

## МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ КАМЧАТКИ

© 2008 г. Ю. Ф. Мороз, Н. А. Лагута, Т. А. Мороз

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 23.03.2007 г.

Выполнены обобщение и анализ данных МТЗ, полученных на Камчатке за последние 30 лет. В основу интерпретации положены кривые, ориентированные вдоль и поперек Камчатки. Продольные и поперечные кривые подвержены влиянию локальных геоэлектрических неоднородностей. Для их погашения использована методика конформного осреднения. В результате бимодальной интерпретации средних продольных и поперечных кривых создана глубинная геоэлектрическая модель, которая может быть принята первоначальной для ее уточнения с привлечением численного трехмерного моделирования. Модель включает коровый проводящий слой, вытянутый вдоль центральной части Камчатки, который в восточной части полуострова сопряжен с поперечными коровыми проводящими зонами шириной до 50 км. Эти зоны имеют продолжение в сторону Тихого океана. К поперечным зонам приурочены крупные центры современного вулканизма. Верхняя мантия содержит астеносферный проводящий слой, образующий поднятие под современным вулканическим поясом Камчатки.

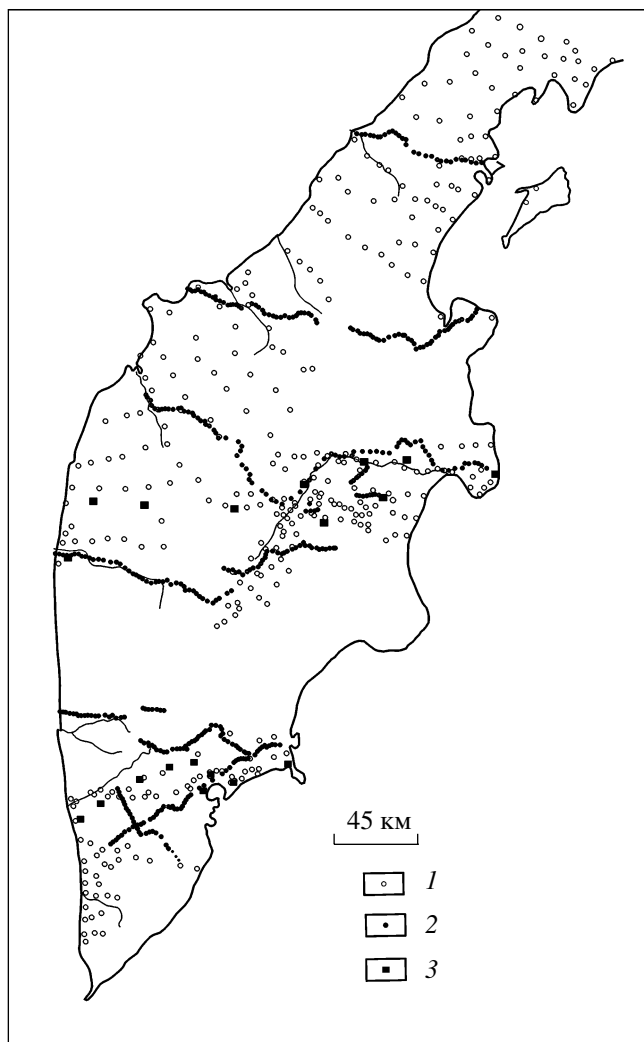
В изучении глубинного строения области перехода от материка к Тихому океану большой интерес представляет Камчатка, где наиболее ярко проявились динамические процессы, выраженные высокой сейсмичностью, современным вулканизмом и гидротермальной активностью. Существующие представления о глубинном строении региона ранее базировались в основном на данных сейсмологии, гравиметрии и аэромагнитной съемки. К сожалению, этой информации было крайне недостаточно. Большую роль в изучении глубинного строения региона сыграли магнитотеллурические исследования, проведенные на Камчатке в 1970–1980 гг. прошлого столетия. В итоге значительная часть территории Камчатки изучена магнитотеллурическими зондированиями. На основе этого большого фактического материала, с привлечением разработанных методических приемов интерпретации, численного и физического моделирования получены карты электропроводности осадочно-вулканогенного чехла и более глубоких частей земной коры, глубинные геоэлектрические модели Камчатки и отдельных районов современного вулканизма [3].

Несмотря на полученные результаты остается неудовлетворенность в выполненных исследованиях, которая сводится к следующему. Площадь покрыта крайне неравномерно, особенно в районах современного вулканизма. Использована аналоговая аппаратура, что отразилось на качестве кривых МТЗ. Интерпретация выполнена с использованием одной моды, т.е. только квазипродольных кривых МТЗ. Квазипоперечные кривые применялись только на этапе предварительного анализа.

В последние годы на Камчатке выполнен ряд профилей методом МТЗ, пересекающих полуост-

ров. Работы МТЗ проводились с использованием цифровых электроразведочных станций, шаг наблюдений 2–5 км. Диапазон изучаемых периодов от первых десятых долей секунд до 1000 с и более. Эти кривые в значительной мере дополняют магнитотеллурическую информацию, полученную ранее. Результаты интерпретации МТЗ, выполненные нами в отдельных районах Камчатки, показали, что в литосфере присутствуют крупные поперечные проводящие зоны, создающие трехмерные глубинные неоднородности [6, 7]. Поэтому интерпретация МТЗ только с участием одной моды может привести к потере существенной информации, а возможно и к неправильным представлениям о глубинной электропроводности.

В связи с получением новых данных возникла необходимость обобщения и анализа МТЗ на всей территории Камчатки с использованием современных подходов, учитывающих возможность искажения кривых МТЗ за счет геоэлектрических неоднородностей среды. При этом важное внимание уделяется совместному анализу двух мод, позволяющему выявить основные особенности глубинной структуры электропроводности Камчатки. Полученные результаты с привлечением геолого-геофизических данных дадут возможность выделить глубинные разломы и зоны магмопитания крупных вулканических зон и получить новые сведения о динамике протекающих глубинных процессов. Этой проблеме будет посвящен ряд публикаций. Целью настоящей статьи является обобщение и интерпретация МТЗ на качественном уровне для создания первоначальной модели Камчатки, которая в дальнейшем будет уточнена с помощью численного трехмерного моделирования.



**Рис. 1.** Схема расположения МТЗ. 1, 2, 3 – МТЗ в диапазоне периодов 10–1000 с, 0.1–1000 с и 1500–15000 с, соответственно.

Схема расположения МТЗ изображена на рис.1. Практически вся территория покрыта зондированиями. Однако имеются отдельные районы, неизученные площадной съемкой МТЗ. Эти районы являются труднодоступными из-за горного рельефа или сильной заболоченности. Северная и южная части площади покрыты съемкой МТЗ по сети примерно  $10 \times 15$  км. Данные МТЗ получены в прошлые годы. Диапазон изучаемых периодов 10–1000 с. Профили МТЗ, выполненные в последние годы, равномерно пересекают территорию полуострова. Шаг наблюдений 2–5 км. МТЗ зарегистрированы с помощью цифровых электроразведочных станций в диапазоне периодов от 0.1–1000 с. Кроме этого мы располагаем рядом МТЗ в более длиннопериодном диапазоне от 150–15000 с. Запись МТ-поля производилась по направлениям, ориентированным вдоль и вкрест простирания основных тектонических зон Камчатки. МТЗ выполне-

ны Восточным геофизическим трестом, ПГО “Камчатгеология”, ПГО “Сахалингеология” Министерства геологии РСФСР, Институтом вулканологии ДВО РАН.

**Краткая геологическая и геоэлектрическая характеристика.** Камчатка – молодая складчатая область, входящая в состав Тихоокеанского подвижного пояса, сформировавшегося в поздне меловое и кайнозойское время. В ее строении принимают участие домеловые, меловые, третичные и четвертичные образования. Выходы наиболее древних метаморфических пород представляют собой выступы (Средний, Камчатский, Ганальский) [3]. Верхнемеловые породы слагают нижнюю часть осадочно-вулканогенного чехла. Они разделяются на две толщи: нижняя терригенная и верхняя вулканогенно-кремнистая. Кайнозойские отложения широко распространены на Камчатке. По ним устанавливается существование Западно-Камчатской, Центрально-Камчатской и Восточно-Камчатской структурно-фациальных зон (рис.2).

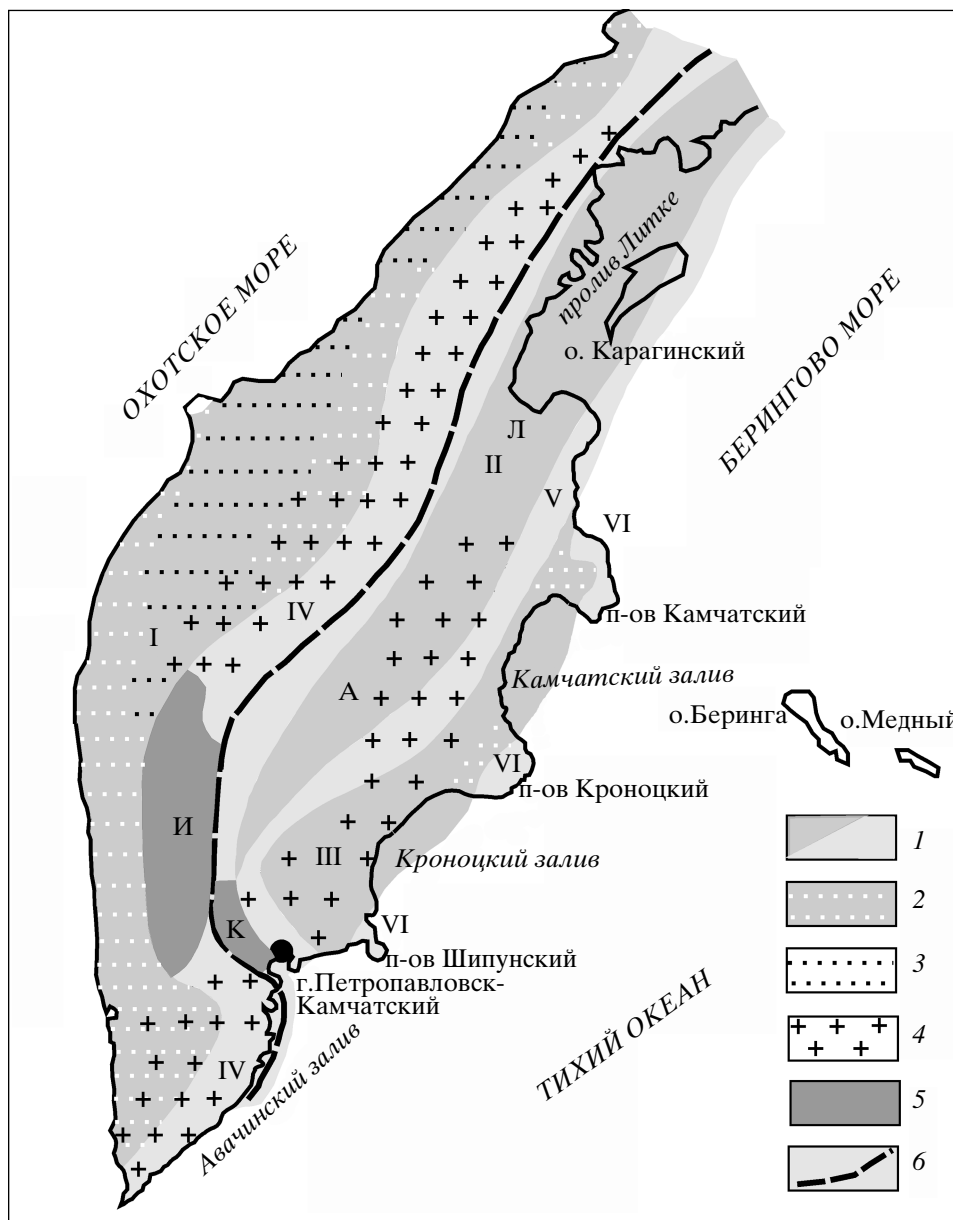
Западно-Камчатская структурная фациальная зона в общих чертах отвечает Западно-Камчатскому прогибу, в пределах которого выделяется ряд структур более высокого порядка. Осадочно-вулканогенный чехол сложен палеоген-неогеновыми отложениями, которые представлены терригенными образованиями. И только в отдельных районах в разрезе присутствуют эффузивные породы.

Центрально-Камчатская структурно-фациальная зона является внутренней вулканической дугой. Ее развитие связывается с существованием Главного Камчатского разлома. Зона включает Срединный Камчатский массив, Ганальский выступ, Камчатско-Корякский и Южно-Камчатский антиклинорий.

Восточно-Камчатская зона отнесена к внешней складчатой дуге. Она включает Хавывенский выступ метаморфических пород, Восточно-Камчатский антиклинорий, Центрально-Камчатский, Восточно-Камчатский прогибы и зоны поднятий вулканических полуостровов.

На Камчатке широко развит интрузивный и эффузивный магматизм. В наибольшей мере магматические процессы проявились в Центрально-Камчатской зоне, представляющей, по мнению Г.М. Власова, внутреннюю вулканическую дугу [3]. Здесь вулканогенные толщи в значительной мере насыщены интрузивными образованиями. На Восточной Камчатке магматические породы сосредоточены, преимущественно, на вулканических восточных полуостровах. На Западной Камчатке интрузивные породы встречаются крайне редко. Они приурочены к разломам, ограничивающим отдельные поднятия.

В кайнозойское и четвертичное время на Камчатке широко проявился вулканизм. Здесь выделены Центрально-Камчатский и Восточно-Кам-



**Рис. 2.** Схема тектонического районирования Камчатки. 1 – структуры первого порядка. Прогибы: I – Западно-Камчатский, II – Центральнo-Камчатский, III – Восточно-Камчатский; антиклинории: IV – Камчатско-Корякский, V – Восточно-Камчатский, VI – зона поднятий вулканических полуостровов. 2, 3 – структуры второго порядка; 2 – впадины; 3 – поднятия; 4 – наложенные вулканические пояса; 5 – выступы древних пород (И – Срединный Камчатский, К – Ганальский, Л – Хавывенский); 6 – предполагаемый Центральнo-Камчатский глубинный разлом.

чатский вулканические пояса (рис. 2), сформировавшиеся в палеоген-четвертичное и неоген-четвертичное время, соответственно. Восточно-Камчатский вулканический пояс несогласно наложен на различные тектонические структуры и протягивается параллельно Курило-Камчатскому глубоководному желобу. Вулканические отложения в пределах пояса представлены основными и средними известково-щелочными породами. В этом же районе вулканизм развивается и в настоящее время. Здесь сосредоточено большинство со-

временных действующих вулканов Камчатки, арельные излияния которых имеют преимущественно базальтовый состав.

Геоэлектрический разрез района по данным [4] представляется в следующем виде. В верхней части залегают осадочные и вулканогенные образования, удельное электрическое сопротивление которых меняется в широком диапазоне от сотен до первых тысяч Ом·м, мощность от первых сотен до 1000 м и более в районе вулканов. Пониженные удельные сопротивления характерны для впадин Западно-

Камчатского прогиба, повышенные – для вулканических зон и вулканических полуостровов. Ниже залегает кайнозойская толща с удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом·м, и мощностью до первых километров во впадинах. Кайнозойские образования с повышенным удельным сопротивлением характерны для антиклинориев и поднятий полуостровов, где отмечается увеличенная насыщенность разреза эффузивными и интрузивными магматическими образованиями. Кайнозойская толща с пониженным удельным сопротивлением отвечает прогибам и впадинам, где в разрезе преобладают терригенные породы. При этом наиболее низкие удельные сопротивления в первые единицы Ом·м свойственны районам с увеличенной мощностью низкоомных миоценовых отложений. Доля этих отложений существенно возрастает в молодых наложенных впадинах. Палеогеновые породы характеризуются более высокими удельными сопротивлениями. Их преобладание в разрезе приводит к росту среднего удельного сопротивления кайнозойской толщи до 10–20 Ом·м и более.

В основании кайнозойской толщи залегают породы верхнемелового комплекса. Выделяются две зоны с существенно различной электропроводностью верхнего мела. Одна из них отличается низким сопротивлением, составляющим первые десятки Ом·м. Эта зона охватывает западное побережье Камчатки и Корякское нагорье. Пониженное сопротивление обусловлено преобладанием в разрезе терригенных образований. Это подтверждается выходами терригенных меловых пород в районе Корякского нагорья, Лесновского выступа, мыса Омгон, а также глубоким бурением. В восточном направлении сопротивление мелового комплекса возрастает до первых сотен Ом·м и более, что связывается с возрастающей ролью вулканогенных образований.

Мезо-кайнозойский осадочно-вулканогенный чехол подстилают породы метаморфического фундамента, выходящие на поверхность в районе Среднего массива, Ганальского выступа и Хавывенской возвышенности. К фундаменту приурочен опорный высокоомный геоэлектрический удельный горизонт с сопротивлением сотни – первые тысячи Ом·м. Земная кора и верхняя мантия содержат слои повышенной электропроводности, связываемые с флюидами.

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Обработка МТЗ сводилась к определению компонент тензора импеданса, отражающих геоэлектрическое строение изучаемой среды. Компоненты тензора импеданса определялись с помощью способа наименьших квадратов. Точность их определения в диапазоне периодов 0.1–1000 с является раз-

личной по аналоговым и цифровым регистрациям. По аналоговым записям точность определения модулей импедансов составляет 5–10%, фаз – 3°–5°. По цифровым регистрациям – 3–5% и 1°–3° соответственно. В длиннопериодном диапазоне периодов ( $T > 1500$  с) точность определения модуля импеданса 10–20%, фазы порядка 10°. В результате обработки построены полярные диаграммы импедансов. Они дают возможность оценить степень горизонтальной неоднородности среды. Оценка горизонтальной неоднородности среды выполнена также аналитически по методике Эггерса [8]. С помощью данной методики определены главные направления и главные значения тензора импеданса. Анализ показывает, что в низкочастотном диапазоне горизонтальная геоэлектрическая неоднородность в большинстве случаев может быть рассмотрена как квазидвумерная. Исключением являются восточные полуострова, где в высокочастотном диапазоне двумерность геоэлектрической среды нарушается.

Квазидвумерность геоэлектрической среды в низкочастотном диапазоне обусловлена тем, что полуостров Камчатка и осложняющие его крупные тектонические зоны (прогибы и антиклинории) имеют вытянутую форму. Возможность аппроксимации полуострова и его тектонических зон квазидвумерными геоэлектрическими моделями в низкочастотном диапазоне доказана нами ранее с помощью численного и физического моделирования [5]. В основу интерпретации положены кривые по направлениям, ориентированным вдоль и вкрест простирания Камчатки. Кривые, ориентированные вдоль Камчатки, названы продольными, а вкрест – поперечными. Это дает возможность уже на первоначальном этапе анализа разделить в указанных направлениях влияние “берегового” эффекта, связанного с резким контрастом проводимости сред, соприкасающихся на берегах Тихого океана и Охотского моря.

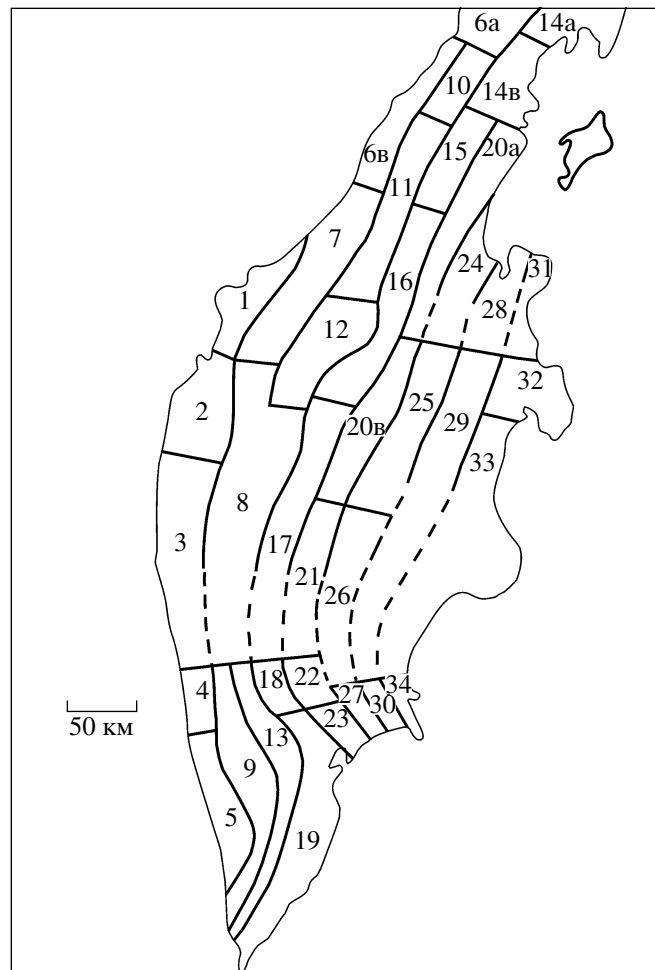
Кривые МТЗ на Камчатке подвержены сильному влиянию горизонтальных неоднородностей разреза, представленных магматическими телами, разломами, структурами осадочно-вулканогенного чехла, морями и океаном, окружающими полуострова. Формальная интерпретация индивидуальных кривых МТЗ с целью извлечения глубинной информации лишена смысла. Особенно ощутимо на кривых МТЗ проявился эффект  $\rho$  [2]. Он в сильной мере затронул как продольные, так и поперечные кривые МТЗ. Данный эффект связан с действием мелких приповерхностных неоднородностей. В результате его действия кривые кажущихся сопротивлений смещены по оси сопротивлений во всем интервале используемых частот. Поэтому количественная интерпретация кривых возможна лишь после их нормализации, целью которой является уменьшение влияния приповерхностных неод-

родностей. Существует ряд способов сглаживания искажений, обусловленных эффектом  $\rho$ . Все они основаны на том, что глубинные проводники создают на земной поверхности аномалии размером в первые десятки километров. В то же время локальные приповерхностные неоднородности выражены более интенсивными локальными аномалиями размерами в первые километры. Поэтому проблема выделения глубинной информации сводится к выделению региональной составляющей на фоне локальных помех. Эта задача осуществляется путем пространственной фильтрации. Данная методика издавна применяется в гравиметрии и широко используется при интерпретации теллурического поля Камчатки. Позднее мы использовали ее при изучении глубинной электропроводности Камчатки [4].

В настоящей работе принят прежний подход осреднения кривых, близких по форме. При этом авторы исходят из того, что форма кривой отвечает определенному типу геоэлектрического разреза. За счет действия эффекта  $\rho$  кривые МТЗ расходятся по уровню сопротивлений, сохраняя свою форму. Следовательно, кривые МТЗ, близкие по своей форме, отражают сходный глубинный геоэлектрический разрез. Этот принцип положен в основу получения геоэлектрической модели Камчатки. Организовав кривые МТЗ по этому принципу в семейства, мы тем самым выполним районирование Камчатки на зоны с различным типом глубинного разреза. Подобная работа проделана с продольными и поперечными кривыми МТЗ.

На территории Камчатки выделено 34 района, каждый из которых характеризуется своей формой продольных и поперечных кривых (рис. 3). Площадь районов от 5 тыс. км<sup>2</sup> до 10–15 тыс. км<sup>2</sup> и более. Количество кривых в районе от 15 до 30. Показать все кривые в каждом районе нет возможности из-за громоздкости рисунка. В качестве примера на рис. 4 приведены продольные и поперечные амплитудные и фазовые кривые для района 15. На нем видно, что амплитудные кривые, при сохранении их формы, расходятся по уровню сопротивлений почти на порядок. В то же время фазовые кривые близки между собой, особенно в области низких частот. Это свидетельствует о преобладании гальванического механизма приповерхностных искажений. Для сглаживания их влияния использовано конформное осреднение [1]. Средние значения кажущихся сопротивлений рассчитаны как среднегеометрические. Средние значения фаз получены как среднеарифметические.

Полученные средние продольные и поперечные кривые кажущихся сопротивлений приведены на рис. 5, 6. Здесь же показаны фазовые кривые. Они, как известно, обладают опережающей глубиной и несут существенную дополнительную ин-



**Рис. 3.** Схема расположения семейств продольных и поперечных кривых МТЗ. Цифрами обозначены номера районов, отвечающие номерам средних кривых на рис. 4 и 5.

формацию о глубинной электропроводности в ограниченном низкочастотном диапазоне. На многих амплитудных и фазовых продольных и поперечных кривых МТЗ в диапазоне периодов от 10–30 с до 200 с проявляется минимум, свидетельствующий о наличии слоя пониженного сопротивления в земной коре. Кривые МТЗ, по степени проявления минимумов, организованы в группы.

Обратимся к продольным кривым МТЗ. Они представлены группами А, Б и В. В группе А кривые кажущихся сопротивлений в своей правой части имеют восходящие асимптотические ветви с выходом в максимум (рис. 5). В то же время фазовые кривые представлены хорошо выраженным максимумом и нисходящими ветвями, которые, как будет показано ниже, обусловлены астеносферным проводящим слоем. Мы приходим к выводу, что в группе А коровый проводящий слой в видимой форме на продольных кривых не выражен.

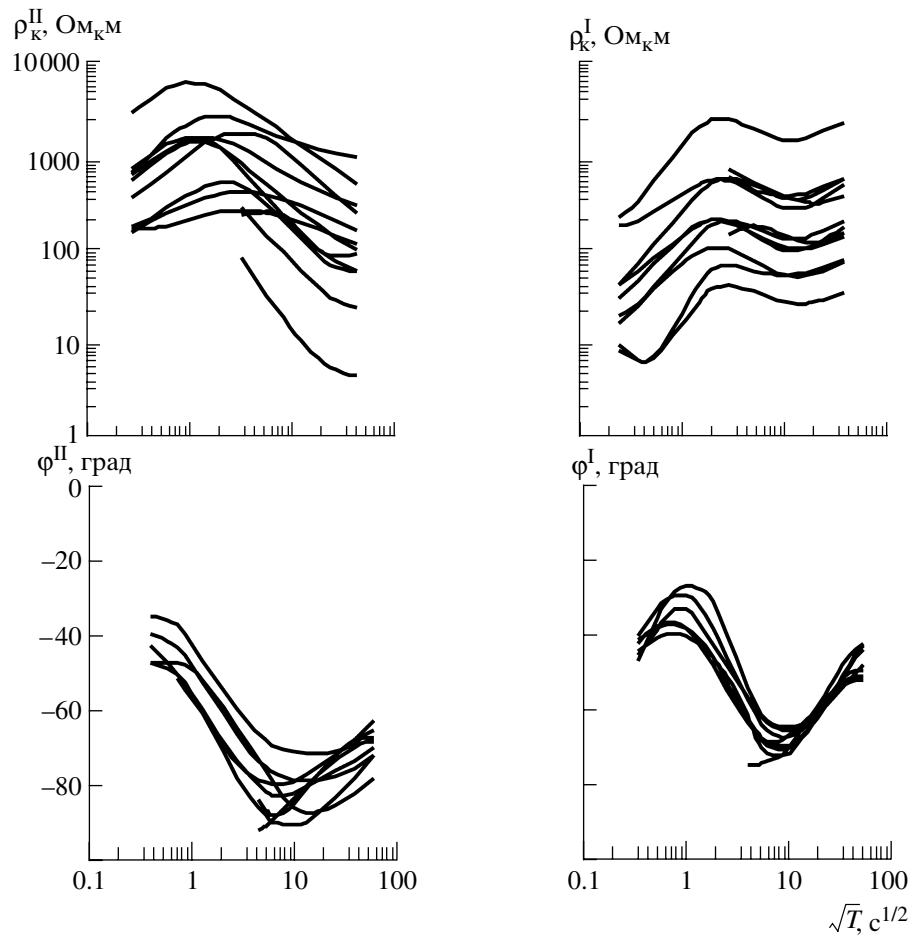


Рис. 4. Семейства продольных и поперечных индивидуальных кривых МТЗ района 15.

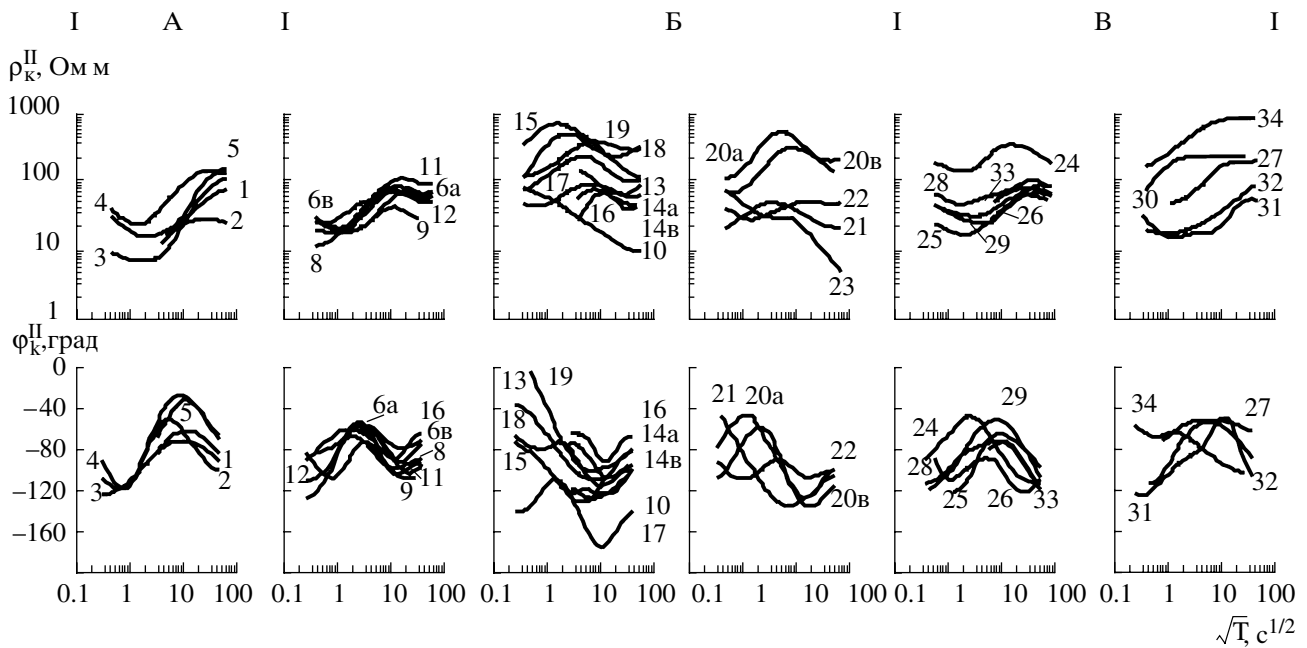
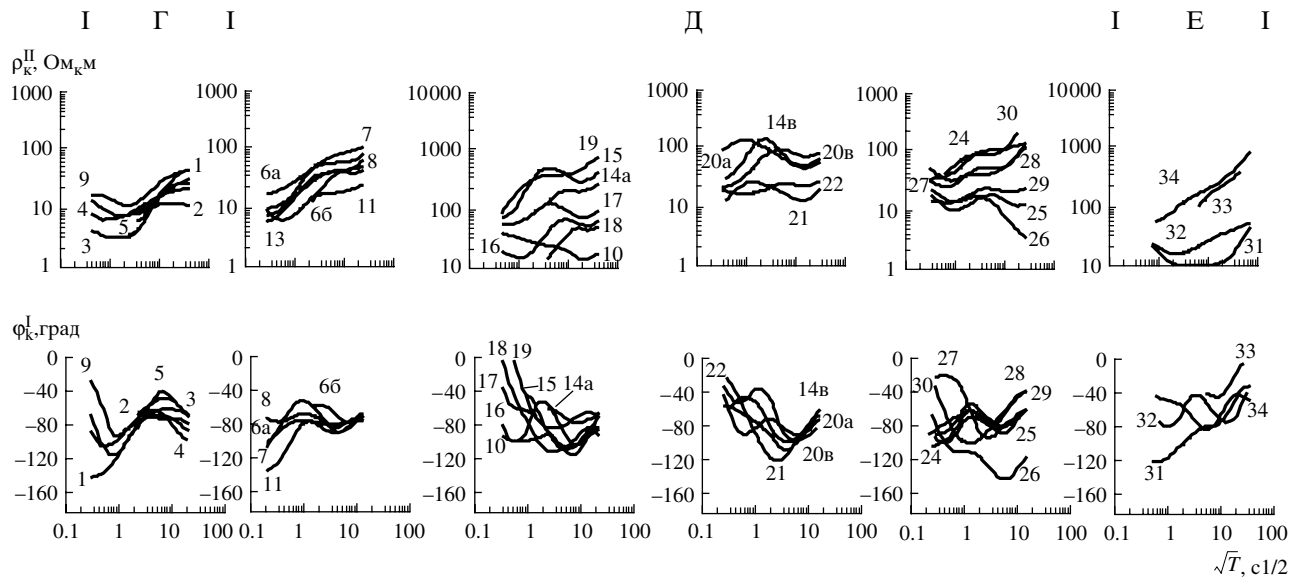


Рис. 5. Семейства средних продольных кривых МТЗ. Номера кривых отвечают номерам районов на рис. 3. А, Б и В – обозначения семейств, соответствующие областям на рис. 7.



**Рис. 6.** Семейства средних поперечных кривых МТЗ. Номера кривых отвечают номерам районов на рис. 3. Г, Д, Е – обозначения семейств, соответствующие областям на рис. 8.

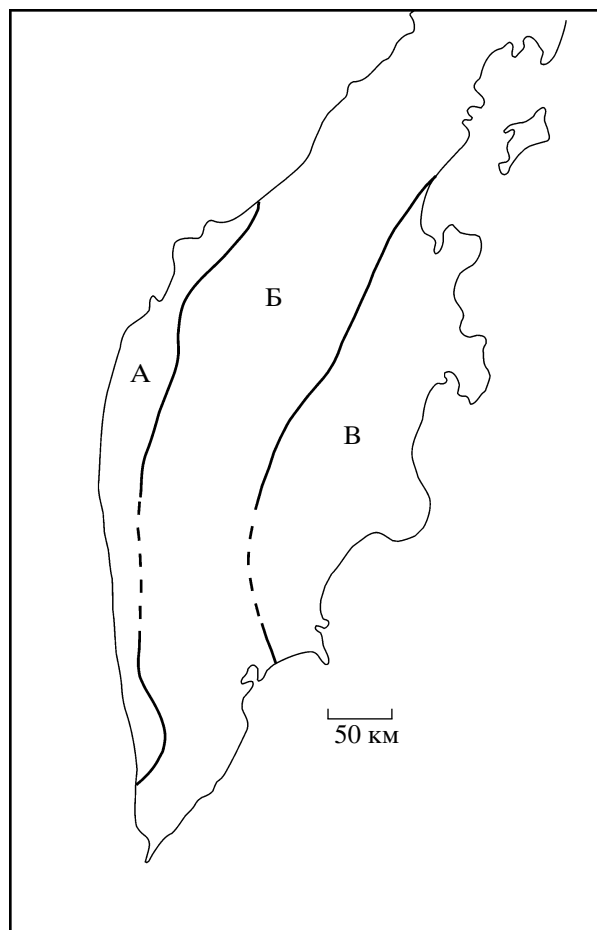
Рассмотрим продольные кривые в группе Б (рис. 5). (Эта группа является наиболее многочисленной. Поэтому она представлена тремя семействами. Кривые кажущихся сопротивлений в данной группе, в своей правой части, в большинстве случаев имеют минимум, связываемый с коровым проводящим слоем. Только отдельные кривые в правой части представлены нисходящей асимптотической ветвью. Почти все фазовые кривые имеют хорошо выраженный минимум, подтверждающий наличие слоя повышенной электропроводности. При сравнении семейств кажущихся сопротивлений следует отметить, что на кривых МТЗ в западной части Камчатки (6а, 6б, 8, 9, 11, 12) минимумы, характеризующие коровый слой, выражены слабее. Это может быть связано с увеличенной проводимостью осадочного чехла или с относительно небольшой проводимостью корового слоя. В лучшей мере коровый слой выражен на кривых МТЗ, расположенных в средней части Камчатки. Это семейство кривых 14а, 14в, 16, 18, 10, 13–19. Данные кривые располагаются в районе Камчатско-Корякского антиклинория с наложенным вулканическим поясом, приуроченным к предполагаемому здесь глубинному разлому. В третьем семействе группы Б только амплитудные кривые 21 и 22 имеют слабо выраженные минимумы на периодах 400–600 с. Остальные кривые в низкочастотной области представлены нисходящими ветвями, связанными с наличием проводящего слоя. На это указывают минимумы фазовых кривых в области низких частот.

Перейдем к группе В (рис. 5). Она включает два семейства кривых. В семействе (24–26, 28, 33) ам-

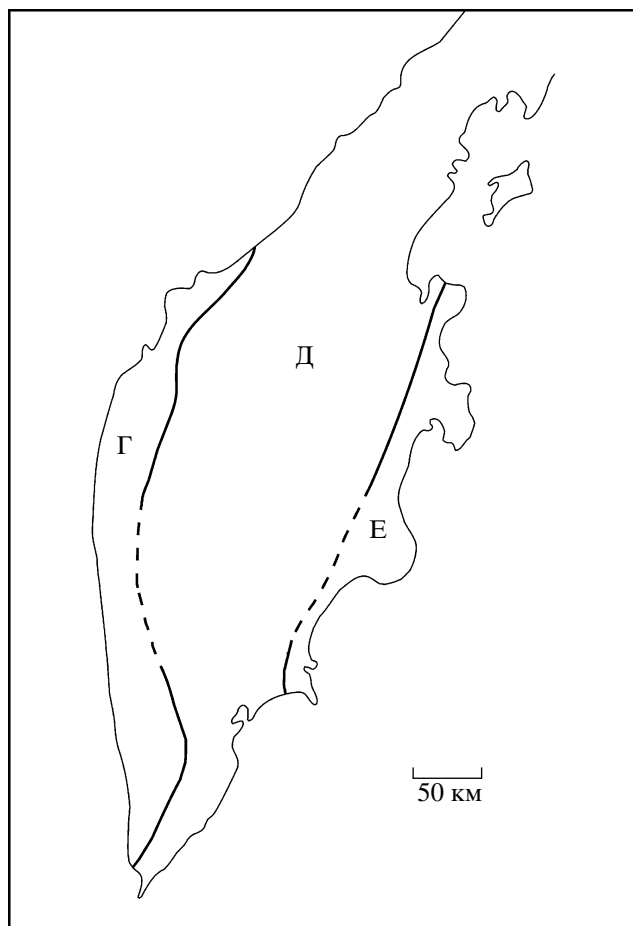
плитудные кривые в низкочастотной области представлены в форме максимума, предвещающего нисходящую ветвь, которая, как будет показано ниже, связана с астеносферным проводящим слоем. В более полной мере максимумы выражены на фазовых кривых. В семействе (27, 30–32, 34) амплитудные кривые имеют более сложный вид. Ряд кривых (34, 37, 30) характеризуется пологими участками кривых в области низких частот. Кривая 32 представлена восходящей асимптотической ветвью. Кривая 31 имеет слабо выраженный максимум. Такое поведение кривых МТЗ в данном семействе в значительной мере определяется трехмерными эффектами, связанными со сложными очертаниями восточных полуостровов Камчатки [5, 6]. Можно заключить, что в группе В на кривых МТЗ не проявился коровый слой повышенной электропроводности.

Рассмотрим поперечные кривые МТЗ (рис. 6). Они организованы в 5 семейств, которые включены в группы Г, Д, Е по степени проявления корового слоя повышенной электропроводности. В группу Г входят кривые 1–5, 9. Амплитудные кривые в своей правой части выходят в максимум. На фазовых кривых максимум проявился в более полном виде. Кривые этой группы подобны продольным кривым группы А. На кривых группы Г также не проявился коровый слой повышенной электропроводности.

Группа Д включает 3 семейства кривых. В семействе (6а, 6б, 7, 8, 11, 13) на амплитудных кривых коровый слой выражен в виде слабого минимума и выположенных ветвей в низкочастотной области. В лучшей мере он проявился на фазовых кривых



**Рис. 7.** Области проявления корового слоя на продольных кривых МТЗ. А, В – коровый слой на кривых не выражен; Б – коровый слой выражен в виде минимума на амплитудных или фазовых кривых.



**Рис. 8.** Области проявления корового слоя на поперечных кривых МТЗ. Г, Е – коровый слой на кривых не выражен; Д – коровый слой выражен в виде минимума на амплитудных или фазовых кривых.

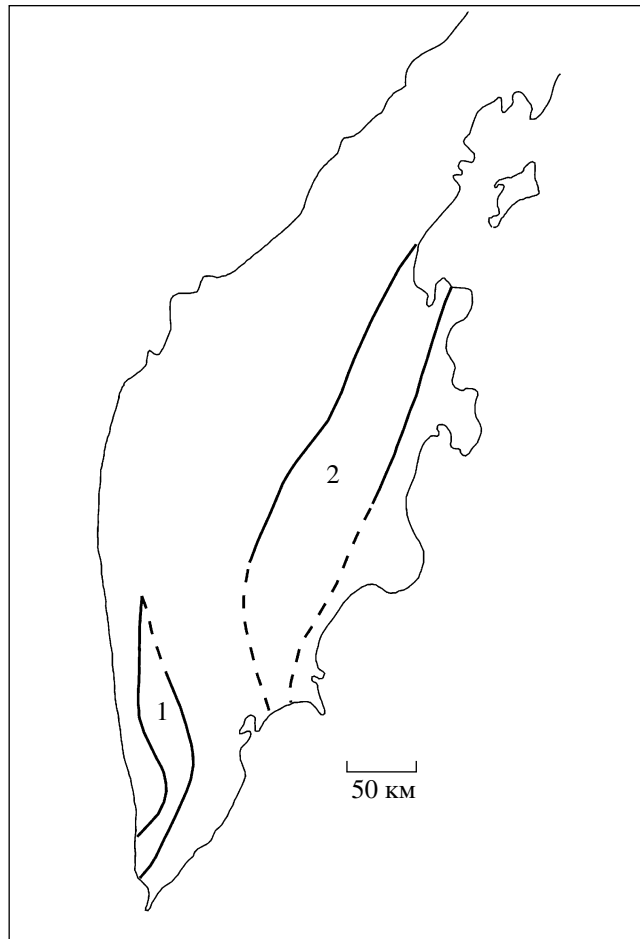
в виде минимума. В семействах (10, 14а, 15–19) и (2–22, 14в) на амплитудных или фазовых кривых коровый слой хорошо выражен в виде минимумов независимо от проводимости осадочного чехла. В семействе (24–30) большинство амплитудных кривых имеет минимум в правой части. Кривая 26 представлена нисходящей асимптотической ветвью. Фазовые кривые имеют хорошо выраженный минимум на периодах 100–200 с, подтверждающий наличие корового проводящего слоя.

Группа Е представлена семейством (31–34). Амплитудные кривые имеют восходящие асимптотические ветви в низкочастотной области, что обусловлено влиянием берегового эффекта. Фазовые кривые не всегда согласуются с амплитудными кривыми в этом семействе, что, по-видимому, связано с нарушением дисперсионных соотношений из-за влияния трехмерных неоднородностей, создаваемых восточными полуостровами Камчатки. В рассматриваемой группе кривых коровый слой не выражен.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным выполненного анализа составлены схемы распространения корового проводящего слоя, который в виде минимумов выражен на продольных и поперечных кривых МТЗ (рис. 7, 8). Области А и Г, где коровый проводящий слой не проявился на продольных и поперечных кривых МТЗ, практически совпадают между собой на большей части площади. Различие между указанными областями отмечается лишь на юго-западной Камчатке. Здесь область Г, по сравнению с областью А, занимает большую площадь, охватывающую почти половину южной оконечности полуострова. Отсутствие минимумов на продольных и поперечных кривых МТЗ можно объяснить двумя причинами. Во-первых, возможно, коровый проводящий слой отсутствует на Западной Камчатке. Во-вторых, следует отметить, что западное побережье Камчатки, к которому приурочены области А и Г, характеризуется увеличенной мощностью осадочных низкоомных терригенных отложений. В тектоническом





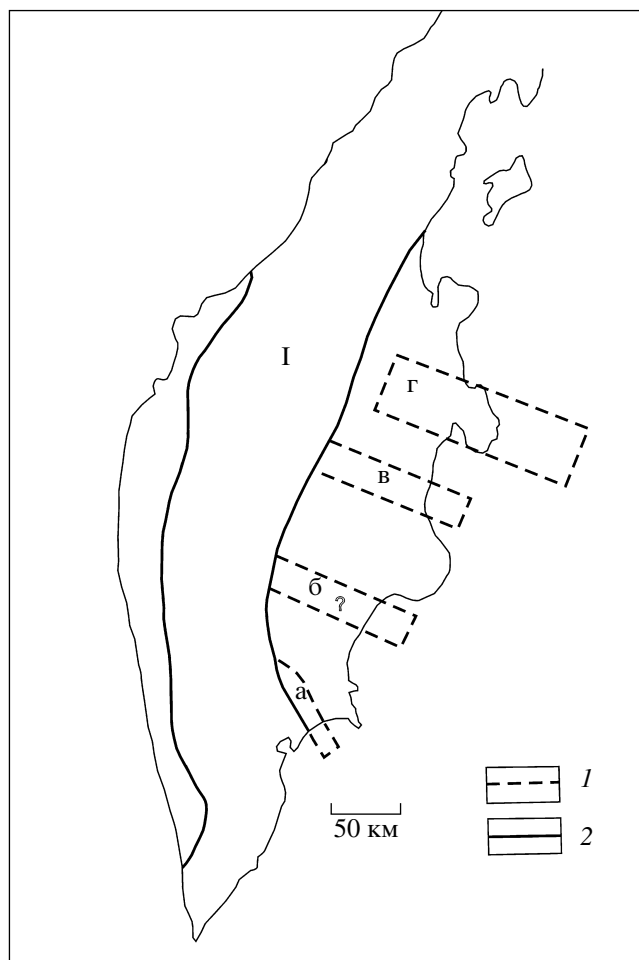
**Рис. 9.** Зоны различия между областями проявления корового слоя на продольных и поперечных кривых МТЗ. 1 – коровый слой проявляется только на продольных кривых; 2 – только на поперечных кривых.

плане здесь выделяется Западно-Камчатский прогиб. Если допустить, что коровый проводящий слой присутствует, то его проводимость будет меньше проводимости осадочного чехла или соизмерима с ней. В этом случае он не будет выражен минимумом на кривых МТЗ. Оба эти предположения следует проверить с помощью численного моделирования.

Рассмотрим область Б, выделенную по продольным кривым (рис. 7). В ней, как мы уже отмечали на кривых МТЗ, отчетливо проявился коровый слой. Здесь он также хорошо выражен на поперечных кривых МТЗ. Поэтому можно уверенно говорить, что в области Б коровый проводящий слой развит повсеместно. Эта область приурочена к Камчатско-Корякскому антиклинорию с наложенным вулканическим поясом. По данным формальной интерпретации продольных кривых МТЗ в указанной области можно выделить зону, которая приближена к дневной поверхности до глубины 15–20 км (районы 10, 13, 14а, 14в, 15–17, 19, 22, 23). Эта зона пространственно отвечает местоположению Главного Кам-

чатского разлома (рис. 2). Природа слоя может быть связана с гидротермальными растворами и магматическими расплавами.

Обратимся к области Д, в которой по поперечным кривым выделяется коровый проводящий слой (рис. 8). Данная область охватывает значительную часть площади полуострова. Она по ширине больше площади Б. Это различие требует пояснений. Известно, что разрешающая способность продольных и поперечных кривых к глубинным проводникам является различной. Продольные кривые обладают повышенной разрешающей способностью к глубинным проводникам, перекрытым высокоомными экранирующими породами земной коры. Указанные кривые подвержены индукционному влиянию электрических токов, концентрирующихся в глубинном проводнике. Из-за этого влияния, по данным формальной интерпретации продольных кривых МТЗ мы получим большую ширину корового проводника, чем по поперечным кривым. В нашем случае картина получилась обратной. Ширина

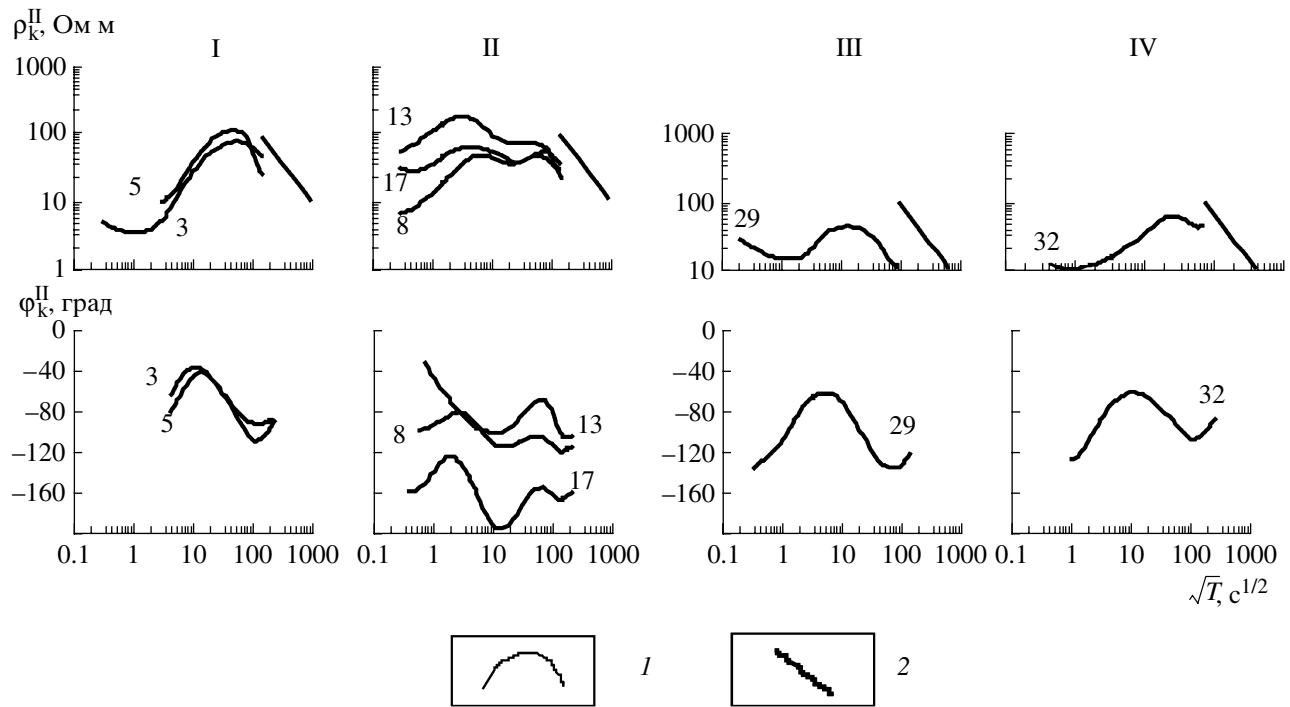


**Рис. 10.** Схема проявления корового слоя на продольных и поперечных кривых. 1 – границы области проявления корового слоя (I) по продольным и поперечным кривым; 2 – границы зон проявления корового слоя (а, б, в) и литосферного (г) слоев по поперечным кривым.

корового слоя по продольным кривым меньше, чем по поперечным кривым.

Более наглядную картину дает рис. 9, на котором изображено различие между схемами корового слоя по продольным и поперечным кривым. Здесь мы видим две зоны различия. Первая из них расположена в юго-западной части площади, вторая выделяется в виде полосы шириной около 200 км в восточной части Камчатки. Для первой зоны характерны минимумы на продольных кривых и их отсутствие на поперечных. Это различие можно объяснить влиянием индукционного эффекта за счет электрических токов, концентрирующихся в Гольгинском прогибе, заполненном повышенной мощностью низкоомными отложениями [3]. Вторая зона, как мы уже отмечали, характеризуется наличием низкочастотных минимумов на поперечных кривых и их отсутствием на продольных. Такая ситуация возможна в модели литосферы Восточной Камчатки, содержащей поперечные проводящие

зоны [6, 7]. При этом проводящие зоны должны быть достаточно протяженными, т.е. длина их должна быть в несколько раз больше ширины. В то же время ширина зон должна быть ограниченной, чтобы они не проявились на продольных кривых МТЗ. Оценки, выполненные с использованием численного трехмерного моделирования [7], показывают, что ширина зон должна быть не более 50 км. Проводящие зоны при такой ширине должны иметь продолжение на восточное побережье и в океан. Однако в зоне Е на поперечных кривых мы не видим хорошо выраженных минимумов, как в зоне Д. Это, как показывает численное моделирование, связано с искажением кривых за счет берегового эффекта и эффектов обтекания электрическим током сложных очертаний восточных полуостровов Камчатки. По данным причинам на поперечных кривых коровый слой не проявился. Таким образом, мы приходим к модели, в которой коровый слой (область Б) вытянут вдоль центральной части



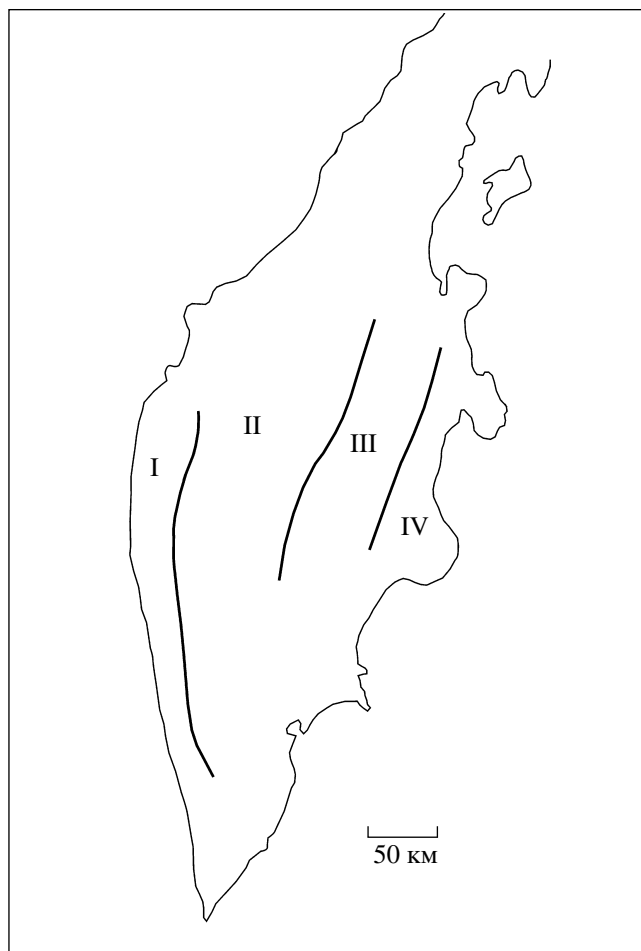
**Рис. 11.** Сводные продольные кривые МТЗ в совмещении со стандартной кривой кажущегося сопротивления. I, II, III, IV – кривые, отвечающие зонам с различной глубинной электропроводностью. 1 – кривая МТЗ; 2 – нормальная кривая кажущегося сопротивления.

п-ова Камчатка и сопряжен с поперечными коровыми проводящими зонами (а, б, в), имеющими продолжение в океан (рис. 10). Севернее располагается литосферная проводящая зона Г, имеющая продолжение в океан на расстояние 200 км. Она находится на продолжении Алеутской островной дуги [7]. Представленная геоэлектрическая модель может быть принята стартовой для решения обратной задачи с помощью численного трехмерного моделирования.

Рассмотрим, каким образом на кривых МТЗ проявляется астеносферный проводящий слой. Мы располагаем низкочастотными МТЗ по двум профилям в диапазоне периодов от первых минут до первых часов (рис. 1). Средние кривые районов, в которых располагаются низкочастотные МТЗ, дополнены значениями кажущихся сопротивлений в диапазоне периодов от 1500 до 15000 с. При этом низкочастотные ветви перемещены по оси сопротивлений до совмещения с высокочастотной кривой, полученной в результате статистического осреднения. Таким образом, получены сводные продольные и поперечные кривые МТЗ, свободные от локальных гальванических искажений. Низкочастотные ветви сводных продольных и поперечных кривых могут быть затронуты действием эффекта S и рядом других эффектов. Особенно искажены

кривые, расположенные вблизи сложных очертаний береговой линии. Интерпретация таких кривых МТЗ возможна лишь с привлечением трехмерного численного моделирования. На этапе качественной интерпретации мы выбрали только отдельные продольные кривые, в меньшей мере подверженные искажениям в низкочастотной области. Для этого использованы данные численного моделирования МТ-поля Камчатки [5].

Кривые МТЗ изображены на рис. 11. Они расположены в зонах I, II, III, IV, различных по глубинной электропроводности (рис. 12). Во всех зонах амплитудные кривые в своей правой части представлены нисходящей ветвью, выходящей в отдельных случаях в минимум. Данные низкочастотные ветви кривых располагаются ниже стандартной кривой МТЗ. Важно отметить, что фазовые кривые в рассматриваемом диапазоне периодов имеют минимум, что свидетельствует в пользу существования астеносферного проводящего слоя. По амплитудным кривым можно грубо оценить поведение его кровли. Она с глубины 150 км в зоне I поднимается до глубины 70 км в зоне III и опускается в сторону Восточной Камчатки. Выступ астеносферного слоя приурочен к области современного вулканизма. Природа астеносферного слоя связывается с частичным плавлением ультраосновных пород.



**Рис. 12.** Зоны с различной глубиной залегания астеносферного проводящего слоя. I – 150 км, II – 100 км, III – 70 км, IV – 120 км.

## ВЫВОДЫ

Интерпретация кривых МТЗ по направлениям вдоль и поперек п-ова Камчатка дает возможность разделить влияние индукционного и S-эффектов, связанных с резким контрастом проводимости верхнего слоя на несколько порядков на суше и в океане. Амплитудные продольные и поперечные кривые МТЗ в сильной мере подвержены влиянию локальных геоэлектрических неоднородностей. Влияние этих неоднородностей удалось погасить с помощью конформного осреднения.

В результате качественной бимодальной интерпретации средних продольных и поперечных кривых МТЗ выполнено районирование Камчатки на области с различной электропроводностью земной коры. В западной части Камчатки на кривых МТЗ коровый слой не проявился. В центральной части полуострова выделяется область шириной около 200 км, протяженностью 1200 км, в которой коро-

вый слой проявился как на поперечных, так и на продольных кривых. В средней части области выделяется зона, в которой коровый слой приближен к дневной поверхности до глубин 15–20 км и характеризуется увеличенной проводимостью. Данная зона приурочена к Камчатско-Корякскому антиклинорию с наложенным вулканическим поясом, в основании которого предполагается Центрально-Камчатский глубинный разлом. В восточной части полуострова выделяется область, где коровый слой проявляется только на поперечных кривых. Предполагается, что здесь земная кора содержит поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в Тихий океан. К таким зонам приурочены крупные области современного вулканизма. По средним продольным кривым МТЗ выделяется астеносферный проводящий слой, кровля которого, по грубым оценкам, наиболее приподнята под областью современного вулканизма.

Таким образом, в результате качественного анализа продольных и поперечных кривых МТЗ мы приходим к модели, в которой крупные центры современного вулканизма Камчатки приурочены к поперечным проводящим зонам в земной коре и к поднятию астеносферного выступа, вытянутого вдоль Камчатки. Результаты качественной интерпретации МТЗ требуют уточнения с привлечением численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и ДВО РАН (проект №06-05-96028).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кузнецов В.А. и др. Геоэлектрическая модель Прибайкалья / Геолого-геофизические и подводные исследования озера Байкал. М.: Институт океанологии АН СССР, 1979. С. 126–141.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков А.Д., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Изд-во Диалог-МГУ, 1997. 161 с.
3. Геология СССР. Камчатка, Курильские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1974. 733 с.
4. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
5. Мороз Ю.Ф., Кобзова В.М. Физическое и численное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 86–98.
6. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А. Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58–66.

7. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004. № 6. С. 54–67.
8. Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. 1982.V. 47. P. 1204–1214.

@@@@@