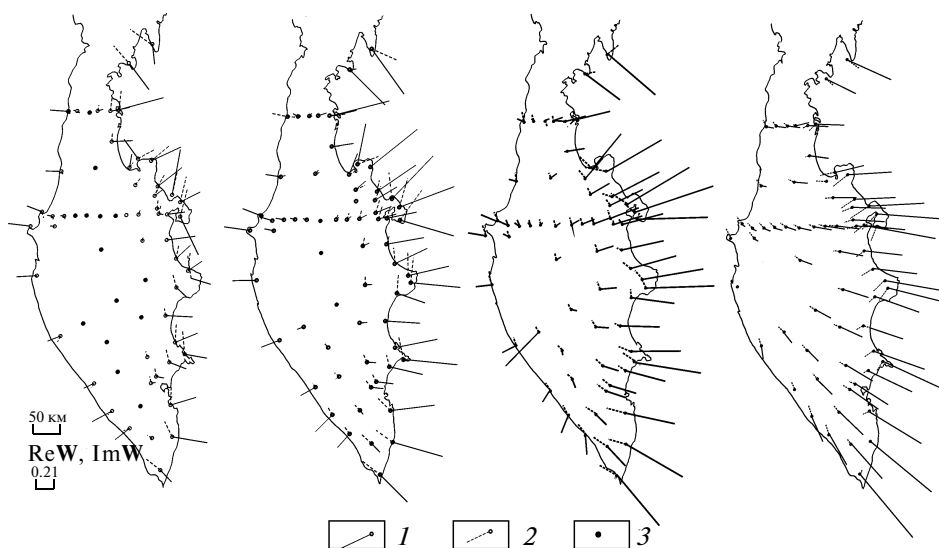


Рис. 4. Схемы поведения индукционных стрелок на периодах 100 с (а), 400 с (б), 1600 с (в) и 10000 с (г): 1 и 2 — вещественные и мнимые индукционные стрелки; 3 — пункты, в которых векторы близки к нулевым значениям.

ной стрелки отвечает минимум мнимой стрелки. При этом ее азимут меняется почти на  $130^\circ$ . В области низких частот между вещественной и мнимой стрелками угол возрастает до  $120^\circ$ . Выявленные особенности в поведении частотных кривых магнитного типпера свидетельствуют, что в четвертой зоне в геомагнитном поле преобладают двумерные эффекты до периодов 1000–2000 с. С увеличением периода вариаций возникают трехмерные эффекты, связанные, по-видимому, с ограниченным простиранием Камчатки в южном направлении.

Более наглядное представление о береговом эффекте дают схемы индукционных стрелок на периодах 100, 400, 1600 и 10000 с (рис. 4). 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  $180^\circ$ . При этом мнимые стрелки соизмеримы с вещественными, что свидетельствует о трехмерных эффектах.

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 длиннее мнимых, что свидетельствует об индукционном влиянии активных электрических токов в Тихом океане.

На периоде 1600 с береговым эффектом охвачена практически вся территория Камчатки. В средней части полуострова 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 [Рокитянский, 1975], оно 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. Оно 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-ой зоне со стороны Тихого океана. Поглощение проявляется в области коротких периодов, в результате чего 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 дви-

жении в глубь 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 показали, что появление слоя с проводимостью в 2000 Сим в литосфере Камчатки приводит к уменьшению  $|ReW|$  и  $|ImW|$  в несколько раз. Это является важным признаком выявления крупных проводящих зон под Камчаткой.

### 3. АНАЛИЗ КРИВЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В результате моделирования для каждого узла сетки получены локально-нормальная кривая МТЗ и кривые МТЗ по направлениям вдоль и вкрест простирания Камчатки, которые в дальнейшем будем называть продольными и поперечными. По форме продольные и поперечные кривые МТЗ организованы в 4 группы, характеризующие различную степень проявления берегового эффекта (рис. 5). Выделенные группы отвечают различным районам Камчатки (рис. 6).

Первый район включает северную часть Камчатки. В этом районе полуостров сужается и образуется перешеек. Ширина перешейка 120 км, длина 200 км. Поперечная амплитудная кривая представлена минимумом и восходящей асимптотической ветвью, выходящей в максимум. Асимптотическая ветвь “затянута” в область высоких сопротивлений, что связано с эффектом “S” за счет резкого контраста проводимости суши и моря. Действие эффекта “S” проявляется уже на коротких периодах, это хорошо видно на фазовых кривых. Поперечная кривая отклоняется от локально-нормальной кривой на периодах 4–5 с. В низкочастотном диапазоне она не отражает особенности изменения глубинного геоэлектрического разреза и на периоде 10000 с по уровню сопротивлений расходится с локально-нормальной кривой почти на порядок.

Продольная амплитудная кривая представлена нисходящей асимптотической ветвью в области низких частот. Она качественно отражает изменение электропроводности с глубиной. Данная кривая в низкочастотной области располагается ниже по уровню сопротивлений относительно локально-нормальной кривой МТЗ. Это отклонение в рассматриваемом районе составляет первые десятки процентов, что связано с индукционным влиянием морских электрических токов. Заметное расхожде-

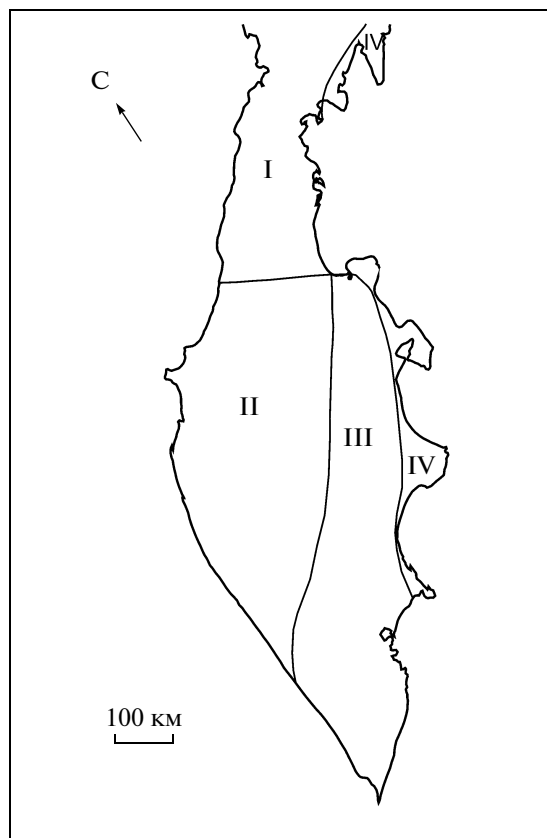


Рис. 5. Районы Камчатки с различной степенью проявления берегового эффекта на кривых МТЗ.

ние амплитудной продольной и локально-нормальной кривых начинается на периодах 60–100 с. На фазовых кривых расхождение проявляется уже на периодах 16–20 с. Продольная фазовая и локально-нормальная кривые сливаются на периодах 64000–10000 с, что свидетельствует о затухании действия индукционного эффекта на фазу продольного импеданса.

Второй район располагается в средней части Камчатки. Поперечная амплитудная кривая имеет минимум, восходящую асимптотическую ветвь и максимум. В области низких частот асимптотическая ветвь “затянута” вверх по уровню сопротивлений за счет действия эффекта “S”, который начинается примерно с периодов 200–300 с. На этих периодах поперечная кривая заметно отклоняется от локально-нормальной кривой. Расхождение кривых достигает почти полпорядка на периоде 10000 с. На фазовых кривых влияние эффекта “S” проявляется с более коротких периодов 30–40 с. Отклонение поперечной фазовой кривой составляет около 15° на периоде 10000 с.

Продольная амплитудная кривая практически совпадает с локально-нормальной кривой. Расхождение кривых составляет первые проценты, что находится в пределах точности численного модели-

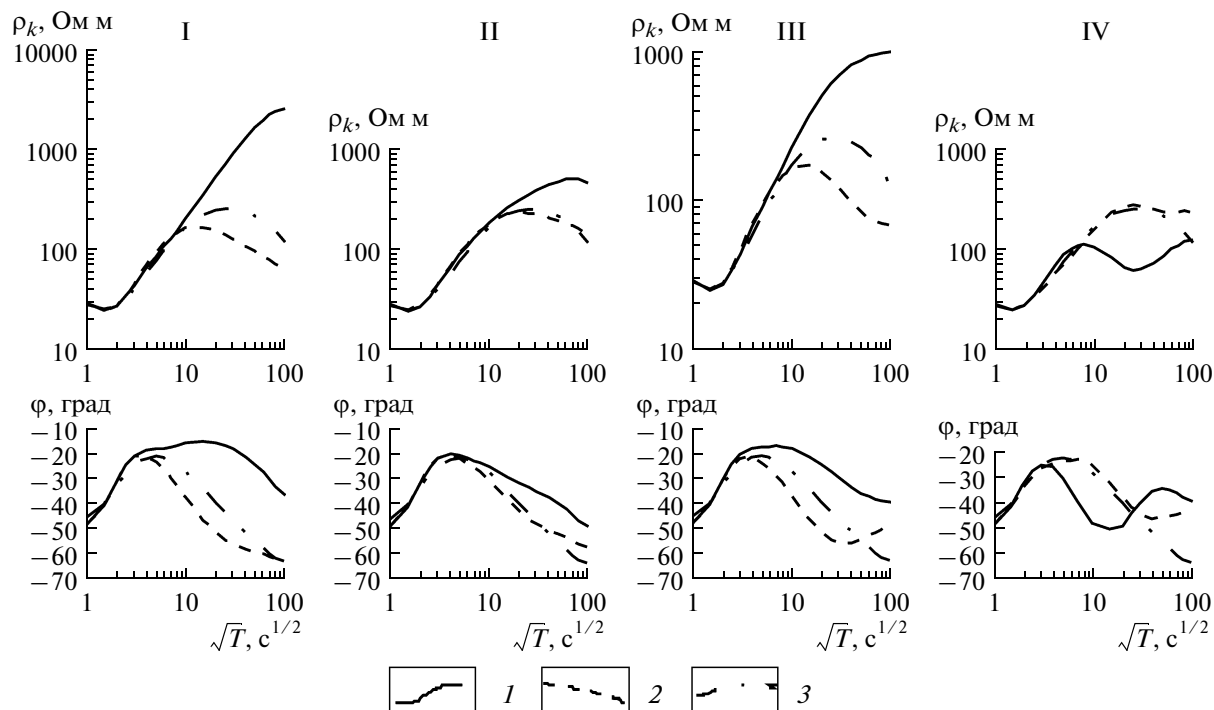


Рис. 6. Типичные кривые МТЗ для районов, изображенных на рис. 5. Римскими цифрами обозначены номера типичных кривых, соответствующие районам на рис. 5: 1, 2 и 3 — поперечная, продольная и локально-нормальная кривые МТЗ.

рования магнитотеллурического поля. То же самое относится к фазовой продольной кривой. Ее отклонение от локально-нормальной кривой достигает  $5^\circ$  лишь в низкочастотной области, где точность определения фазы, по-видимому, понижается из-за граничных условий модели.

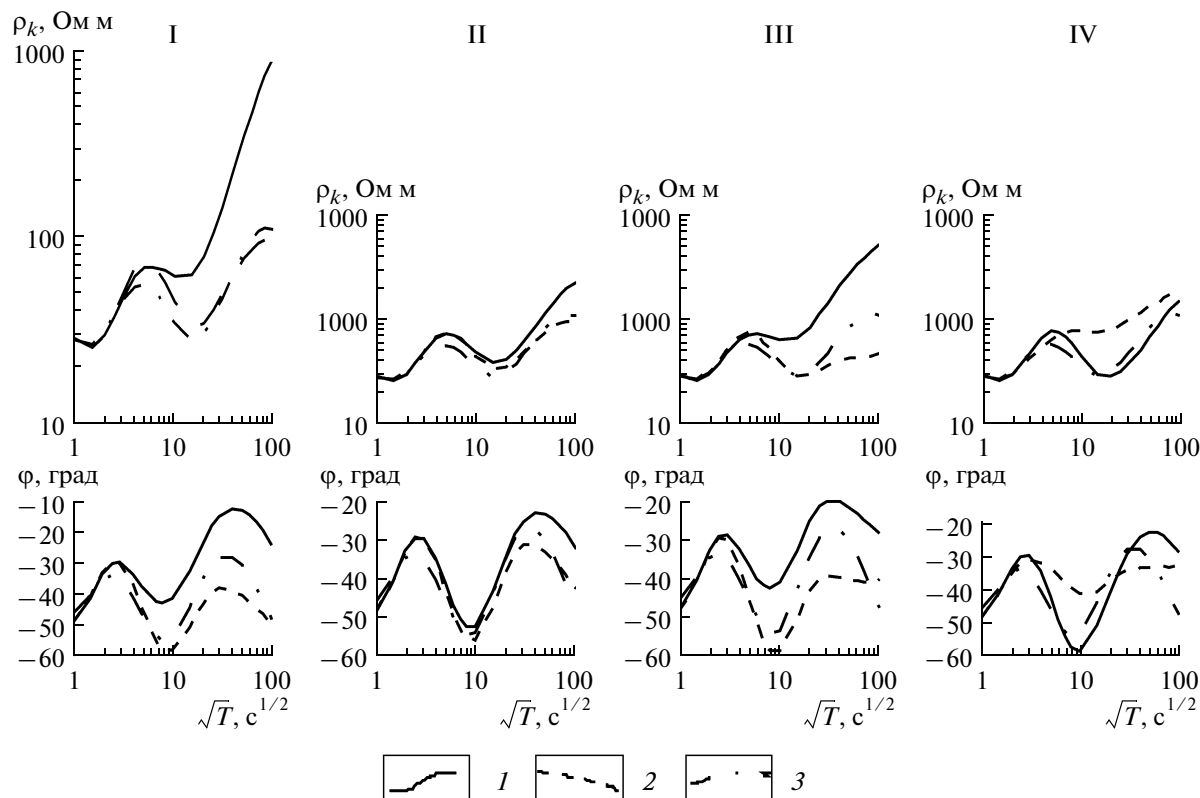
Третий район включает южную оконечность Камчатки и имеет продолжение на восток. Поперечная амплитудная кривая представлена минимумом и восходящей асимптотической ветвью, которая выполаживается в области низких частот. Искажение поперечной кривой здесь также связано с эффектом “S” за счет контраста проводимости суши и морской воды. Заметное действие эффекта “S” начинается с периода 60–100 с. Расхождение поперечной и локально-нормальной амплитудных кривых достигает на периоде 10000 с более порядка. Действие эффекта “S” на фазовых кривых проявляется уже на периоде примерно 4 с и возрастает с его увеличением. Расхождение поперечной и локально-нормальной фазовых кривых на периоде 1000 с достигает  $20^\circ$ .

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. Максимальное рас-

хождение кривых составляет примерно 300% на периоде 1600 с. На фазовой кривой индукционный эффект начинает проявляться на периоде 50 с и достигает максимума на периоде 1000 с. На периодах более 1000 с фазовая продольная кривая имеет восходящую асимптотическую ветвь, пересекающую локально-нормальную кривую. Такое поведение фазовой продольной кривой связано, по-видимому, с замыканием Камчатки в южном направлении.

Четвертый район включает восточные полуострова Камчатки со сложными очертаниями береговой линии. Индуцированные морские электрические токи обтекают восточные полуострова и создают трехмерные эффекты, которые в различной мере проявляются на продольных и поперечных кривых в зависимости от того, в каком месте ведутся наблюдения МТ-поля. Здесь трудно выделить типичную продольную и поперечную кривые МТЗ, так как они имеют разнообразную форму. Индукционный и “S”-эффект проявляются на продольной или поперечной кривой в зависимости от конфигурации береговой линии.

Поперечная кривая по сравнению с локально-нормальной кривой имеет хорошо выраженный минимум на периодах 400–2500 с. Он проявляется на фазовой поперечной кривой на периодах 64–400 с. Данный минимум связан с индукционным влиянием электрических токов, текущих вдоль границы полуострова, ориентированной поперек простира-



**Рис. 7.** Типичные кривые МТЗ в модели Камчатки с коровым проводящим слоем. Римскими цифрами обозначены номера типичных кривых, соответствующие районам на рис. 5: 1, 2 и 3 – поперечная, продольная и локально-нормальная кривые МТЗ.

ния Камчатки. В более низкочастотном диапазоне, т.е. на периодах 6400–10000 с поперечная амплитудная кривая пересекается с локально-нормальной кривой, что также связано с трехмерными эффектами. В большей мере эти особенности выражены на фазовых кривых, где максимуму поперечной фазовой кривой отвечает нисходящая ветвь локально-нормальной кривой.

Продольная амплитудная кривая совпадает с локально-нормальной кривой до периода 1600 с. С увеличением периодов она отклоняется от локально-нормальной кривой и представляет собой почти горизонтальную асимптотическую ветвь. Эта несогласованность кривых в большей мере выражена в поведении фазовых кривых. Продольная фазовая кривая отклоняется от локально-нормальной кривой на периоде 900 с. На ней в области периодов 1000–1500 с выражен минимум, который не согласуется с нисходящей ветвью локально-нормальной кривой. Таким образом, мы приходим к выводу, что продольная и поперечная кривые МТЗ не характеризуют изменение глубинной электропроводности. Кривые МТЗ в IV районе не могут быть использованы для формальной интерпретации. Оценка параметров глубинной электропроводности в данном

районе возможна лишь с привлечением численного трехмерного моделирования.

Рассмотрим модель Камчатки, содержащую на глубине 15 км коровый проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом м и мощностью 20 км. На рис. 7 приведены продольные и поперечные локально-нормальные амплитудные и фазовые кривые. Практически на всех кривых в той или иной мере проявился коровый слой. Рассмотрим особенности поведения кривых МТЗ в выделенных районах Камчатки. В первой зоне коровый слой на поперечной кривой выражен в меньшей мере, чем на продольной, что связано с действием берегового эффекта. Продольная амплитудная кривая практически сливается с локально-нормальной кривой. Индукционный эффект от влияния электрических токов в Охотском море по существу гаснет на фоне более сильного индукционного влияния электрических токов в коровом проводящем слое. Следует отметить, что фазовая продольная кривая заметно расходится с локально-нормальной кривой на периодах 400–800 с, что указывает на ее большую чувствительность к индукционному эффекту в рассматриваемом районе.

Во втором районе, где действие берегового эффекта ослабевает, расхождение поперечной кривой



с локально-нормальной заметно уменьшается по сравнению с первым районом. Только в области низких частот проявляется заметное влияние берегового эффекта на поперечной амплитудной и фазовой кривых. Продольные амплитудная и фазовая кривые отличаются незначительно от соответствующих локально-нормальных кривых, что обусловлено слабым индукционным влиянием электрических токов в Охотском море и Тихом океане.

В третьем районе уже проявляется береговой эффект, связанный с влиянием электрических токов в Тихом океане. Здесь поперечная амплитудная кривая подобна кривой в первой зоне. Продольная амплитудная кривая в диапазоне периодов 1–400 с близка к локально-нормальной кривой. В более низкочастотном диапазоне периодов продольная кривая отличается от локально-нормальной за счет индукционного эффекта.

В четвертом районе коровый слой проявился на продольной и поперечной кривых. При этом на продольной кривой (для Камчатки) он выражен слабее из-за действия эффекта “S”, связанного с контрастом проводимости суши полуострова Камчатский и морской воды. Поперечная кривая практически совпадает с локально-нормальной кривой. Это свидетельствует, что влияние корового слоя, по существу, гасит индукционный эффект электрических токов.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Береговой эффект на Камчатке связан с влиянием электрических токов концентрирующихся в Охотском море и Тихом океане. Совместное индукционное действие этих токов на территории Камчатки создает сложную картину в поведении магнитовариационных параметров. По частотным кривым типпера выделяются 4 зоны с различной степенью проявления берегового эффекта. На Западном побережье максимум берегового эффекта проявляется на периодах 400–500 с. При движении на восток береговой эффект со стороны Охотского моря гаснет и начинает действовать береговой эффект со стороны Тихого океана, который в сильной мере усиливается на восточном побережье Камчатки. Максимум берегового эффекта проявляется на периодах близких к получасу. Он почти в 4 раза превышает береговой эффект на западном побережье. Максимум берегового эффекта на восточном побережье связан с насыщением электрическим током глубоководного желоба, который индуцирует вертикальную компоненту магнитного поля, пронизывающую Восточную Камчатку.

2. Границы площади, на которой проявляется береговой эффект со стороны Охотского моря и Тихого океана, зависят от периода вариаций геомагнитного поля. На длинных периодах ( $T > 5000$  с) вся территория Камчатки охвачена береговым эффек-

том со стороны Охотского моря и Тихого океана. Так на периоде 100 с средняя часть полуострова, а на периоде 1600 с — только узкая зона в его средней части (шириной около 50 км) свободны от берегового эффекта.

3. На Камчатке трехмерные эффекты в вариациях геомагнитного поля проявляются в разной мере в различных частотных диапазонах. На коротких периодах (до 400 с) эффекты связаны с обтеканием электрическим током сложных очертаний береговой линии. С увеличением периода вариаций эффекты затухают и практически гаснут на периоде 10000 с. В то же время появляются эффекты, связанные с обтеканием электрическим током Камчатки, представляющей собой трехмерную вытянутую геоэлектрическую неоднородность в хорошо проводящей морской воде.

4. По продольным и поперечным кривым МТЗ (относительно простирания Камчатки) выделяются 4 района, в которых по-разному проявился береговой эффект. На большей части Камчатки (районы I, II, III) поперечные кривые МТЗ подвержены эффекту “S”, за счет которого они затянута вверх по уровню сопротивлений. Поэтому поперечные кривые не отражают изменения электропроводности с глубиной. Продольные кривые на Камчатском перешейке (район I) и в районе III, примыкающем к восточным полуостровам, искажены индукционным эффектом, связанным с электрическими токами в Охотском море и Тихом океане. Только в средней части Западной и Центральной Камчатки (район II) продольная кривая не подвержена индукционному эффекту и отражает распределение электропроводности с глубиной. Восточное побережье Камчатки (район IV) характеризуется сложным поведением продольных и поперечных кривых МТЗ из-за трехмерных эффектов, связанных со сложными очертаниями береговой линии. Индуцированные электрические токи обтекают полуострова и концентрируются в заливах. В результате эффектов обтекания и концентрации, а также эффекта “S” и индукционного эффекта (в районах с вытянутой береговой линией локальных полуостровов и заливов), кривые МТЗ имеют разнообразную форму в зависимости от того, в каком месте ведутся наблюдения МТ-поля. Как продольная, так и поперечная кривые МТЗ не отражают глубинный геоэлектрический разрез модели. Поэтому здесь интерпретация МТЗ может быть выполнена только с привлечением численного трехмерного моделирования.

5. Наличие в геоэлектрической модели Камчатки глубинного проводящего слоя (проводимостью 2000 См) приводит к уменьшению магнитного типпера в несколько раз, а также к заметному ослаблению индукционного эффекта на кривых магнитотеллурического зондирования. Эти особенности

являются важным признаком выявления крупных проводящих зон под Камчаткой.

6. Выявлены основные особенности в поведении кривых МТЗ, МВЗ в связи с береговым эффектом для модели с однородным слоем на суше и однородным глубинным проводником. Полученные результаты представляют интерес на первом этапе трехмерного численного моделирования МТ-поля Камчатки. В дальнейшем предполагается изучение МТ-поля в трехмерных моделях Камчатки с неоднородным слоем на суше и неоднородным глубинным проводником в земной коре и верхней мантии. Конечным результатом будет создание трехмерной глубинной модели электропроводности Камчатки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бердичевский М.М., Жданов М.С.* Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. М.: Недра. 1981. 327 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. С. 86–98.

*Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г.* Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004. № 6. С. 54–67.

*Рокитянский И.И.* Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: изд-во Наукова Думка. 1975. 269 с.

*Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. № 29. P. 923–935.

*Parkinson W.D.* Direction of rapid geomagnetic fluctuation // Geophys. J. 1959. V. 2. P. 1–14.

*Schmucker U.* Anomalies of geomagnetic variations in the South-Western United States. Berkley Los-Angeles—London: Univ. California Press. 1970. 165 p.

*Vozoff K.* The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98–141.

*Wiese H.* Geomagnetische Tiefentelluric. Berlin: Deutsche Akad. Wiss. 1965. 146 p.