

Научные статьи

УДК 550.837

ГЛУБИННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ СРЕДИННОГО КАМЧАТСКОГО МАССИВА, ГАНАЛЬСКОГО ВЫСТУПА И ЦЕНТРАЛЬНО-КАМЧАТСКОГО ПРОГИБА

© 2016 Ю.Ф. Мороз^{1,2}, В.А. Логинов^{1,3}, И.С. Улыбышев^{1,3}

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006,
Петропавловск-Камчатский; e-mail: morozuf@kscnet.ru

²Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ,

³Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,
683032, Петропавловск-Камчатский

Рассмотрена методика и результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ) по профилю, расположенному в районе сложнейшего тектонического узла Южной Камчатки. По данным анализа магнитотеллурических параметров геоэлектрическая среда близка к двумерно-неоднородной. Выполнен анализ возможных искажающих эффектов кривых МТЗ с привлечением пробных моделей, изученных с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля. В качестве основных для количественной интерпретации приняты продольные кривые МТЗ, которые являются поперечными для Ганальского выступа и структур, осложняющих Срединный Камчатский массив и Центрально-Камчатский прогиб. В результате инверсии кривых в рамках ТМ-моды с использованием численного моделирования получен геоэлектрический разрез, который сопоставлен с данными гравиметрии, магнитометрии и сейсмотомографии. В геоэлектрическом разрезе земной коры и верхней мантии выделены субвертикальные, изометричные и субгоризонтальные аномалии как повышенной, так и пониженной электропроводности. По данным электропроводности и сейсмической скорости выполнена оценка пористости пород в районе коровой аномалии Ганальского выступа. Природа коровой аномалии связывается с гидротермальными растворами и магматическими расплавами.

Ключевые слова: электропроводность, магнитотеллурическое зондирование, береговой эффект, пористость, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Исследуемый район Южной Камчатки (рис. 1) характеризуется сложным геологическим строением (Геология ..., 1964). Здесь, в отличие от всей территории полуострова, где преобладает линейная зональность тектонических сооружений северо-восточного простирания, развиты структуры северо-западной поперечной ориентировки, которые сопровождаются глубинными разломами. В этой части Камчатки выходят на поверхность наиболее древние (палеозойские, протерозойские) метаморфические породы, с которыми связывается консолидированный

фундамент, подстилающий кайнозойский осадочно-вулканогенный чехол, которые именуются Камчатским массивом и Ганальским выступом, различающиеся по степени метаморфизма. К ним приурочено начало Центрально-Камчатского прогиба северо-восточного простирания в основании которого предполагается глубинный разлом, проникающий в земную кору, и, возможно, в верхнюю мантию. Область сочленения выступов и глубинных разломов северо-восточного и северо-западного простираний представляют собой «тектонический узел», определяющий особенности глубинного строения Камчатки.

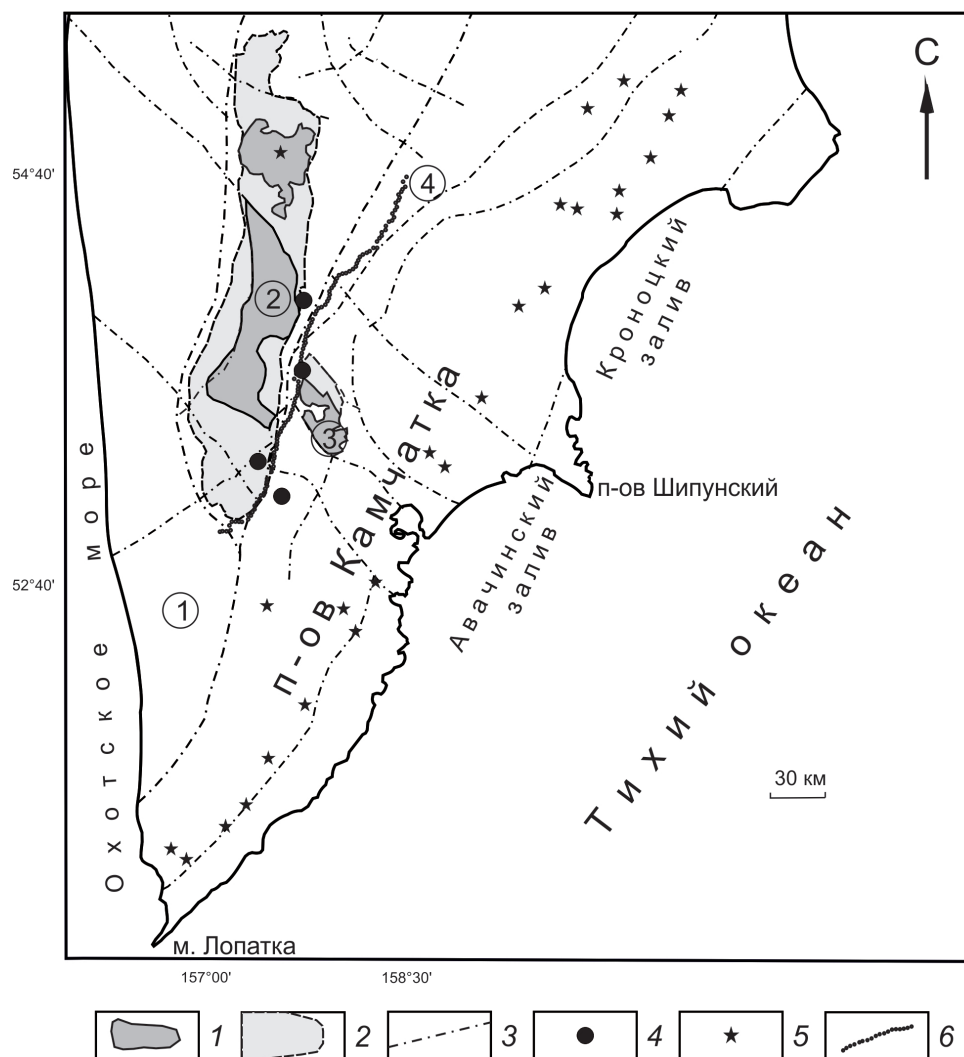


Рис. 1. Схема основных тектонических элементов строения южной Камчатки (Карта ..., 1999) и расположения профиля МТЗ: 1 — выходы древних пород протерозойского и палеозойского возраста; 2 — выходы пород мелового возраста; 3 — разломы, выделяемые по геолого-геофизическим данным; 4 — рудопроявления цветных и благородных металлов; 5 — действующие вулканы; 6 — профиль МТЗ. Цифрами в кружках обозначены: 1 — Западно-Камчатский прогиб; 2 — Срединный Камчатский массив; 3 — Ганальский выступ; 4 — Центрально-Камчатский прогиб.

Район характеризуется повышенной рудоносностью и широким проявлением гидротермальной активности. Изучение его глубинного строения представляет повышенный научный и практический интерес. В 2007 г. здесь предприятием ОАО «Камчатгеология» выполнены работы методом магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования¹. Авторами настоящей работы выполнен качественный анализ и интерпретация магнитотеллурических данных по профилю, пересекающему Срединный Камчатский массив и Ганальский выступ и

выходящему в Центрально-Камчатский прогиб (рис. 1). Эти исследования дают возможность получить новую информацию о структуре глубинной электропроводности и уточнить существующие представления о глубинном строении региона. Этой теме и посвящена настоящая статья.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В строении района принимают участие домеловые, меловые, палеогеновые, неогеновые и четвертичные образования (Геология ..., 1964). Домеловые образования представлены гнейсами, кристаллическими сланцами, амфиболитами, зеленокаменными породами, кварцитами, эффузивами, туфами, филлитами. Общая мощность

¹ Нурмухамедов А.Г. Отчет о результатах работ АМТЗ-МТЗ-ГМЗ на региональном увязывающем профиле МОВЗ-МТЗ м. Лопатка — с. Хаилино. Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал ФБУ «ТФИ по Дальневосточному федеральному округу», 2010. 350 с.

метаморфических пород фундамента оценивается до 10–12 км.

Верхнемеловые породы слагают нижнюю часть осадочно-вулканогенного чехла. Они разделяются на терригенную и вулканогенно-кремнистую толщи. Нижняя толща сложена песчаниками, алевролитами, аргиллитами, сланцами. Мощность ее достигает 3–4 км. Верхняя толща состоит из спилитов, базальтовых и андезитовых порфириров, их туфов, туфогенно-кремнистых пород. Мощность толщи составляет 5–9 км.

Кайнозойские отложения широко распространены в Центрально-Камчатском и Западно-Камчатском прогибах (рис. 1), где отмечается увеличение их мощности. Они представлены осадочными и туфогенно-осадочными породами, в том числе конгломератами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами, туффитами. Местами встречаются осадочно-вулканогенные образования, представленные кислыми и средними эффузивами, туфами, туфопесчаниками.

Отложения верхнего кайнозоя представлены основными, средними, реже кислыми лавами, которые перемешиваются с туфами, туфобрекчиями, туфоконгломератами, игнимбритами.

На исследуемой территории выражены крупные тектонические элементы: Срединный Камчатский массив, Ганальский выступ, Западно-Камчатский и Центрально-Камчатский прогибы. Здесь проявилась поперечная зональность тектонических элементов, выраженная в виде северо-западного простирания (Карта ..., 1999).

Представление о глубинном строении района можно получить по данным магнитной и гравиметрической съемок, глубинного сейсмического (ГСЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) (Глубинное ..., 1978; Мороз, 1991; Ривош, 1963). В магнитном поле ΔT_a выражены локальные аномалии и аномальные зоны положительного и отрицательного значения, как северо-восточного, так и северо-западного простирания (Ривош, 1963). Положительные и отрицательные аномальные зоны северо-западного простирания имеют продолжение в сторону Восточно-Камчатского шельфа и на северо-запад в виде мелких овальных контуров.

Срединный Камчатский массив и Ганальский выступ выражены в магнитном поле интенсивной отрицательной аномалией, что обусловлено составом метаморфических пород, подвергшихся процессам мигматизации и гранитизации. Гравитационное поле Срединного Камчатского массива и Ганальского выступа в редукции Буге характеризуется слабой дифференциацией и повышенной интенсивностью его региональной составляющей, что позволяет рассматривать данную область, как наиболее жесткий и устойчивый блок земной коры. Здесь,

так же как и в магнитном поле, локальные аномалии имеют северо-восточное и северо-западное простирание.

По данным ГСЗ (Глубинное ..., 1978), мощность гранитно-метаморфического слоя Срединного Камчатского массива и Ганальского выступа составляет 14–19 и 16–18 км соответственно, а в Центрально-Камчатском прогибе — 12–14 км. Мощность земной коры оценивается в 28–29 км, под Центрально-Камчатским прогибом она заметно уменьшается. Геоэлектрические разрезы Срединного Камчатского массива и Ганальского выступа мало изучены. О физических свойствах пород, слагающих метаморфический фундамент, можно судить по данным ГСЗ по профилям, пересекающим Срединный Камчатский массив и Ганальский выступ (Глубинное ..., 1978), где кровля гранитно-метаморфического слоя местами выходит на дневную поверхность. За пределами этих выходов кровля слоя характеризуется скоростью продольных волн 6.2 км/с, а в зоне распространения ультраметаморфических пород отмечается понижение скорости до 5.8 км/с. Сейсмическая граница 5.8–6.2 км/с связывается с зоной фациального перехода от вулканогенно-осадочных пород к кристаллическим сланцам, то есть зоной переработки вулканогенно-осадочных пород в метаморфические образования. Пониженные значения граничных скоростей (5.8 км/с) в средней части Срединного Камчатского массива объясняются развитием процессов мигматизации и гранитизации исходных пород метаморфического комплекса, сопровождающихся выносом магния, железа, алюминия и привносом кремния, натрия и калия. Это привело к замене более плотных минералов граната, ставролита и диогена менее плотными — кварцем, плагиоклазом и ортоклазом (Геология ..., 1964).

В районе Ганальского выступа граница кровли гранитно-метаморфического слоя, по сравнению со Срединным Камчатским массивом, характеризуется увеличением скорости на 0.4 км/с. Здесь, в средней части поднятия, не отмечается разуплотнение пород, что обусловлено основным составом пород и отсутствием процессов мигматизации и гранитизации (Геология ..., 1964).

Информацию о скоростных свойствах литосферы дают данные сейсмической томографии, представленные в виде разрезов продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн, а также их отношения V_p/V_s (Гонтовая и др., 2010). Земная кора в районе Срединного Камчатского массива и Ганальского выступа характеризуется повышенной скоростью сейсмических волн. В земной коре Центрально-Камчатского прогиба на глубинах 20–40 км выделяется слой пониженной скорости

сейсмических волн V_p и повышенных значений V_p/V_s . Природа слоя связана с повышенной трещиноватостью и возможной насыщенностью пород жидкими флюидами.

Характеристика геоэлектрического разреза представлена в работах (Белявский, Алексанова, 2014; Мороз, 1985, 1991, 1996). В верхней части разреза залегают четвертичные вулканогенные и осадочные образования мощностью первые сотни метров с удельным электрическим сопротивлением в сотни — первые тысячи Ом·м и более. Ниже залегает неоген-палеогеновая толща со средним продольным сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом·м, мощностью от 0 до 5 км. Она подстилается комплексом верхне-меловых осадочно-вулканогенных образований со средним продольным сопротивлением от десятков до первых сотен Ом·м, а метаморфический фундамент имеет сопротивление в первые тысячи Ом·м. Глубинная часть разреза содержит коровый и астеносферный проводящие слои.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В исследуемом районе предприятием ОАО «Камчатгеология» выполнены магнитотеллурические зондирования по профилю протяженностью 210 км с шагом 1–5 км (рис. 2). Регистрация магнитотеллурического поля осуществлялась в диапазоне периодов 0.01–1000 с станциями MTU-5A производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Использована четырехэлектродная крестообразная электрическая измерительная установка, заземленная слабополяризующимися электродами. Длина электрических линий — 80 м, азимут линий — 30° и 120°. Магнитные датчики также ориентировались по азимутам 30° и 120°. Для подавления влияния ветровых помех и микросейсм датчики размещались в ямы глубиной около 30 см и присыпались землей. Вертикальные датчики зарывались в землю, а в сложных условиях, на каменистой почве, устанавливались с использованием треноги.

Измерения магнитотеллурического поля осуществлялись несколькими станциями MTU-5A. Для подавления промышленных помех использована методика синхронных измерений с использованием удаленной базовой станции. На участках профиля с низким уровнем промышленных помех в качестве базовой станции использовалась станция на одной из точек профиля.

Первичная обработка магнитотеллурических данных выполнена с помощью специализированных программ. На первом этапе с использованием программы SSMT-2000 (раз-

работчик «Phoenix Geophysics Ltd») рассчитаны электромагнитные поля и выполнено Фурье-преобразование. Полученные кросс-спектры в широком частотном диапазоне на заданной сетке частот пересчитаны в компоненты тензора импеданса. В дальнейшем осуществлена статистическая робастная отбраковка полученных на каждой частоте массивов данных с целью подавления влияния собственных шумов аппаратуры, случайных и техногенных помех. Углубленная окончательная обработка осуществлена с использованием программы MT-Corrector (разработчик ООО «Северо-Запад»). В результате получены кривые импеданса и фазы импеданса в диапазоне периодов от 0.01 до 1000 с, которые использованы авторами для качественного анализа и решения обратной задачи. Точность определения модулей импеданса составляет первые проценты, фаз импеданса — первые градусы.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Для определения методики интерпретации МТЗ авторами выполнена оценка характера и степени геоэлектрической неоднородности среды с использованием тензора импеданса. Анализ осуществлялся по полярным диаграммам импеданса (Бердичевский, Дмитриев, 2009), параметру неоднородности (Barth, 1988) и параметру асимметрии (Swift, 1967). Параметр неоднородности имеет значения первые десятые доли единицы на коротких периодах. На длинных периодах указанный параметр возрастает, что связано с влиянием крупных структур. Параметр асимметрии (Swift, 1967) свидетельствует о том, что на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с вытянутостью Камчатки и осложняющих ее крупных структур в северо-восточном направлении. В основу интерпретации положены кривые, полученные в главных направлениях. Они в большинстве случаев ориентированы по простиранию и вкрест простирания основных структурных зон Камчатки. Данные кривые будем называть продольными (||) и поперечными (⊥). Амплитудные (ρ) и фазовые (ϕ) кривые связаны между собой дисперсионными соотношениями, что позволяет их использовать для совместной интерпретации.

Анализ показывает, что продольные и поперечные кривые МТЗ (рис. 3) подвержены влиянию ρ -эффекта (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Этот эффект выражен в том, что амплитудные кривые, имея близкую форму, сильно расходятся

ГЛУБИННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

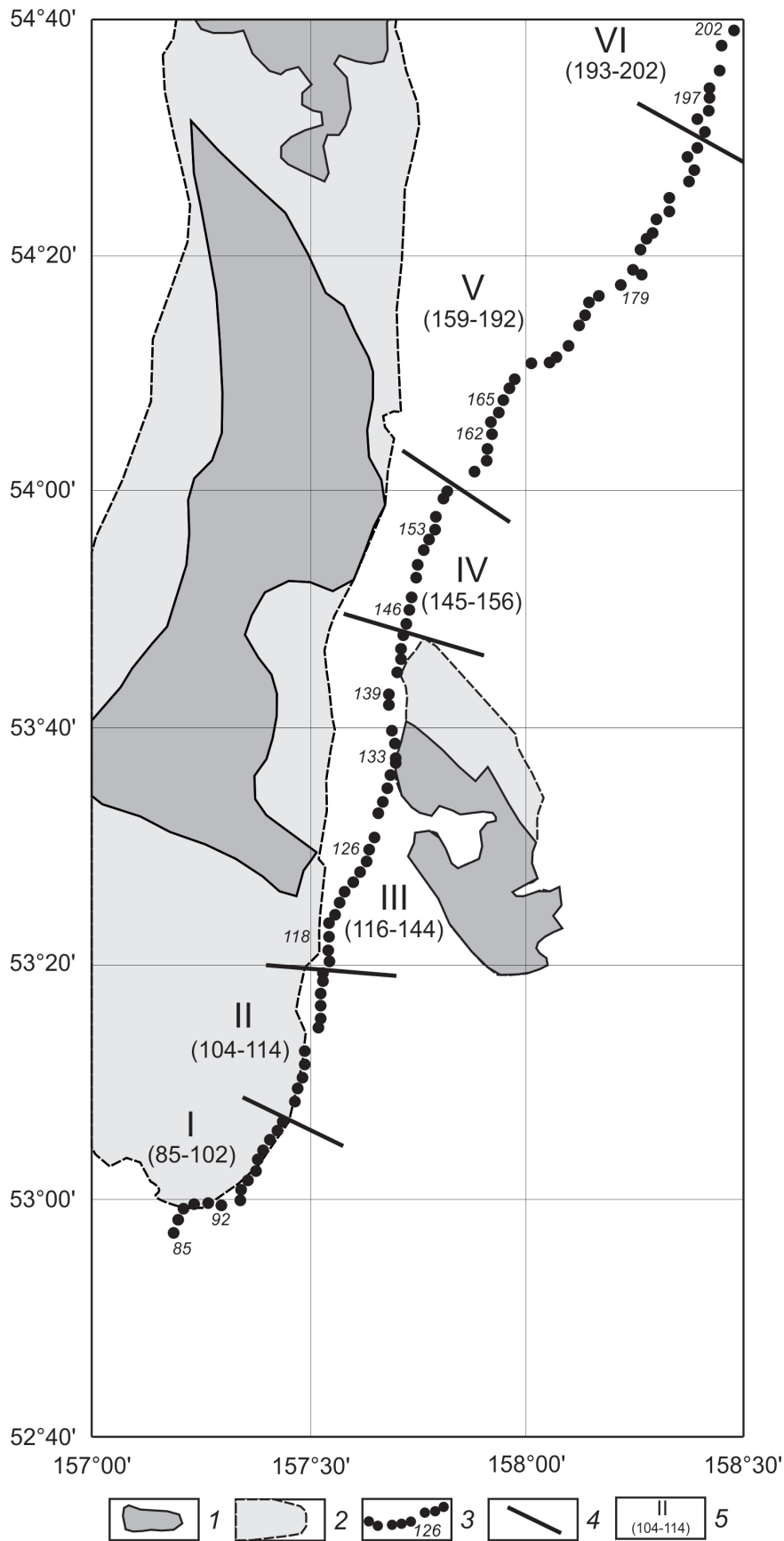


Рис. 2. Схема расположения зон семейств конформных кривых МТЗ: 1 — выходы древних пород протерозойского и палеозойского возраста; 2 — выходы пород мелового возраста; 3 — профиль МТЗ (цифрами обозначены номера отдельных кривых МТЗ представленных на рис. 9); 4 — границы зон; 5 — номера семейств (в скобках указаны номера кривых, входящих в состав семейств кривых).

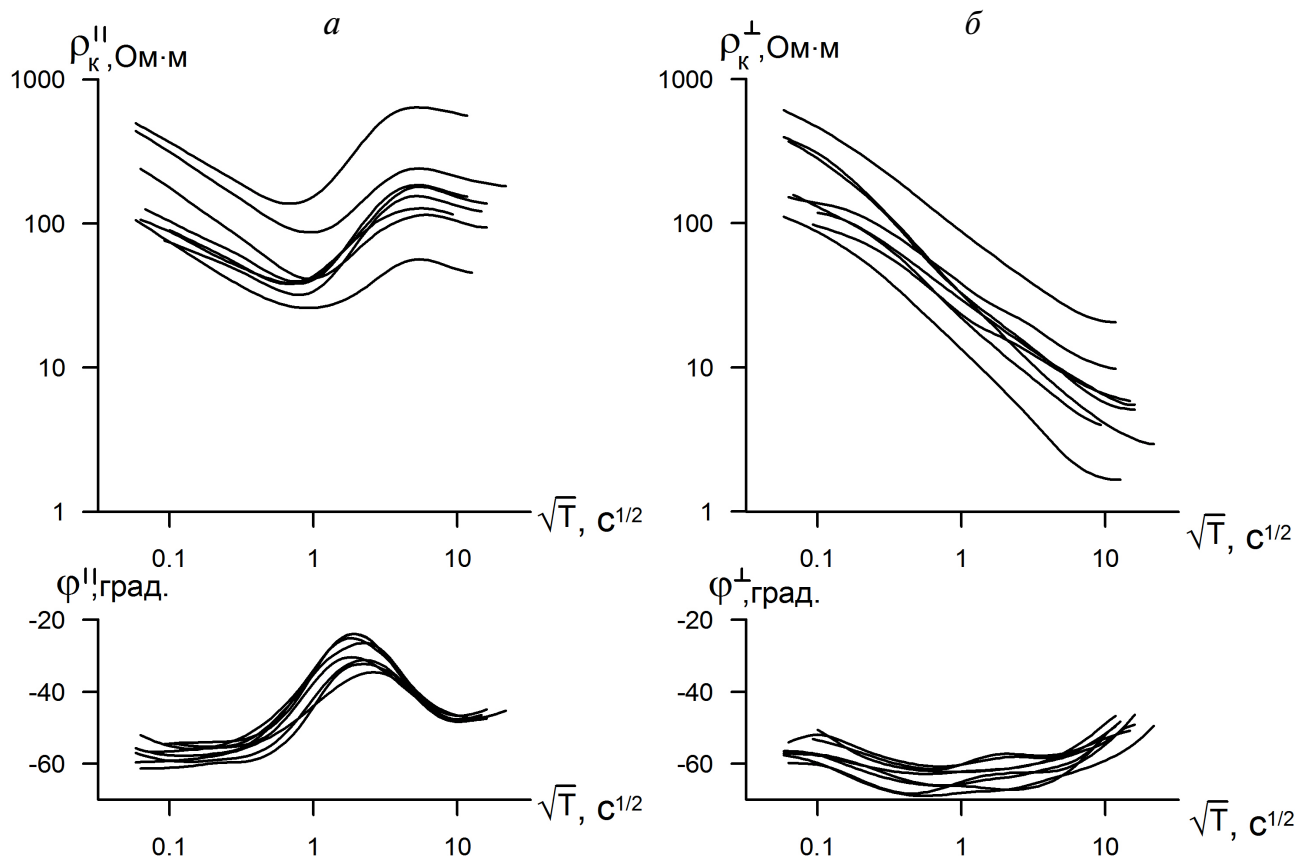


Рис. 3. Совмещенные продольные (а) и поперечные (б) кривые МТЗ на отдельном участке профиля.

по уровню сопротивлений, а фазовые кривые близки. Он имеет гальваническую природу и связан с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей. Эффект затрудняет качественный анализ поведения кривых МТЗ, характеризующих глубинную электропроводность крупных структур в районе профиля (рис. 1), поэтому предпринята попытка подавления данного эффекта путем конформного осреднения кривых МТЗ. Суть методики состоит в том, что форма кривой МТЗ отражает определенный тип геоэлектрического разреза. Следовательно, организовав кривые МТЗ, близкие по своей форме, в семейства, можно по профилю выделить зоны с различным глубинным геоэлектрическим разрезом. Процедура организации кривых МТЗ в семейства и получения средних кривых в каждом семействе проводилась в два этапа. На первом этапе получены средние продольные и поперечные кривые, в значительной мере свободные от локальных гальванических эффектов. Однако, они подвержены влиянию геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенной толщи. Поэтому, для получения кривых МТЗ, характеризующих глубинную электропроводность, предпринят второй этап организации средних кривых, близких по своей форме, в семейства. В результате осреднения кривых в семейства получены средние

продольные и поперечные кривые МТЗ для зон, выделенных на профиле (рис. 4, 5). Полученные кривые дают качественную информацию о распределении глубинной электропроводности.

Сравнивая семейства средних поперечных и продольных кривых МТЗ по формальному признаку (рис. 4), мы видим, что поперечные кривые в низкочастотной области расходятся по уровню сопротивлений почти на 2.5 порядка. Продольные кривые в низкочастотной области различаются не более чем в три раза. Такое расхождение поперечных кривых по сравнению с продольными кривыми свидетельствует о сильном влиянии крупных геоэлектрических неоднородностей, которыми могут быть Срединный Камчатский массив, Ганальский выступ и Южная часть Центрально-Камчатского прогиба. В первую очередь это влияние может быть связано с эффектом S (Бердичевский, Дмитриев, 2009). В пользу проявления этого эффекта свидетельствует корреляция кажущихся сопротивлений в зависимости от периода в низкочастотной области. В высокочастотной области такая корреляция существенно ослаблена. Также важно отметить, что фазовые кривые в низкочастотной области заметно сближаются. Продольные кривые по сравнению с поперечными кривыми слабо затронуты эффектом S.

ГЛУБИННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

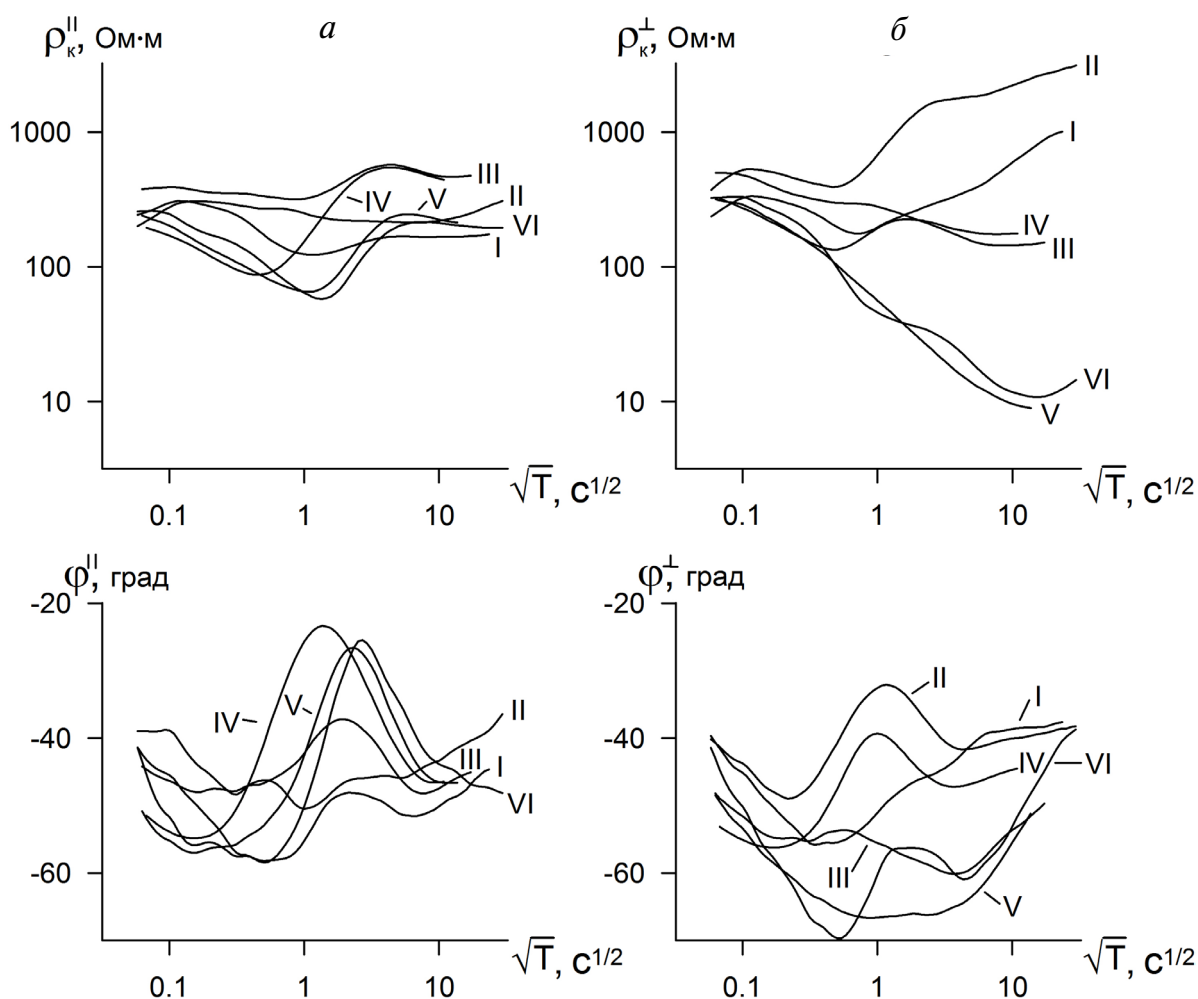


Рис. 4. Совмещенные средние продольные (а) и поперечные (б) кривые МТЗ для выделенных зон семейств (см. рис. 2).

Рассмотрим сопоставление средних продольных и поперечных кривых (рис. 5) по зонам, представленным на рис. 2. Анализ кривых дает возможность определить, в какой мере крупные геологические структуры выражены в поведении кривых МТЗ.

Зона I приурочена к границе Западно-Камчатского прогиба и Южной части Срединного Камчатского массива. Продольные и поперечные средние кривые совпадают в высокочастотной области. Они имеют минимумы на периодах около 1 с, отражающие наличие слоя более низкого сопротивления. В низкочастотной области кривые расходятся по уровню сопротивлений. Продольная кривая характеризует слабое изменение сопротивлений с глубиной. Поперечная кривая, как мы уже отмечали, подвержена действию эффекта S за счет влияния высокоомных пород Срединного Камчатского массива.

Зона II расположена в районе юго-восточного блока верхнемеловых пород Срединного Камчатского массива. В высокочастотной области продольные и поперечные кривые так же совпадают и имеют минимумы на периодах около 0.25 с.

В отличие от I зоны, здесь на поперечной кривой фиксируется максимум (~ на 1 с), связанный с высокоомным слоем. В низкочастотной области кривые кажущегося сопротивления расходятся, а фазовые кривые импеданса практически совпадают, что связано с эффектом S из-за влияния высокоомных пород.

III зона приурочена к области сочленения Ганальского выступа и Срединного Камчатского массива. Продольная и поперечная кривые практически совпадают в высокочастотной области. С понижением частоты кривые расходятся в виде «ножниц». При этом поперечная кривая, в отличие от I и II зон, занимает более низкий уровень по сопротивлению. Отклонение низкочастотной ветви кривой может быть связано с эффектом S за счет низкоомных отложений и возможным влиянием проводящего глубинного разлома.

IV зона приурочена к южной части Центрально-Камчатского прогиба, разделяющего Срединный Камчатский массив и Ганальский выступ. Продольная и поперечная кривые близки по уровню сопротивления в высокочастотной области. Здесь на амплитудных кривых на

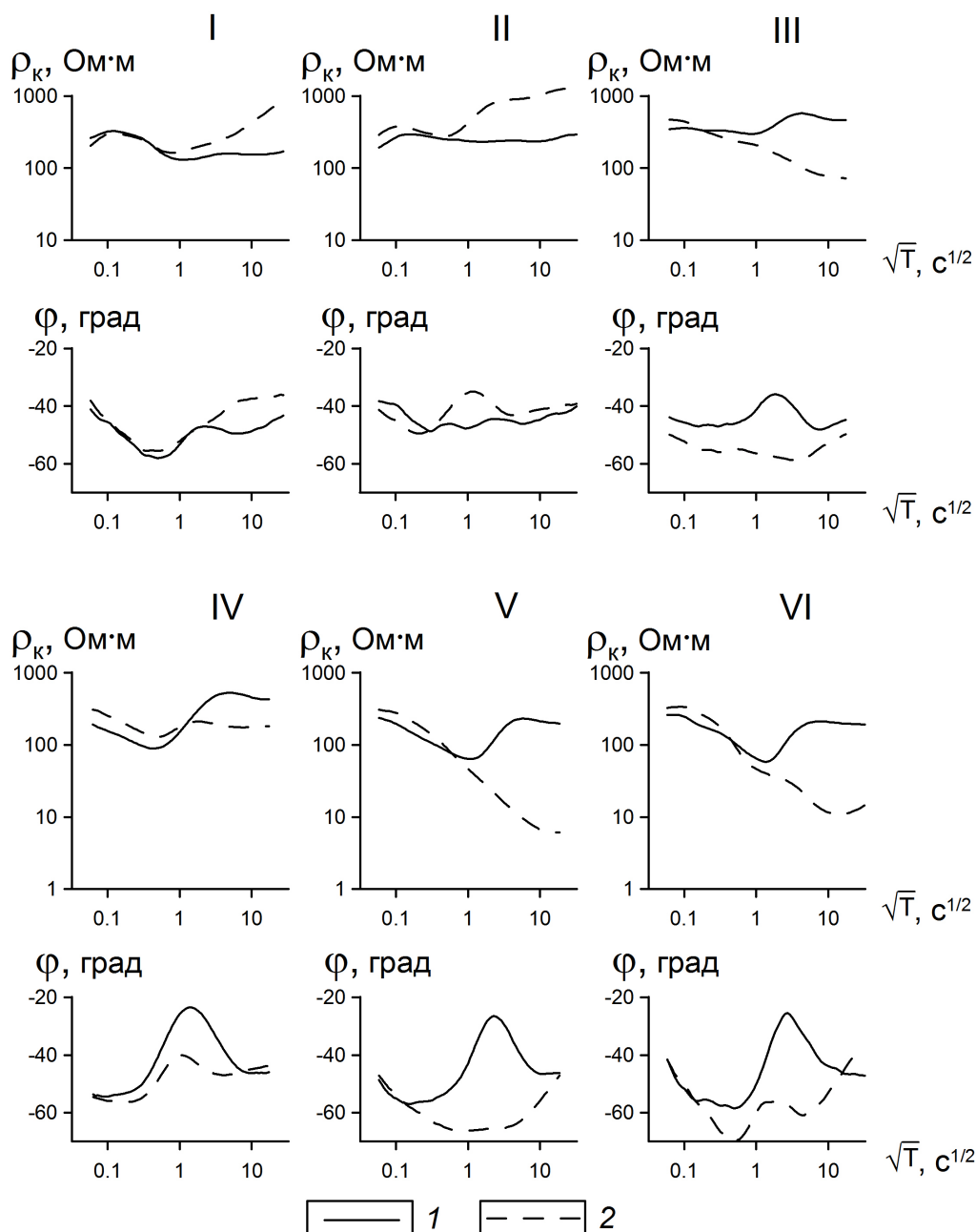


Рис. 5. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ для выделенных зон семейств (см. рис. 2): 1 — продольные кривые; 2 — поперечные кривые.

периодах около 0.25 с выражен минимум, связанный с осадочным чехлом прогиба. В низкочастотной области кривые расходятся в меньшей мере, чем в III зоне. Расхождение вызвано отклонением поперечной кривой в области низких сопротивлений за счет эффекта S. В этой зоне на кривых выражен максимум, который хорошо виден на фазовых кривых. Он отражает наличие высокоомного слоя в разрезе.

Зона V расположена в Центрально-Камчатском прогибе. В этом районе ширина прогиба возрастает до 20 км и увеличивается мощность осадочного чехла, что выражено минимумом на продольной кривой на периоде около 1 с. Высоко-

омный слой земной коры на амплитудной продольной кривой проявился на периодах 25–30 с. Более контрастно он проявился на фазовой кривой. Поперечная кривая выражена нисходящей асимптотической ветвью, выходящей в минимум. Она подвержена сильному влиянию эффекта S, на что указывает совпадение фазовых кривых на периоде 300 с.

Зона VI также приурочена к Центрально-Камчатскому прогибу, где его ширина в два раза больше, чем в V зоне. Продольная и поперечная кривые совпадают в высокочастотной области. На продольной кривой выражен минимум на периоде около 1 с. На продольной и нисходящей

ветви поперечной кривой выражены максимумы на периодах 25–50 с. В большей мере они проявились на фазовых кривых. Нисходящая ветвь поперечной кривой на периодах больше 1 с связана с эффектом S.

Выявленные особенности поведения кривых МТЗ хорошо выражены в псевдоразрезах кажущегося электрического сопротивления и фаз импеданса (рис. 6). На псевдоразрезе продольного кажущегося сопротивления зоны II, III и IV на низких частотах характеризуются повышенным электрическим сопротивлением. Зоны I, IV, V, VI на периодах 0.5–10 с отличаются пониженным электрическим сопротивлением. В лучшей мере особенности геоэлектрического разреза выражены в поведении продольной фазы. В зонах IV, V, VI на периодах 10–100 с проявился слой повышенного электрического сопротивления, под которым отмечается понижение электрического сопротивления. Это объясняется тем, что на фазовых кривых импеданса глубинная часть разреза проявляется на более коротких периодах.

На псевдоразрезе поперечного кажущегося электрического сопротивления на низких частотах в зонах III, V и VI выражены аномалии повышенной электропроводности, что связано с эффектом S. На псевдоразрезе поперечной фазы импеданса данный эффект выражен в меньшей мере. Пониженные электрические сопротивления, характерные для осадочно-вулканогенного чехла, проявляются в виде повышенных значений отрицательной фазы (-63° – -69°) на периодах 0.5–10 с.

Таким образом, выполненный качественный анализ свидетельствует о том, что средние кривые выделенных зон отражают особенности в распределении глубинной электропроводности Срединного Камчатского массива, Ганальского выступа и Центрально-Камчатского прогиба. Следует отметить, что средние кривые зон дают лишь обобщенное представление о структуре электропроводности земной коры и верхней мантии.

Для получения более полной информации о геоэлектрической среде необходима интерпретация индивидуальных кривых МТЗ. Следует отметить, что кривые МТЗ могут быть подвержены влиянию берегового эффекта (Мороз, Мороз, 2011) за счет электрических токов, концентрирующихся в морских водах Охотского моря и Тихого океана, омывающих Камчатку. В этой связи в пробной 3D-модели южной части Камчатки был изучен береговой эффект (рис. 7). В ней мощность и удельное электрическое сопротивление осадочно-вулканогенного чехла приняты на суше постоянными. Это дает возможность оценить влияние берегового эффекта

независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенного чехла. Геоэлектрические параметры верхнего слоя на суше приняты по обобщенным данным МТЗ (Мороз, 1991). Мощность осадочно-вулканогенного слоя составляет 3 км, а удельное электрическое сопротивление 20 Ом·м. Удельное электрическое сопротивление морской воды принято 0.25 Ом·м. Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным, электропроводность в нем закономерно уменьшается с глубиной.

В результате моделирования по алгоритму Mackie (Mackie et. al., 1994) получены продольная, поперечная и локально-нормальная кривые МТЗ в выбранных пунктах по профилю (рис. 7). Анализ показал, что модельные продольная и поперечная кривые отклоняются от локально-нормальной кривой на периодах более 400 с. Это отклонение на периоде 1000 с составляет первые десятки процентов (рис. 8) и обусловлено влиянием берегового эффекта за счет резкого контраста электропроводности суши и моря.

Также рассмотрен береговой эффект в 3D-модели, содержащей литосферный проводящий слой. Последний введен в модель по данным магнитотеллурических исследований (Мороз, 1991). Проводящий слой выявлен на глубинах 20–30 км с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. На основании этого в модель со стандартным распределением глубинной электропроводности введен литосферный проводящий слой на указанных глубинах с удельным электрическим сопротивлением 50 Ом·м. Амплитудная продольная кривая практически совпадает с локальной нормальной кривой до периода 1000 с (рис. 8). При этом фазовая кривая отклоняется от локально-нормальной кривой в пределах первых градусов, то есть с точностью получения практических кривых. Амплитудная поперечная кривая отклоняется от локально-нормальной кривой на 10–15%. При этом отклонение фазовой кривой также не превышает 5° . Анализ показывает, что увеличение электропроводности литосферы приводит к заметному затуханию берегового эффекта. Следовательно, экспериментальные продольные и поперечные кривые до периода 1000 с практически свободны от берегового эффекта и могут быть использованы для изучения глубинной электропроводности.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МТЗ

Выполненный анализ показал, что продольные кривые МТЗ практически не искажены эффектом S и береговым эффектом. Они по формальным признакам более информативны

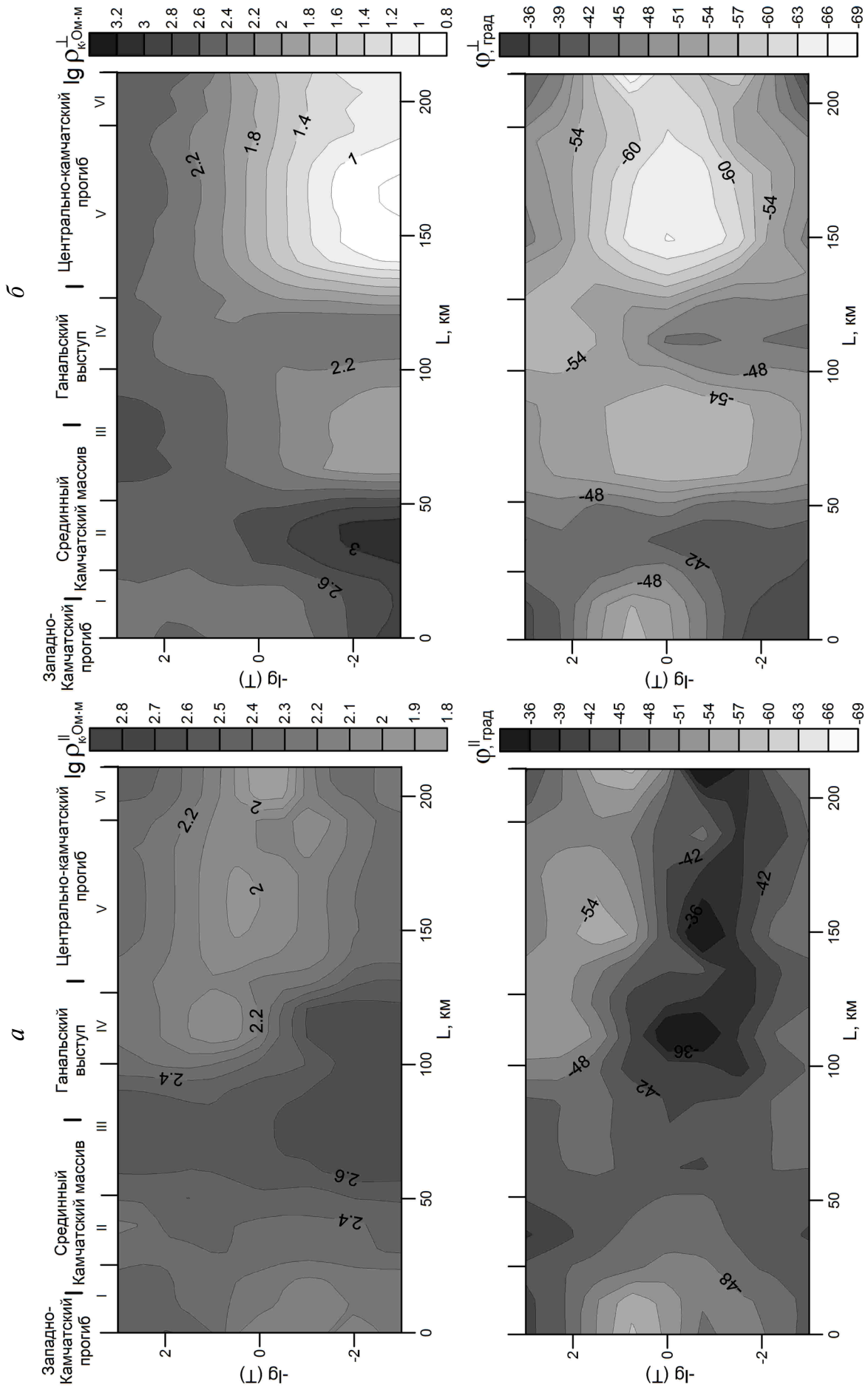


Рис. 6. Псевдорезы средних продольных (а) и поперечных (б) кажущихся электрических сопротивлений и фаз импеданса.

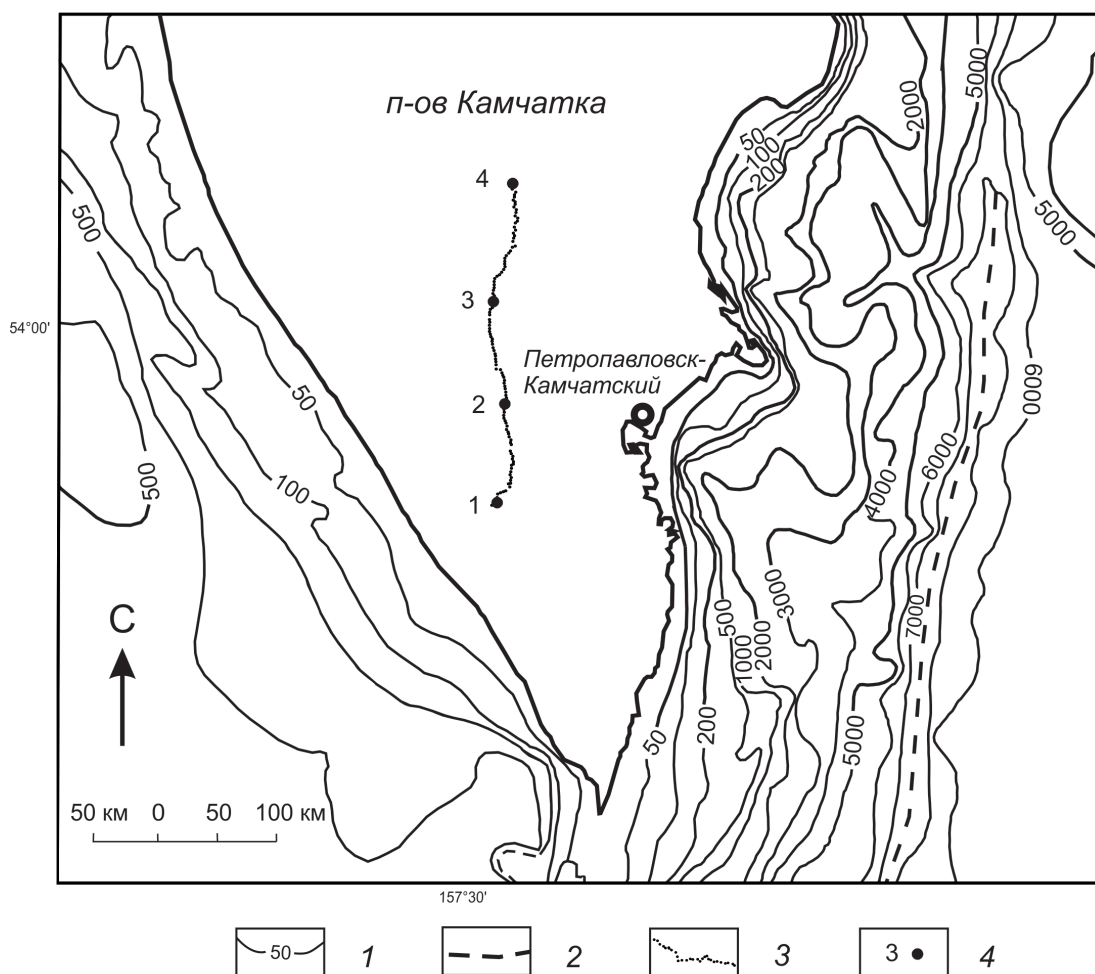


Рис. 7. Батиметрическая карта западного и восточного побережья Южной Камчатки: 1 — изобаты (в метрах); 2 — ось глубоководного желоба; 3 — профиль МТЗ; 4 — пункты, в которых получены модельные кривые МТЗ (см. рис. 8).

чем поперечные кривые. На большинстве кривых проявился минимум, связанный с осадочно-вулканогенным чехлом, выражены максимумы, отражающие высокоомный слой в литосфере, и минимумы в низкочастотной области, обусловленные глубинными проводящими слоями. Поперечные кривые подвержены влиянию эффекта S и в меньшей мере пригодны для изучения глубинной электропроводности.

Поэтому для изучения глубинного геоэлектрического разреза в качестве основных приняты продольные кривые. Поперечные кривые использованы в качестве дополнительных для выделения совместно с продольными кривыми геоэлектрических неоднородностей. Следует отметить, что продольные кривые ориентированы вдоль Центрально-Камчатского прогиба, то есть почти по направлению профиля МТЗ. По данным предшествующих работ этот прогиб осложнен рядом поперечных структур (Мороз, Шиленко, 1982). Поэтому инверсия продольных кривых выполнена с использованием ТМ-моды (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Расчеты выполнены с помощью программы двумерного чис-

ленного моделирования (Siripunvaraporn, Egbert, 2000). Стартовая модель создана по данным интерпретации индивидуальных кривых МТЗ в рамках одномерной модели с учетом априорной геолого-геофизической информации. При моделировании предусматривалось погашение р-эффекта. В результате расчетов на большинстве пунктов достигнута сходимость модельных и практических амплитудных и фазовых кривых МТЗ (рис. 9). По данным инверсии кривых МТЗ построен геоэлектрический разрез (рис. 10).

В районе Срединного Камчатского массива в земной коре и верхней мантии выделяется суб-вертикальная аномалия повышенного удельного электрического сопротивления со значениями тысячи — первые десятки тысяч Ом·м. Аномалия, скорее всего, отражает насыщенность разреза кислыми магматическими породами, на что указывает отрицательная аномалия магнитного поля (рис. 10). Высокоомная аномалия электрического сопротивления характеризуется повышенной интенсивностью поля силы тяжести, что связано с наличием литосферного блока с высокой плотностью слагающих его пород. Аномалии

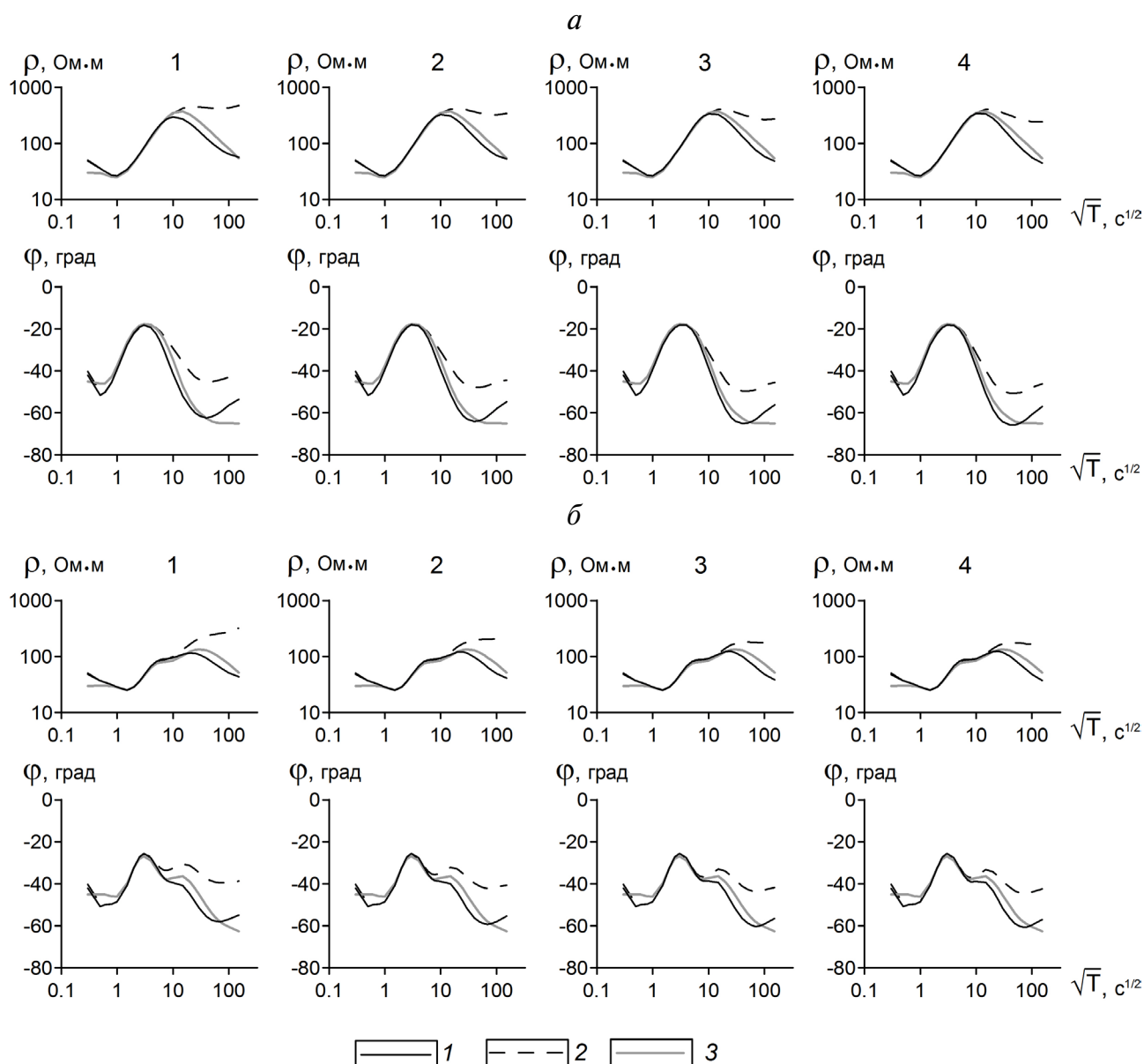


Рис. 8. Кривые МТЗ по данным 3D численного моделирования магнитотеллурического поля: 1–3 — продольные (1), поперечные (2) и локально-нормальные (3) кривые МТЗ. а — стандартная модель; б — модель с глубинным проводником.

пониженного электрического сопротивления, ограничивающие высокоомную аномалию, могут быть связаны с глубинными разломами, содержащими минерализованные растворы. По направлению к Ганальскому выступу в земной коре на глубинах от 5 до 25 км выражена локальная, почти изометричная, аномалия удельного электрического сопротивления в первые тысячи Ом·м (рис. 10).

В районе границы Срединного Камчатского массива и Ганальского выступа (рис. 1) в земной коре на глубинах 15–30 км выделяется изометричная аномалия повышенного удельного электрического сопротивления до 1000 Ом·м. Аномалия имеет продолжение в более глубокие части земной коры и в верхнюю мантию, где сопротивление уменьшается до 100 Ом·м. В этом районе магнит-

ное и гравитационное поле имеет возмущенный вид, что может быть связано с наличием магматических пород в зоне поперечного разлома на границе Ганальского выступа (рис. 10).

В районе границы Ганальского выступа и южной части Центрально-Камчатского прогиба в земной коре на глубинах от 1–2 км до 20 км выделяются субвертикальные аномалии с удельным электрическим сопротивлением до 10000 Ом·м. Аномалии, по-видимому, связаны с глубинным разломом, по которому магматические породы основного и ультраосновного состава проникали в земную кору. Это подтверждается аномалией положительного магнитного поля интенсивностью до 300 нТл.

В районе Ганальского выступа в литосфере на глубине 20–40 км выделена аномалия повышенной

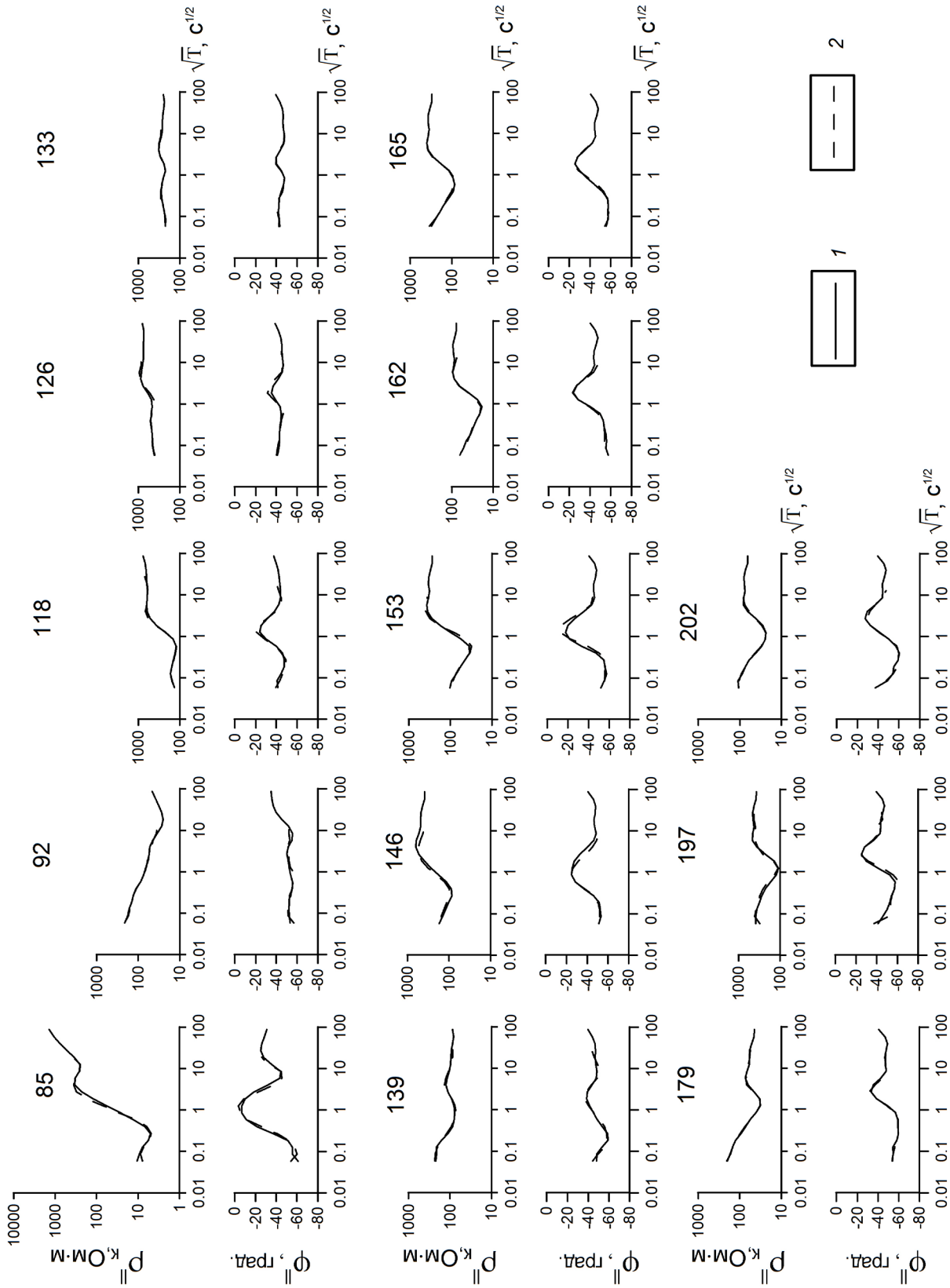


Рис. 9. Сопоставление отдельных модельных и экспериментальных кривых МТЗ в различных частях профиля (над графиками указан номер пункта, смотрите рис. 2): 1 — экспериментальные кривые; 2 — модельные кривые.

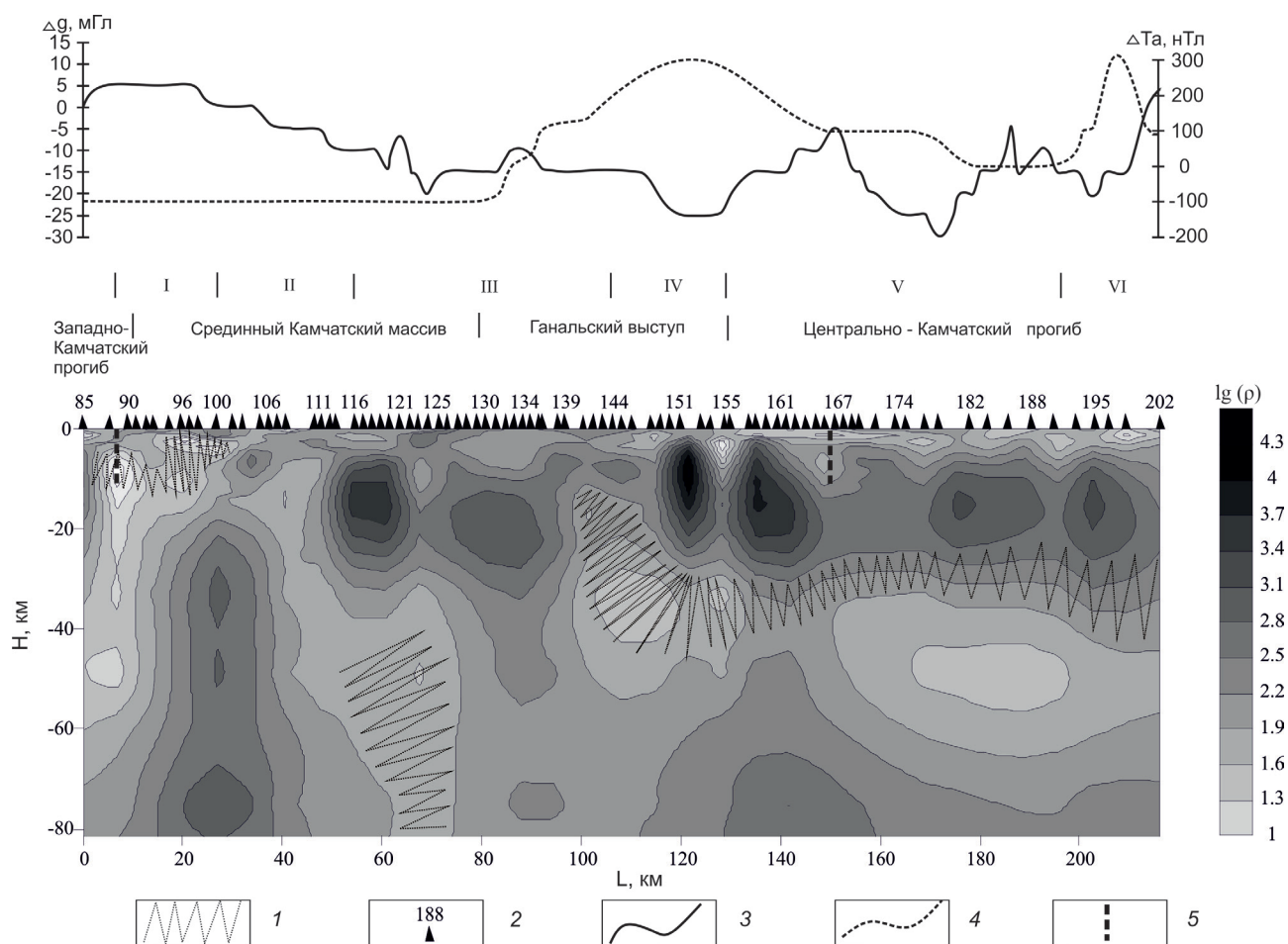


Рис. 10. Геоэлектрический разрез по профилю, пересекающему область сочленения Камчатского Срединного массива, Ганальского выступа и Центрально-Камчатского прогиба: 1 — аномалии пониженной скорости продольных волн по данным сейсмотомографии (Гонтовая и др., 2010); 2 — пункт МТЗ и его номер; 3 — график поля силы тяжести в редукции Буге; 4 — график магнитного поля ΔT_a ; 5 — глубинные разломы (Карта ..., 1999).

электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. Аномалия может быть связана с наличием высокоминерализованных растворов. Она выражена отрицательной аномалией поля силы тяжести в редукции Буге, которая характеризует разуплотнение пород. Не исключено, что эта аномалия связана с глубинным разломом, выделенным по геолого-геофизическим данным (Карта ..., 1999).

В районе Центрально-Камчатского прогиба в верхней части разреза выделяется проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м, мощностью в первые километры. Он связывается с осадочно-вулканогенным чехлом. Под ним на глубинах 5–25 км находится высокоомная зона с удельным электрическим сопротивлением в сотни — первые тысячи Ом·м. Эта зона приурочена к метаморфизованным породам земной коры, которые являются фундаментом для вышележащей толщи пород. Под ней проявляется проводящая зона в литосфере на глубинах 30–50 км, природу которой можно связать с наличием жидких

флюидов. Данная зона сочленяется с проводящей аномалией в районе Ганальского выступа. Не исключено, что они представляют единый проводящий слой в литосфере. Этот район в гравитационном поле выражен в виде отрицательных интенсивных аномалий, которые свидетельствуют о возможном разуплотнении пород литосферы. Магнитное поле на этом участке профиля в основном слабоинтенсивное, только по направлению к северу проявляется аномалия интенсивностью до 300 нТл, которая может быть связана с наличием в разрезе магматических пород основного состава (Ривош, 1963). Следует отметить, что на границе Ганальского выступа и Центрально-Камчатского прогиба в верхней мантии выделяется аномалия повышенного электрического сопротивления, характеризующая, по-видимому, другой вещественный состав.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Профиль МТЗ (рис. 2) расположен на площади, где получены сведения о скоростях про-

дольных и поперечных сейсмических волн по данным сейсмической томографии (Гонтовая и др., 2010). Мы имеем возможность сопоставить геоэлектрический разрез со скоростным разрезом по ближайшему профилю, расположенному на расстоянии примерно 15–20 км. В южной части профиля (рис. 10) аномалии пониженной скорости (2–5%) в общих чертах совпадают с аномалиями пониженного удельного электрического сопротивления (20–100 Ом·м). В северной части профиля, в районе Центрально-Камчатского прогиба, аномалия повышенной электропроводности располагается ниже коровой аномалии пониженной скорости. Это расхождение может быть связано с тем, что продольные кривые МТЗ в прогибе дают завышенные глубины до литосферного проводника. При инверсии кривых в рамках ТМ-моды данный эффект, по-видимому, не удалось устранить. Не исключено, что мощный низкоскоростной осадочный чехол прогиба привел к завышению по глубине скоростной аномалии в земной коре.

Рассмотрим возможную природу коровых аномалий электропроводности и пониженной сейсмической скорости в районе пунктов МТЗ № 134–151 (рис. 2). Понижение скорости здесь составляет 4–7%, удельное электрическое сопротивление — 30 Ом·м. Такое сопротивление в средней и нижней частях земной коры можно связать, скорее всего, с наличием жидких флюидов (гидротермальных растворов и магматических расплавов). Аномалия не может быть обусловлена электронно-проводящими породами, так как она бы не проявилась в понижении скорости сейсмических волн. По существующим представлениям породы средней и нижней коры представляют среду, пронизанную сетью мелких трещин. Они создают в коре необходимое поровое пространство для хорошо проводящего флюида. В результате электропроводность горных пород возрастает на несколько порядков (Ваньян, Хайдман, 1996).

Оценим возможную пористость пород в районе проводящей коровой аномалии. Для этого воспользуемся формулой Арчи (Archie, 1942) для двухфазовой системы:

$$\rho = 3 \rho_{\phi} / 2k, \quad (1)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проводящей зоны; ρ_{ϕ} — удельное сопротивление порового флюида; k — пористость. В этой формуле предусмотрена связанность каналов. Согласно работе (Ваньян, Хайдман, 1996), примем удельное электрическое сопротивление флюида в земной коре равным 0.05 Ом·м. Из формулы следует, что при удельном электрическом сопротивлении пород в районе аномалии 50 Ом·м пористость будет достигать 0.15% при полной связанности пор. Очевидно, пористость

будет больше, если учесть изолированные и тупиковые каналы.

Рассмотрим данные сейсмотомографии. Как мы уже отмечали, понижение скорости продольных сейсмических волн в районе аномалии составляет 4–7%. Для грубой оценки влияния воды на скорость сейсмических волн в мало-пористых породах воспользуемся следующим выражением (Ляховицкий и др., 1984):

$$1/V = 1/V_B + (1 - \rho) / V; \\ \Delta V / V = \rho (V_0 / V_B - 1), \quad (2)$$

где V_0 — скорость продольных волн в скелете; V_B — скорость в воде. Отношение V_0/V_B — примерно от 4 до 5. Примем изменение скорости в пределах аномалии в среднем равным 5.5%. Из формул видно, что при таком изменении скорости пористость пород должна быть около 1.4%. Такое различие пористости рассчитанное по данным электропроводности и сейсмотомографии позволяет допустить, что в пределах коровой аномалии в породах преобладают тупиковые и изолированные каналы.

Не исключено, что аномалии электропроводности и скорости сейсмических волн могут быть связаны с магматическими расплавами в земной коре, что вполне вероятно, так как региональный тепловой поток здесь является высоким. Температуры на поверхности Мохоровичича оцениваются до 800°C (Смирнов, 1980). При наличии гидротермальных растворов при температурах 400–700°C возможно частичное плавление пород.

Оценим пористость пород в случае магматических расплавов. Для этого также воспользуемся формулой Арчи (1). Важно определиться с электропроводностью магматического расплава. Главную роль в величине электропроводности расплава играет содержание воды. Электропроводность «сухого» и насыщенного водой силикатного расплава меняется на несколько порядков (Лебедев, 1975). По измерениям лавовых потоков, в значительной мере обезвоженных на земной поверхности, удельное электрическое сопротивление в большинстве случаев оценивается в единицы — первые десятки Ом·м (Адамчук, Трубников, 1977; Frischknecht, 1967; Keller, Rapolla, 1974; Murase, McBirney, 1973). Данный параметр для базальтовой выплавки в присутствии воды снижается до 0.1 Ом·м (Rai, Manghanani, 1978; Shankland, Waff, 1974). Поэтому для дальнейших оценок целесообразно принять удельное сопротивление магматического расплава, содержащего воду, приблизительно в 0.1 Ом·м. При данной величине пористость при полной связанности пор в коровой проводящей зоне получается не более чем 0.7%. Эта величина ближе к пористости рассчитанной по данным сейсмической томографии. Однако при такой пористости изменение скорости сейсмических

волн получается около 2%. Можно полагать, что полная пористость существенно больше и за счет тупиковых и изолированных каналов будет близка к величине, определенной по сейсмическим данным.

Таким образом, мы приходим к выводу, что аномалии электропроводности и скорости сейсмических волн связаны с гидротермальными растворами и магматическими расплавами. Гидротермы обладают высокой проникающей способностью. Они поступают в вышележащие толщи и заполняют трещинные и поровые коллекторы в верхних частях земной коры. Гидротермы содержат большое количество рудных компонентов, которые при осаждении в верхних частях земной коры образуют рудопроявления, которые в большой мере проявились в районе тектонических границ (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом МТЗ изучен глубинный геоэлектрический разрез по профилю, ориентированному вдоль Южной Камчатки в области сочленения Срединного Камчатского массива, Ганальского выступа и южной части Центрально-Камчатского прогиба. Анализ магнитотеллурических параметров свидетельствует, что геоэлектрическая модель в низкочастотном диапазоне может быть рассмотрена как двумерно-неоднородная. Кривые МТЗ по направлению вдоль Камчатки приняты продольными, а вкрест — поперечными. Продольные и поперечные кривые подвержены влиянию ρ -эффекта. Поэтому на этапе качественного анализа выполнено конформное осреднение кривых и выделено 6 зон с различным глубинным строением. Большинство выделенных зон разделено глубинными разломами, выделенными по геолого-геофизическим данным.

Анализ средних кривых зон показывает, что поперечные кривые в сильной мере подвержены влиянию S-эффекта. С помощью пробных моделей изучен береговой эффект, который заметно затронул поперечные кривые. При наличии корового проводящего слоя эффект проявляется существенно слабее. В качестве основных, для количественной интерпретации, приняты индивидуальные продольные кривые МТЗ. Поперечные кривые использованы для уточнения геоэлектрического разреза. Инверсия кривых МТЗ осуществлена с помощью программы двумерного численного моделирования МТ-поля. Следует отметить, что продольные кривые получены по направлению вдоль профиля, которым пересечены существующие поперечные тектонические элементы: Ганальский выступ, структуры в районах Срединного Камчатского массива и южной

части Центрально-Камчатского прогиба, а также разломы. Поэтому инверсия продольных кривых осуществлена в рамках ТМ-моды. В результате инверсии продольных амплитудных и фазовых кривых МТЗ получен геоэлектрический разрез литосферы до глубины 60–80 км. Поведение изолиний удельного электрического сопротивления имеет сложный вид. Наряду с субвертикальными и изометричными аномалиями повышенного и пониженного электрического сопротивления выделяются субгоризонтальные аномальные зоны.

Геоэлектрический разрез сопоставлен с данными гравиметрии, магнитометрии и сейсмической томографии (рис. 10). В районе Срединного Камчатского массива в литосфере на глубинах от 20 до 80 км выделяется аномальная субвертикальная зона повышенного электрического сопротивления в сотни — первые тысячи Ом·м. Она находит отражение в поле силы тяжести. Зона ограничена аномалиями повышенной электропроводности, которые соответствуют аномалиям понижения скорости продольных волн до 2–4%.

В районе Ганальского выступа в земной коре выделена зона повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. В Центрально-Камчатском прогибе в верхней части земной коры до глубин 4–5 км выражен слой повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением 10–50 Ом·м, связываемый с осадочно-вулканогенным чехлом. Ниже располагается слой пониженной электропроводности в сотни — первые тысячи Ом·м, характеризующий кристаллические и метаморфизованные породы земной коры. В литосфере на глубинах 35–50 км выражена зона повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. Аномалии повышенной электропроводности в юго-западной части профиля соответствуют в общих чертах понижению скорости сейсмических волн на 4–6% по данным сейсмотомографии. Исключением является литосферная проводящая зона под Центрально-Камчатским прогибом. Здесь аномалия пониженной скорости сейсмических волн располагается выше проводящей зоны. Не исключено, что по данным МТЗ глубина проводящего слоя может быть завышена, что характерно для продольных кривых в прогибах. По данным комплексного анализа данных МТЗ и сейсмотомографии, природа аномалий повышенной электропроводности и пониженной скорости сейсмических волн связана с гидротермальными растворами и магматическими расплавами. Жидкие флюиды проникают по тектоническим нарушениям в верхние части

земной коры, где формируются месторождения цветных и благородных металлов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-00059 и ДВО РАН № 15-1-2-008.

Список литературы

- Адамчук Ю.В., Трубников Б.А.* Электропроводность текущей лавы южного Ново-Толбачинского прорыва // Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова: ИАЭ-2841. М.: ОНТИ ИАЭ, 1977. 8 с.
- Белявский В.В., Алексанова Е.Д.* Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка // Физика Земли. 2014. № 1. С. 11–32.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 677 с.
- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д.* О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11.
- Геология СССР // Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1964. 733 с.
- Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки // Отв. ред. Попов А.А., Гнибиденко Г.С. М.: Наука, 1978. 130 с.
- Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В.* Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29.
- Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб 1 : 500000 / Под ред. Литвинова А.Ф., Патоки М.Г., Марковского Б.А. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. Л. XIII.
- Лебедев Е.Б.* Влияние воды на физические свойства магматических расплавов // Физико-химические проблемы гидротермальных магматических процессов. М.: Наука, 1975. С. 48–54.
- Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Яценко З.Г.* Инженерная геофизика. М.: Недра, 1984. 252 с.
- Мороз Ю.Ф.* Строение осадочно-вулканогенного чехла Южной Камчатки по геофизическим данным // Советская геология. 1985. № 10. С. 19–25.
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И., Зубин М.И.* Глубинное строение Камчатки по геофизическим данным // Физика Земли. 1996. № 12. С. 92–99.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–73.
- Мороз Ю.Ф., Шиленко Р.И.* Структура осадочно-вулканогенного чехла Центрально-Камчатского прогиба по геофизическим данным // Советская геология. 1982. № 8. С. 105–108.
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Ривовш Л.А.* О тектонике Камчатского полуострова и дна прилегающих к нему морских районов по геофизическим данным // Геология и геофизика. 1963. № 6. С. 30–48.
- Смирнов Я.Б.* Тепловое поле территории СССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1980. 150 с.
- Archie G.E.* The Electric Resistivity as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Petroleum Transactions of AIME. 1942. V. 146. P. 54–62.
- Bahr K.* Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // Journal of Geophysics. 1988. V. 62. P. 119–127.
- Frischknecht F.C.* Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth, and application to ground and airborne electromagnetic surveys // Quarterly Colorado School of Mines. 1967. V. 62. № 1. 326 p.
- Keller G.V., Rapolla A.* Electrical prospecting methods in volcanic and geothermal environments // Physical Volcanology / Edited by L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla. Elsevier, Amsterdam, 1974. P. 133–166.
- Mackie R.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example // Radio Science. 1994. V. 29. № 4. P. 923–935.
- Murase T., McBirney A.R.* Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures // Bulletin of the Geological Society of America. 1973. V. 84. № 11. P. 3563–3593.
- Rai C.S., Manghanani M.H.* Electrical conductivity of ultramafic rock to 1820 Kelvin // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1978. V. 17. P. 6–13.
- Shankland T.I., Waff H.S.* Conductivity in fluid-bearing rocks. // JGR. 1974. V. 79. № 32. P. 5409–5417.
- Siripunvaraporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data // Geophysics. 2000. V. 65. № 3. P. 791–803.
- Swift C.M.* A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, MIT. Cambridge, 1967. 248 p.

МОРОЗ и др.

**DEEP GEOELECTRIC CROSS-SECTION OF SREDINNIY MASSIF,
GANALSKIY HORST-ANTICLINORIUM
AND TSENTRALNO-KAMCHATSKIY DEFLECTION JOINT AREA**

U.F. Moroz^{1,2}, V.A. Loginov^{1,3}, I.S. Ulybyshev^{1,3}

*¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: morozyf@kscnet.ru*

²Geological Institute SB RAS, 670047, Ulan-Ude

³Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky

This paper presents methods and results of magnetotelluric sounding (MTS) performed along the profile located in the area of the most complicated tectonic junction in South Kamchatka. According to the results from the magnetotelluric (MT) parameter analysis, geoelectric environment is close to 2D-heterogeneous. Analysis of possible MTS-curves distorting effects has been carried out using trial models investigated through the numerical modeling of magnetotelluric field. Lengthwise magnetotelluric sounding curves, transverse for the Ganalskiy ledge and structures complicating Sredinniy ledge and Tsentralno-Kamchatskiy deflection, have been chosen as primary for quantitative interpretation. Geoelectric cross-section resulting from the inversion within the TM-mode using numerical modeling has been compared with gravimetric, magnetometric and seismotomographic data. Subvertical, isometric, and subhorizontal anomalies of high and low conductivity have been distinguished in the geoelectric cross-section of crust and upper mantle. Estimation of rock porosity in the area of Ganalskiy ledge crust anomaly has been carried out using conductivity and seismic velocity data. Crust anomaly origin is related to the hydrothermal solutions and magmatic melts.

Keywords: conductivity, magnetotelluric sounding, coastal effect, porosity, Kamchatka.