

УДК 550.837

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЮЖНОЙ КАМЧАТКИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

© 2013 г. Ю. Ф. Мороз, О. М. Самойлова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пуйна, 9, e-mail: morozyf@kscnet.ru

Поступила в редакцию 19.04.2012 г.

Рассмотрены методика интерпретации и результаты магнитотеллурических зондирований в комплексе с данными других геолого-геофизических исследований. Методика интерпретации определена на основе изучения возможных искажений кривых МТЗ с помощью численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля. Для изучения глубинной электропроводности приняты продольные кривые МТЗ до периода 400 с, которые практически не затронуты влиянием индукционного эффекта за счет морских электрических токов. Поперечные кривые использованы для уточнения геоэлектрической модели. В результате инверсии средних продольных кривых МТЗ получен геоэлектрический разрез литосферы до глубины 60 км. Выявлены аномалии повышенной электропроводности в литосфере, которые находят отражение в поле силы тяжести и в скорости сейсмических волн. По данным МТЗ и сейсмической томографии определена возможная природа аномалии повышенной электропроводности и выполнена оценка пористости пород и содержания магматических расплавов.

DOI: 10.7868/S0203030613020065

ВВЕДЕНИЕ

Вулканическая зона Южной Камчатки характеризуется современным вулканизмом и высокой гидротермальной активностью. Изучение глубинного строения зоны представляет повышенный интерес. Мы располагаем данными аэромагнитной и гравиметрической съемок. В соседних районах проведены магнитотеллурические исследования, дающие обобщенное представление о распределении глубинной электропроводности Южной Камчатки [Мороз и др., 1990; Мороз, 1991; Мороз и др., 2008]. В рассматриваемом районе выполнены детальные исследования методом МТЗ и другими электромагнитными методами в окрестности вулкана Горелый [Мороз, Скрипников, 1995] и на Мутновском месторождении парогидротерм [Мороз, Скрипников, 1985; Нурмухамедов и др., 2010], которые характеризуют электропроводность верхних частей земной коры. Глубинное строение северной части вулканической зоны изучено методом сейсмической томографии [Гонтовая и др., 2010].

В последние годы в районе вулканической зоны выполнены магнитотеллурические зондирования (МТЗ) по профилю протяженностью около 150 км. Северо-восточная часть профиля расположена напротив Авачинской бухты, юго-восточный конец профиля выходит на побережье Тихого океана (рис. 1). В районе профиля находятся вулканы Горелый, Мутновский, Асача, Ходутка.

Полученные данные дают возможность получить новую информацию о распределении электропроводности литосферы в слабоизученном районе юго-восточного побережья Камчатки. Методике интерпретации и анализу результатов данных МТЗ посвящена настоящая статья.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

В геологическом строении региона принимают участие докайнозойские, палеогеновые, неогеновые и четвертичные отложения. Здесь выделяются две крупные структуры: Южно-Камчатский антиклинорий и Начикинский складчато-блоковая зона (см. рис. 1) [Геология ..., 1964; Апрельков, 1971]. Характерно, что Южно-Камчатский антиклинорий имеет северо-восточное простирание, а Начикинская складчато-блоковая зона – северо-западное, т.е. является поперечной структурой по отношению и простиранию основных структурных зон Камчатки. Начикинская складчато-блоковая зона входит в состав Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций [Геология ..., 1964]. О северо-западной ориентировке зон свидетельствуют карты магнитного и гравитационного полей [Ривош, 1963; Декин, Зубин, 1976]. На них хорошо выражены зоны градиентов, вытянутых в северо-западном направлении. Указанная зона характеризуется повышенной напряженностью

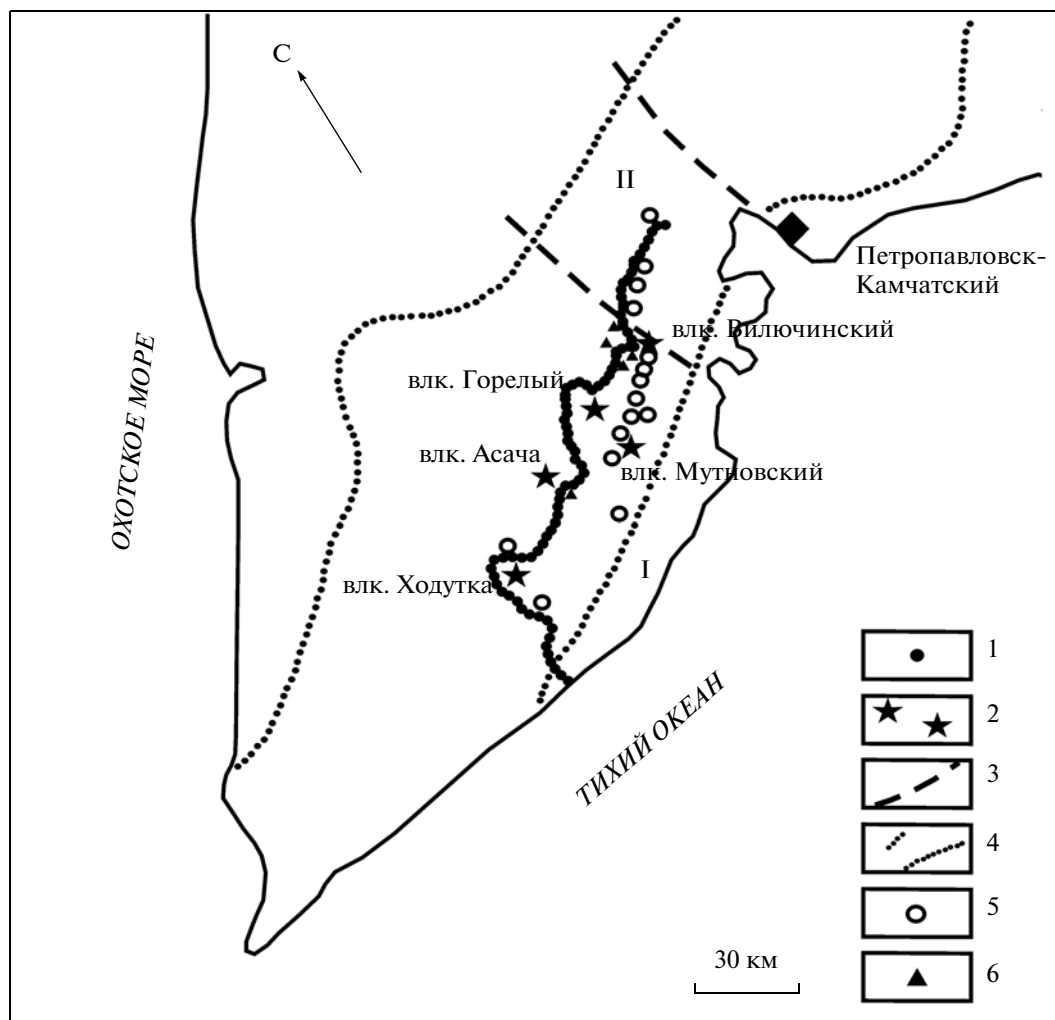


Рис. 1. Схема расположения профиля МТЗ.

1 – пункты МТЗ; 2 – вулканы; 3 – граница поперечной структуры [Апрелков, 1971; Геология ..., 1964]; 4 – границы вулканического пояса [Геология ..., 1964]; 5 – гидротермальные источники [Карта ..., 1999]; 6 – рудопроявления [Карта ..., 1999]; I – Южно-Камчатский антиклинорий, II – Начикинская складчато-блоковая зона.

магнитного и гравитационного полей, отражающей наличие в разрезе более плотных и намагниченных пород. Это связано с тем, что здесь приближены к дневной поверхности и выходят на поверхность более древние метаморфизованные породы, представляющие собой, по-видимому, домеловой фундамент. В пределах зоны выделяется ряд неотектонических структур, имеющих северо-восточное простирание. Начикинская складчатая зона на юге сопряжена по глубинному разлому с Южно-Камчатским антиклинорием. Он орографически совпадает с Южно-Быстринским хребтом. Геологическое строение антиклинория отличается значительной сложностью, что связано с большим числом крупных разломов, опрокидыванием местами слоев на восток и северо-восток, наличием надвигов, пестрым составом разновозрастных, преимущественно, неогеновых

эффузивных и интрузивных пород. По Г.М. Власову осевая часть антиклинория совпадает с береговой границей Тихого океана, а его юго-восточное крыло погружено под воду. Наряду с рассматриваемыми крупными структурами района здесь выделяется наложенный вулканический пояс с современными действующими вулканами. В районе профиля отмечаются гидротермальные источники и рудопроявления [Карта ..., 1999].

Гравитационное поле дает представление о распределении плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии [Декин, Зубин, 1976]. Положительные аномалии поля силы тяжести обусловлены магматическими интрузивными и эффузивными образованиями. Отрицательные аномалии поля силы тяжести, по-видимому, отражают наличие в земной коре пород с пониженной плотностью. На побережье Тихого

океана происходит возрастание интенсивности поля силы тяжести, которое может быть связано с увеличением плотности и сокращения мощности земной коры.

Данные аэромагнитной съемки [Ривош, 1963] свидетельствуют о ярко выраженном полосовом характере магнитного поля, соответствующему зональному распределению главных тектонических и орографических элементов. Вулканический район (вулканы Горелый, Асача, Ходутка, Мутновский) характеризуется положительными аномалиями магнитного поля. Эти аномалии отражают наличие в разрезе вулканогенных магматических образований верхнемелового, палеоген-нижнемиоценового, позднемиоцен-плиоценового и четвертичного возраста. Значительные по протяженности линейные аномальные зоны предполагают существование глубинных разломов. Западная часть Южно-Камчатского антиклинория характеризуется отрицательным магнитным полем. В сторону Тихого океана происходит возрастание напряженности магнитного поля, что связано с приближением к дневной поверхности намагниченных пород.

По данным сейсмической томографии [Гонтова и др., 2010] установлено, что земная кора содержит аномалии, в пределах которых отмечается понижение сейсмической скорости на 4–6%. В верхней мантии выявлен астеносферный слой на глубине 70–80 км. Он согласуется с астеносферным слоем повышенной электропроводности [Мороз, 1991].

По данным региональных исследований МТЗ, с привлечением информации по другим геофизическим методам, получено представление об интегральной проводимости осадочно-вулканогенного чехла Южной Камчатки [Мороз, 1991]. В районе Южно-Камчатского антиклинория и Начикинской складчато-блоковой зоны интегральная проводимость осадочно-вулканогенного чехла не превышает 100 См (рис. 2). В океане за счет высокой проводимости морской воды она возрастает до десятков тысяч См. За счет изменения проводимости верхнего слоя на суше и в океане на несколько порядков возникает сильный береговой эффект, который будет изучен ниже.

О геоэлектрическом разрезе исследуемого региона можно судить только по обобщенным данным для Южной Камчатки [Мороз, 1985; Мороз и др., 2001]. В верхней части разреза залегают четвертичные вулканогенные и осадочные образования с удельным электрическим сопротивлением сотни-первые тысячи Ом · м и более, мощностью первые сотни метров. Ниже залегает кайнозойская толща со средним продольным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом · м, мощностью от 0 до 4 км. Она подстилается комплексом верхнемеловых оса-

дочно-вулканогенных образований со средним продольным электрическим сопротивлением от десятков до первых сотен Ом · м. Консолидированный фундамент имеет удельное электрическое сопротивление в первые тысячи Ом · м. Вулканические постройки характеризуются удельным электрическим сопротивлением от первых сотен до первых тысяч и более Ом · м. Глубинная часть разреза содержит коровый и астеносферный проводящие слои [Мороз, 1991; Мороз и др., 2008].

МЕТОДИКА РАБОТ

Наблюдения магнитотеллурического поля выполнены с помощью аппаратуры канадской фирмы “Phoenix Geophysics Ltd”. При полевых измерениях использованы станции MTU-5A и MTU-2E. Для регистрации электрического поля использована пятиэлектродная крестообразная измерительная установка, заземленная с неполяризуемыми электродами. Электрические линии имеют длину 80 м. Они ориентировались по азимутам 30° (Ey) и 120° (Ex). Горизонтальные магнитные датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землей. Измерения МТ-поля осуществлялись несколькими станциями MTU, разнесенными друг от друга на определенное расстояние. При наличии промышленных помех для повышения качества измерений МТ-поля применялась методика синхронных измерений с использованием удаленной базовой станции. На участках профиля с низким уровнем промышленных помех в качестве базовой использовалась одна из точек профиля. Обработка первичных МТ-данных выполнена предприятием ООО “Северо-Запад” с помощью специальных программ. Важное внимание уделялось редакции результатов по устранению влияния “отскоков” значений магнитотеллурических параметров, связанных с промышленными, ветровыми помехами и влиянием гроз. В результате обработки получены тензоры импеданса в диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 с и более. Точность определения модулей магнитотеллурических параметров составляет первые проценты, фаз импеданса – первые градусы.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В основе магнитотеллурических зондирований лежит связь между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности [Бердичевский, Жданов, 1981]:

$$E_{\text{гор}} = [Z]H_{\text{гор}}, \text{ где } [Z] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}.$$

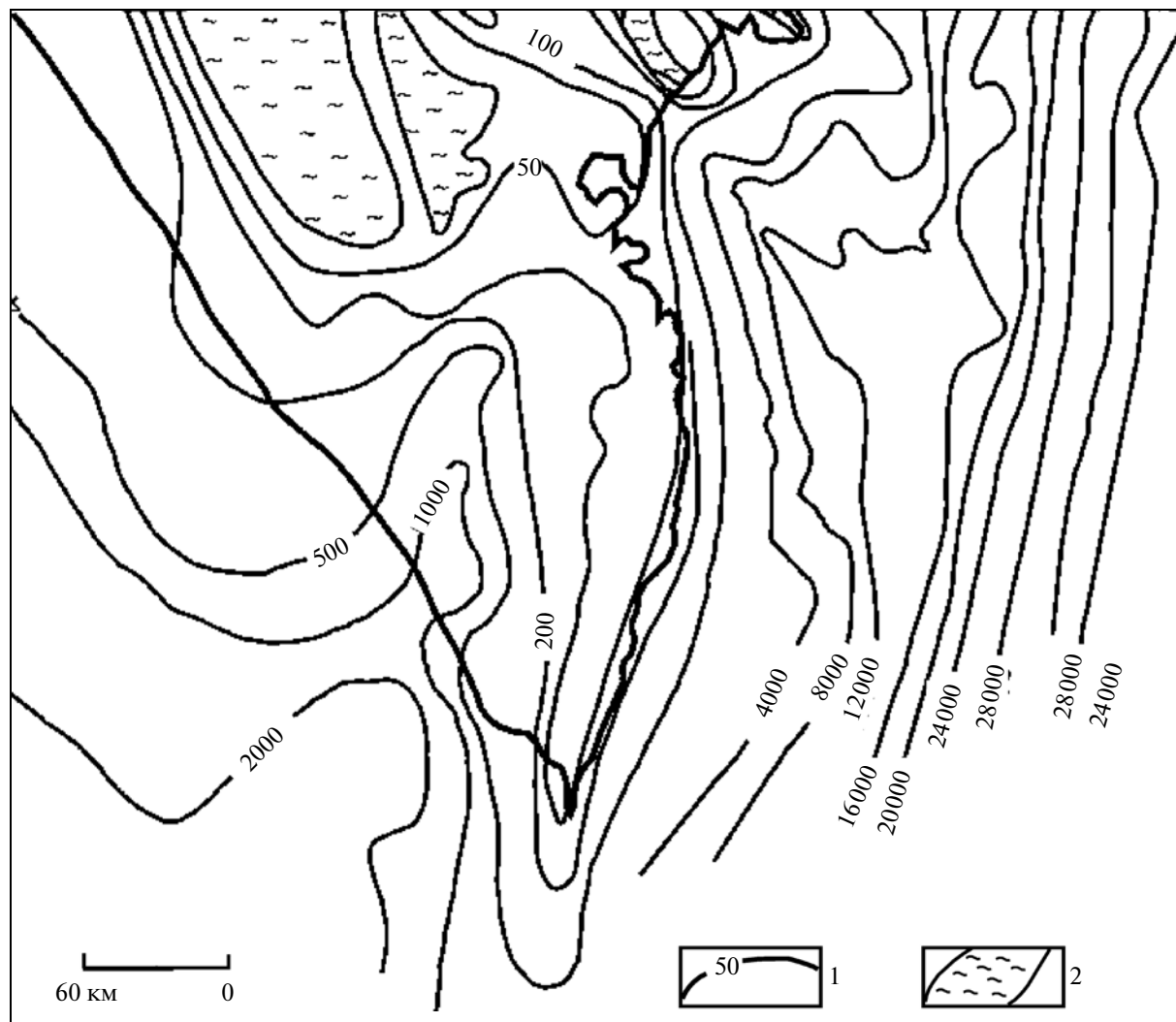


Рис. 2. Схема суммарной продольной проводимости осадочно-вулканогенного чехла и близлежащих акваторий, включая водную оболочку.

1 – изолинии интегральной проводимости, в См; 2 – выходы пород докайнозойского основания.

Или в развернутом виде:

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y,$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y,$$

где $[Z]$ – тензор импеданса: $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ – комплексные компоненты тензора импеданса, зависящие от частоты, распределения удельных электрических сопротивлений в Земле и ориентации координатных осей.

Тензор импеданса дает возможность оценить степень геоэлектрической неоднородности среды. Оценка неоднородности среды выполнена с помощью параметра неоднородности (амплитудного) – параметра Бара [Barh, 1988]. Анализ показал, что параметр N имеет значения первые десятые доли на периодах до 1 с. С увеличением периода вариаций параметр N возрастает до 0.5 и

более. Это связано с влиянием крупных геоэлектрических структур Камчатки. Параметр асимметрии Свифта [Swift, 1967] свидетельствует о том, что на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с вытянутостью структур и полуострова Камчатка в северо-восточном направлении. В основу интерпретации положены кривые, полученные в направлениях, ориентированных по простиранию и вкрест простирания Камчатки. В дальнейшем эти кривые будем называть продольными и поперечными. Форма кривой МТЗ отвечает определенному типу геоэлектрического разреза. Поэтому продольные и поперечные кривые МТЗ организованы в семейства, близкие по своей форме. Таких семейств выделено 15. Анализ показывает, что амплитудные кривые сильно расходятся по

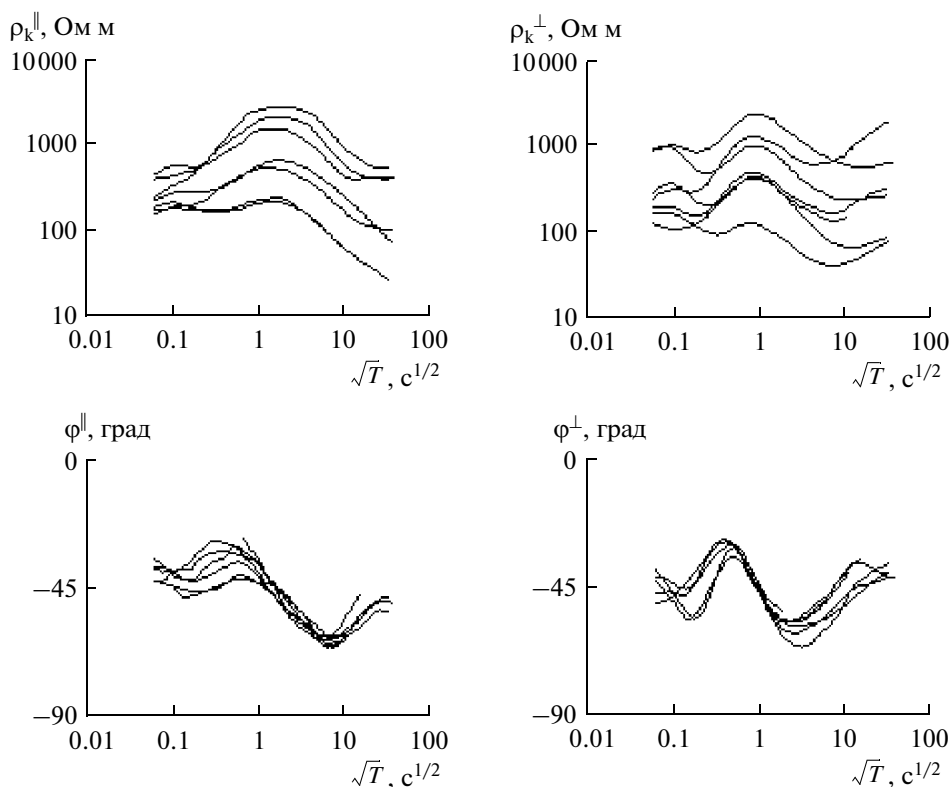


Рис. 3. Семейства продольных и поперечных кривых МТЗ в районе XIV.

уровню сопротивлений. В то же время фазовые кривые расходятся между собой незначительно. На рис. 3 в качестве примера приведены продольные и поперечные кривые для района XIV. Продольные и поперечные кривые расходятся по уровню сопротивления почти на порядок, а расхождение фазовых кривых не превышает 10° . Это свидетельствует о влиянии эффекта ρ (статистический сдвиг амплитудных кривых). Эффект связан с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей. Осреднение кривых в каждом семействе дает возможность ослабить влияние эффекта ρ . Полученные средние продольные и поперечные кривые МТЗ приведены на рис. 4. Районы, для которых рассчитаны средние кривые МТЗ, показаны на рис. 5.

Анализ показывает, что продольные и поперечные кривые МТЗ различаются по своей форме, которая определяется геологическим строением, влиянием берегового эффекта и другими эффектами, связанными с геоэлектрической неоднородностью среды. На рис. 4 видно, что большинство продольных кривых в левой части имеют минимум, связанный с осадочно-вулканогенным чехлом пониженного электрического сопротивления. Только отдельные кривые не имеют минимума. В этих районах отсутствует верхний высокоомный слой или он имеет небольшую мощность в первые десятки метров. Следует отметить, что во

многих районах продольные и поперечные кривые в низкочастотной области сильно расходятся по уровню сопротивлений. При этом поперечные кривые имеют восходящие асимптотические ветви, а продольные кривые выражены в виде минимума или нисходящей асимптотической ветви. Как будет показано ниже, расхождение кривых на периодах более 400 с связано с влиянием берегового эффекта. Так, наибольшее расхождение кривых, примерно на 4 порядка, отмечается в прибрежном районе I. Расхождение кривых на периодах до 400 с в районах I–VI можно объяснить наличием поперечной проводящей зоны, связанной с глубинным разломом, к которому приурочен вулкан Ходутка. Следует отметить, что в районах VII–IX при сильном расхождении продольных и поперечных кривых на последних выражен минимум, который, по-видимому, вызван индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в разломе. В районах X–XII, XIV–XV продольные и поперечные кривые не расходятся в низкочастотной области или расходятся незначительно. В X районе продольная кривая имеет восходящую ветвь в низкочастотной области, как и поперечная кривая. Такое поведение кривой связано с магматическими высокоомными породами в земной коре вулкана Асача. Важно обратить внимание на то, что в районах XI–XII и XIV–XV на продольных и поперечных

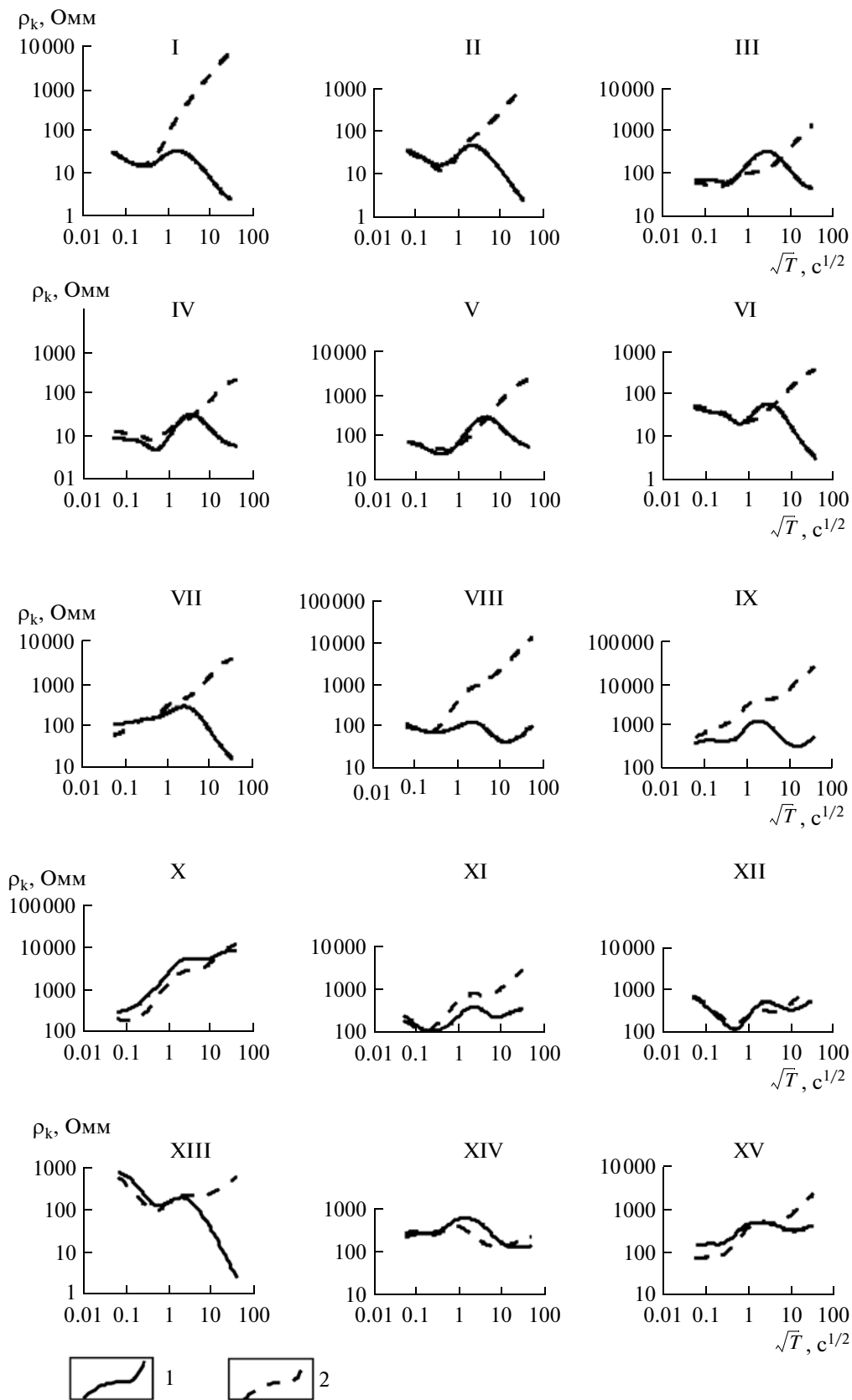


Рис. 4. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ.
1 – продольные, 2 – поперечные.

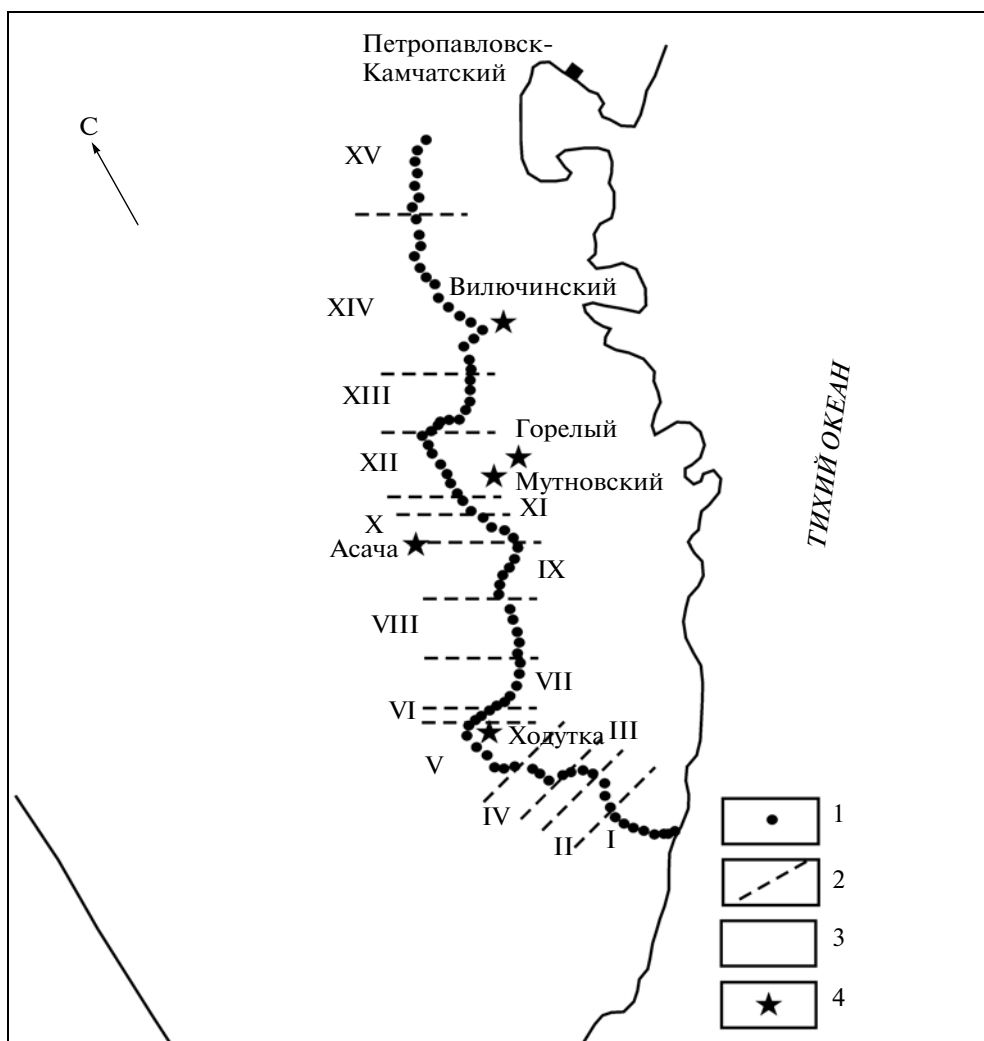


Рис. 5. Схема расположения районов, для которых получены средние продольные и поперечные кривые МТЗ. 1 – пункты МТЗ; 2 – границы районов; 3 – номера районов; 4 – вулканы.

кривых в низкочастотной области выражены минимумы или нисходящие ветви. Это однозначно указывает на существование в указанных районах глубинного проводящего слоя. В подобных районах затухает береговой эффект. Поэтому поперечные и продольные кривые в низкочастотной области сближаются по форме и уровню сопротивления. Характерно, что в XIII районе проявляется эффект расхождения продольных и поперечных кривых в низкочастотной области. При этом на поперечной кривой выражен минимум, а продольная кривая представлена нисходящей ветвью. Такой вид кривых свидетельствует о возможном наличии поперечной глубинной проводящей зоны и действию берегового эффекта.

Для оценки берегового эффекта в районе профиля обратимся к данным численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля Камчатки [Мороз, Мороз, 2011]. В основу модели-

рования положена пробная модель, в которой мощность и удельное электрическое сопротивление суши приняты постоянными, чтобы оценить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенного чехла Камчатки. Фрагмент этой карты приведен на рис. 6. Верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление $30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Эти параметры являются примерно средними по данным электромагнитных исследований Камчатки [Мороз, 1991]. Удельное электрическое сопротивление морской воды составляет $0.25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным. Он закономерно уменьшается с глубиной. В результате моделирования по программе Макки [Maskie et al., 1994] получены продольная, поперечная и локально-нормальная кривая для каж-

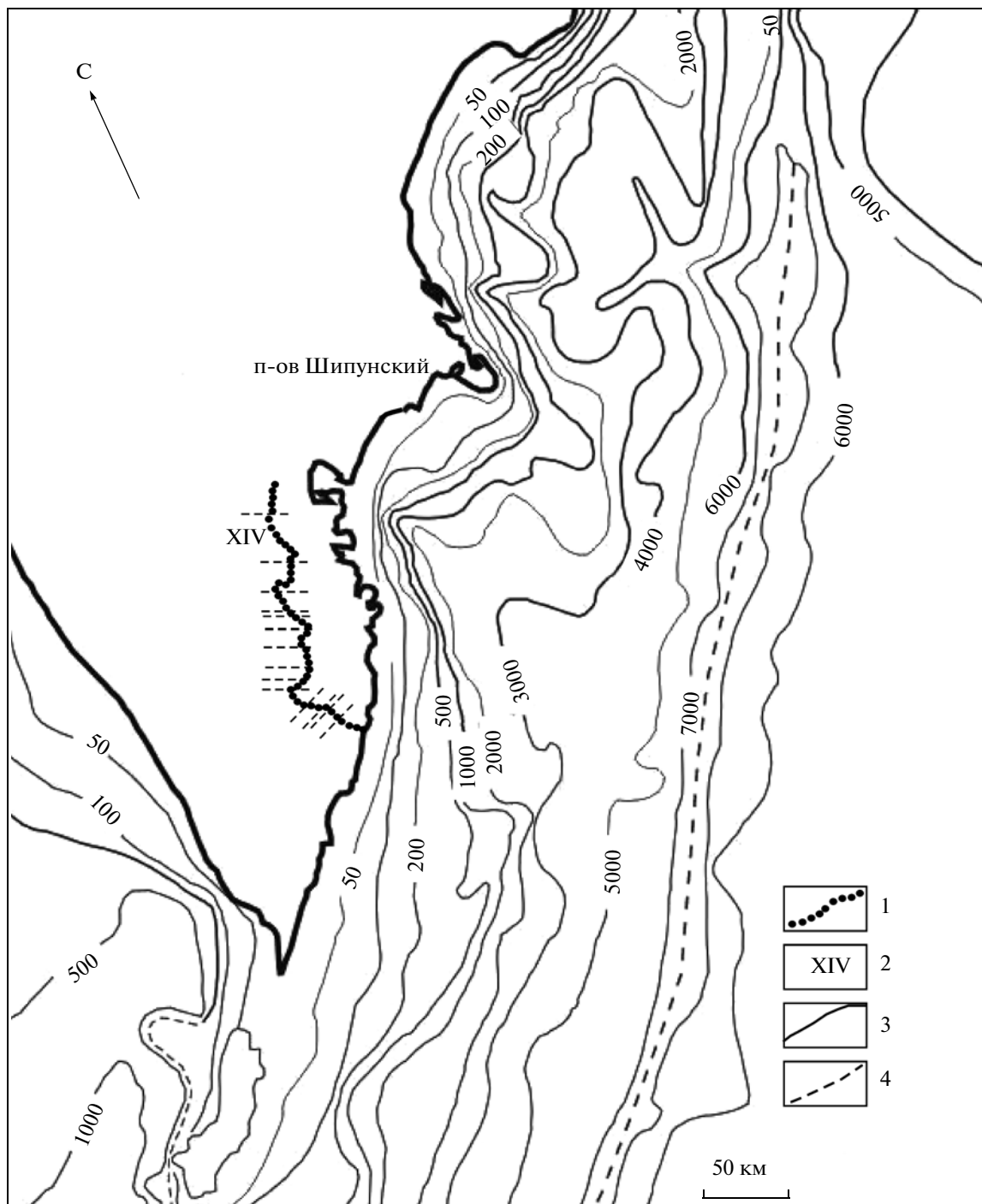


Рис. 6. Южный фрагмент батиметрической карты с расположением профиля МТЗ.

1 – профиль МТЗ; 2 – номера районов; 3 – изобаты; 4 – границы районов.

ного района профиля, где мы располагаем средними кривыми МТЗ.

Модельные кривые различных районов во многом подобны. В качестве примера, на рис. 7 приведены кривые только для двух районов – I и XIV, расположенных на различном удалении от морского берега. Видно, что модельные продоль-

ные и поперечные кривые отклоняются от локально-нормальной кривой в низкочастотной области (см. рис. 7). Заметное отклонение кривых начинается на периодах более 100 с. Продольные кривые имеют хорошо выраженный минимум на периодах 2500–5000 с, который связан с индукционным влиянием электрических токов, кон-

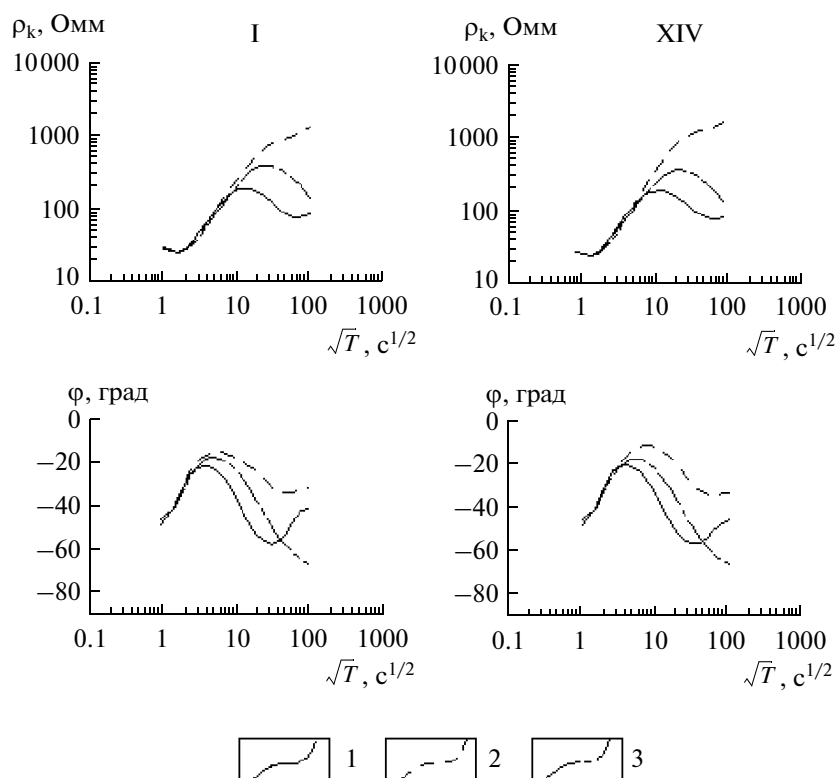


Рис. 7. Модельные кривые МТЗ для стандартной глубинной модели.
1 – продольные, 2 – поперечные, 3 – локально-нормальные.

центрирующихся в океане. Поперечная кривая в своей правой части представлена восходящей асимптотической ветвью, которая выполаживается на периодах 5000–10000 с. Такое поведение кривой вызвано краевым эффектом за счет резкого контраста электропроводности суши и океана. Из этого анализа видно, что средние продольные и поперечные экспериментальные кривые могут быть подвержены влиянию берегового эффекта.

Однако, ситуация выглядит по-другому, если литосфера содержит проводящий слой. Он выявлен при изучении глубинной электропроводности по магнитовариационным и магнитотеллурическим данным [Мороз, 1991]. Проводящий слой расположен на глубинах 20–30 км с удельным электрическим сопротивлением 50 Ом · м. С этими параметрами он введен в первоначальную модель со стандартным распределением глубинной электропроводности. Полученные модельные кривые приведены на рис. 8. Заметное отклонение амплитудной продольной кривой от локально-нормальной кривой начинается примерно с периода 400 с. Это свидетельствует о том, что наличие корового проводящего слоя приводит к затуханию индукционного эффекта, связанного с морскими электрическими токами. Следовательно, экспериментальные амплитудные кривые МТЗ до периода 400 с можно использовать для

изучения геоэлектрического разреза вулканической зоны.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ПО ДАННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МТЗ

Распределение электропроводности пород с глубиной получено с помощью дифференциальной трансформации Ниблетта [Niblett, Sayn-Witgensien, 1960] (рис. 9). Изолинии на разрезе изображены в Ом · м. На верхней шкале разреза показаны границы районов, для которых получены средние продольные кривые МТЗ; изображены вулканы, расположенные в районе профиля на удалении в первые десятки километров, а также гидротермальные источники и рудопроявления. Кроме этого, над разрезом показаны графики аномального магнитного поля и поля силы тяжести в условных единицах.

Обратимся к геоэлектрическому разрезу. Верхняя часть разреза практически не выражена из-за мелкого масштаба. Судя по кривым МТЗ, на глубинах в первые километры существует зона пониженных значений сопротивлений, характеризующих осадочно-вулканогенный чехол. В средней части профиля до глубин в первые десятки километров выделяется субвертикальная аномалия повышенного электрического сопротивления в

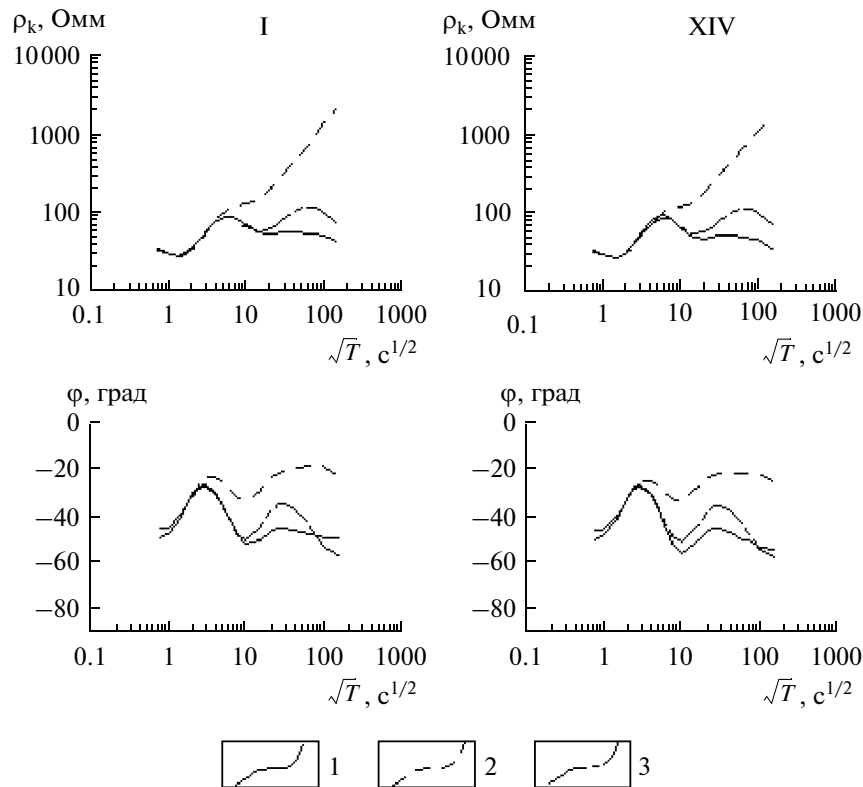


Рис. 8. Модельные кривые МТЗ для модели, содержащей литосферный проводящий слой. 1 – продольные, 2 – поперечные, 3 – локально-нормальные.

сотни-первые тысячи Ом · м. К этой аномалии приурочены вулканы Асача и Мутновский. Предполагается, что повышенные электрические сопротивления связаны с глубинным разломом, насыщенным магматическими породами. Наличие в земной коре магматических пород находит отражение в виде аномалий повышенной интенсивности поля силы тяжести и возмущенного магнитного поля на отрицательных аномалиях магнитного поля. В северной части профиля в земной коре на глубинах 20–40 км выделяется аномалия пониженного удельного электрического сопротивления в первые десятки Ом · м. К краям аномалии приурочены вулканы Горелый и Вилючинский. Природа аномалии связывается с наличием магматических расплавов и гидротермальных растворов. Аномалия находит отражение в пониженной интенсивности поля силы тяжести. Возмущенный характер поля обусловлен присутствием в верхней части разреза вулканогенных пород. Выявленная аномалия повышенной электропроводности находит подтверждение в виде зоны пониженной сейсмической скорости по данным сейсмотомографии. В районе аномалии повышенной электропроводности на поверхности отмечаются выходы гидротермальных источников и рудопроявления.

На профиле в районах VI–VII выделяется аномалия пониженного удельного электрического сопротивления в первые десятки Ом · м на глубинах 30–50 км. В верхней части земной коры отмечается повышение удельного электрического сопротивления до 1000 Ом · м. К границе выделенных аномалий приурочен вулкан Ходутка. Предполагается, что аномалия повышенной электропроводности связана с глубинным разломом, насыщенным магматическими расплавами, а аномалия пониженной электропроводности – с насыщенностью верхних частей земной коры магматическими породами. Аномалии повышенной электропроводности соответствуют относительно низкому уровню поля силы тяжести и возмущенному характеру магнитного поля. В юго-восточной части профиля (районы I–II) в земной коре выражена аномалия повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в 10–20 Ом · м. Предполагается, что аномалия связана с поперечным глубинным разломом, насыщенным высокоминерализованными растворами. В поле силы тяжести этой аномалии электропроводности отвечают локальные возмущения на фоне региональной аномалии, связанной с увеличением плотности и уменьшением мощности земной коры при переходе от суши к океану. В магнитном поле здесь также выра-

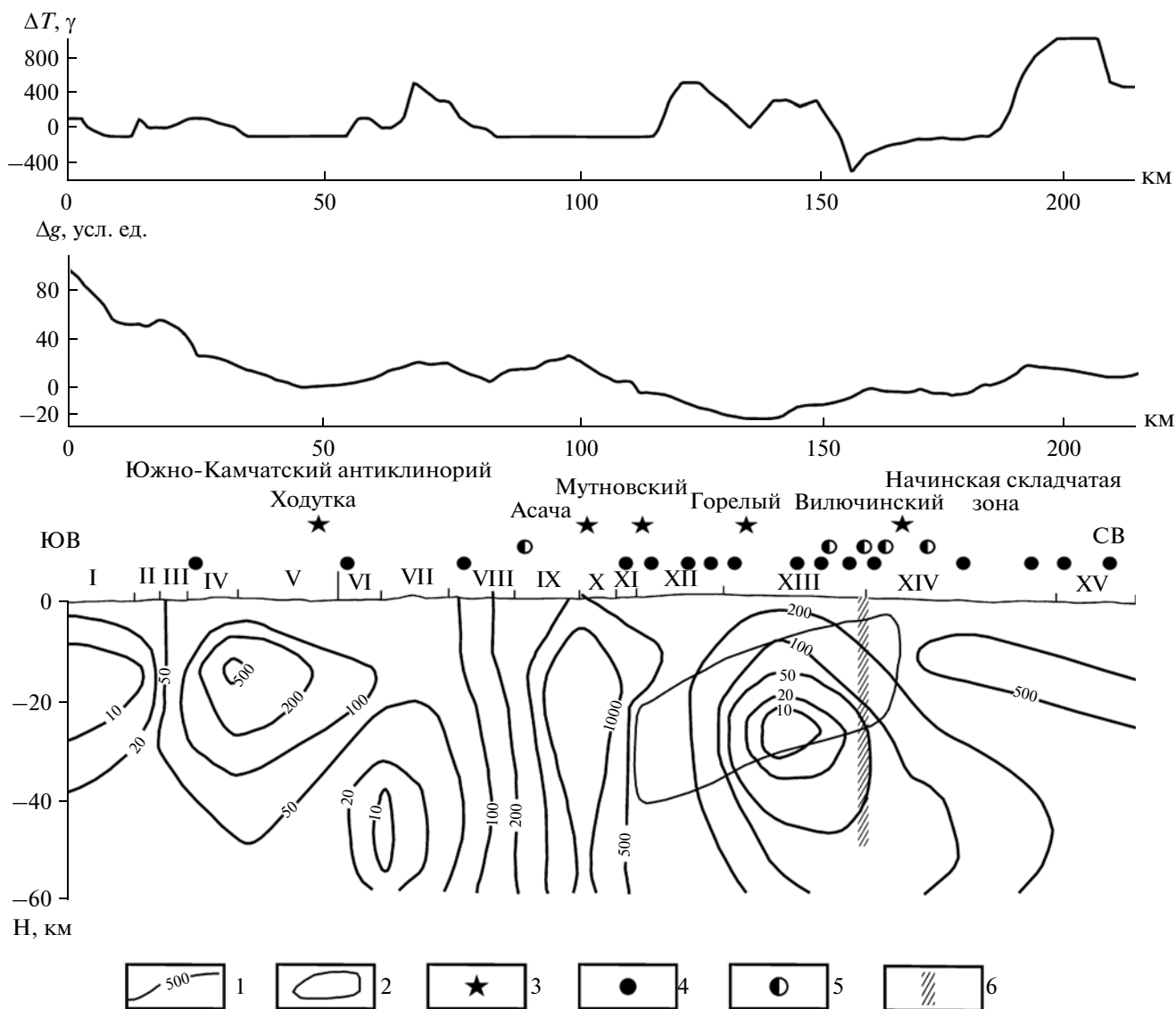


Рис. 9. Глубинный геоэлектрический разрез вулканической зоны.

1 – изолинии, в Ом · м; 2 – аномалия пониженной сейсмической скорости [Гонтовая и др., 2010]; 3 – вулканы; 4 – гидротермальные источники; 5 – рудопроявления ископаемых; 6 – разлом [Карта ..., 1999].

жены локальные аномалии, обусловленные наличием в разрезе магматических образований.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемый профиль МТЗ расположен в зоне субдукции. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии получен примерно до глубины 60 км. Сейсмофокальный слой расположен в районе профиля на глубинах 100–120 км. Над сейсмофокальной зоной на глубинах 70–80 км находится кровля астеносферного проводящего слоя. Удельное электрическое сопротивление слоя около 10 Ом · м [Мороз, 1991]. Выявленные

нами аномалии повышенной электропроводности в земной коре и верхней мантии располагаются над астеносферным проводящим слоем. Они находят отражение в пониженных значениях поля силы тяжести, которые могут быть связаны с разуплотнением земной коры. Аномалии повышенной интенсивности магнитного поля характеризуют наличие в приповерхностных частях разреза магматических интрузивных и эффузивных образований. Важно отметить, что к выделенным аномалиям повышенной электропроводности приурочены на земной поверхности выходы гидротермальных источников и рудопроявления серебра, свинца, золота и т.д.

В северной части профиля мы располагаем данными сейсмической томографии [Гонтовая и др., 2010]. Из этой работы на разрезе показаны контуры литосферной аномалии пониженной скорости (4–7%) и кровля астеносферных скоростных неоднородностей. Аномалии повышенной электропроводности и пониженной скорости в общих чертах согласуются между собой. Кровля астеносферного слоя неоднородностей не противоречит положению астеносферного слоя, выявленного ранее по электромагнитным данным [Мороз, 1991]. Это дает возможность однозначно судить о возможной природе выявленных аномалий электропроводности в литосфере зоны субдукции.

Следует отметить, что в районе вулканической зоны региональный тепловой поток является повышенным и составляет около 70–80 мВт/м² [Смирнов, Сугробов, 1980]. Магматизм здесь проявился с конца палеогена – начала неогена до четвертичного времени. Следовательно, магматизм начался примерно 30–40 млн лет назад. Если возникновение магм связывать с астеносферным проводящим слоем, расположенным на глубине 70–90 км, то приближенные оценки показывают, что 30–40 млн лет назад кондуктивный тепловой поток из астеносферного выступа достиг поверхности. В результате разогрева литосферы усилились геодинамические процессы, которые при определенных P-T условиях привели к дегидратации пород земной коры на глубинах 20–30 км. Оценки показывают, что дегидратация пород, содержащих кристаллизационную воду или группу ОН (слюды, хлорит, роговая обманка и т. д.), возможна при температурах 400–800° на указанных глубинах. В процессе дегидратации пород выделяется вода, обладающая высокой растворяющей способностью, что приводит к образованию высокоминерализованных растворов. Обогащение пород жидким электролитом приводит к резкому уменьшению электрического сопротивления на несколько порядков.

Грубые оценки показывают, что достаточно сотых-десятых долей процента относительного объема флюида в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшение сопротивления горной породы до первых десятков-единиц Ом · м [Ваньян, Хайдман, 1996]. Можно предполагать, что одной из причин возникновения коровых проводящих зон является наличие жидкой фазы. Также нельзя исключить роль электропроводящих минералов, которые выпадали из высокоминерализованных растворов при их остывании при подъеме к земной поверхности. На это указывают рудопроявления цветных и благородных металлов в районе профиля.

Следует отметить, что в районах современного и четвертичного вулканизма аномалии электропроводности в земной коре сопротивлением в первые десятки Ом · м могут быть связаны с магматическими очагами. Известно, что в результате частичного плавления кислых и основных пород резко возрастает электропроводность, близкая по величине к проводимости жидкой фазы. По существующим представлениям магматические очаги в земной коре могут возникнуть как в результате проникновения магм из верхней мантии, так и в результате плавления пород земной коры. Большую роль при этом играют высокоминерализованные растворы, существенно понижающие температуру плавления. Так в земной коре в их присутствии возможно плавление пород кислого состава при температурах 400–800°С. При этом, согласно электромагнитным данным, для образования расплавов достаточно 1–2% воды, растворы которой могут обеспечить выплавление наиболее легкоплавких компонентов, образующих связанную систему.

Таким образом, мы приходим к выводу, что в возникновении зон повышенной электропроводности ведущая роль принадлежит жидкой фазе – гидротермальным растворам и расплавам. В районе рудопроявлений повышение электропроводности верхних частей земной коры может быть связано со скоплением электропроводящих минералов.

Попытаемся оценить пористость проводящей зоны в районе, которая нашла отражение в виде аномалии пониженной сейсмической скорости по данным сейсмической томографии. Для этого воспользуемся формулой Арчи для двухфазовой системы:

$$\rho = 3\rho_{\phi}/2k,$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление проводящей зоны; ρ_{ϕ} – удельное электрическое сопротивление флюида; k – пористость. В этой формуле предусмотрена связанность каналов. Удельное электрическое сопротивление по данным МТЗ примем 20 Ом · м. Согласно [Ваньян, Хайдман, 1996] примем удельное электрическое сопротивление флюида в земной коре 0.01 Ом · м [Shankland, Waff, 1974; Rai, Manghanani, 1978]. Из формулы видно, что при удельном электрическом сопротивлении 10 Ом · м пористость будет 0.15% при полной связанности пор. Очевидно, пористость будет больше, если учесть изолированные и тупиковые каналы. Для грубых оценок влияния жидких флюидов на скорость сейсмических волн в малопористых породах обратимся к следующему выражению [Ляховицкий и др., 1984]:

$$1/V = V_b + (1 - P)/V \cdot \Delta V/V = P(V_0/V_b - 1),$$

где V_0 – скорость распространения продольных волн в скелете горных пород, V_b – скорость распространения продольных волн в жидком флюиде. Отношение V_0/V_b лежит в пределах от 4 до 5. Из формулы видно, что при изменении пористости на 0.15% скорость продольных сейсмических волн понизится всего лишь на 0.45%–0.6%. Эти величины находятся за пределами разрешающей способности сейсмотомографии. Поэтому проводящие зоны не всегда находят отражение в сейсмической скорости. В районе XIII, где расположен вулкан Горелый, мы предполагаем наличие магматического очага [Мороз, 1985]. В пользу этого свидетельствует совпадение аномалии повышенной электропроводности и пониженной скорости сейсмических волн [Гонтовая и др., 2010]. Оценим пористость литосферной аномалии повышенной электропроводности с помощью формулы Арчи. Необходимо определиться с электропроводностью магматического расплава. Известно, что 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 первые десятки-единицы Ом · м [Адамчук, Трубников, 1977; Frischnecht, 1967; Murase, McBirney, 1973; Keller, Rapolla, 1974]. Данный параметр для базальтовой выплавки в присутствии воды снижается до 0.1 Ом · м [Rai, Manghanani, 1978; Shankland, Waff, 1974]. По-видимому, для дальнейших оценок целесообразно принять удельное электрическое сопротивление магматического расплава, содержащего воду, приблизительно в 0.1 Ом · м. При данной величине пористость при полной связанности пор в литосферной проводящей зоне будет достигать 1.5% и более. Как мы уже отмечали, полная пористость, включающая изолированные и тупиковые каналы, будет существенно больше. Даже при пористости в 1.5% понижение скорости продольных сейсмических волн составит 3% (в формуле вместо V_b принимается скорость в расплаве V_p , отношение V_0/V_p около 3). Эта величина согласуется с данными сейсмической томографии. Таким образом, по данным МТЗ и сейсмической томографии можно полагать, что аномалия повышенной электропроводности и пониженной сейсмической скорости может быть связана с магматическими расплавами. В районе магматического очага образуются гидротермы, обладающие высокой проникающей способностью. Они поступают в вышележащие толщи и заполняют трещинные и поровые коллекторы вулканогенно-осадочного

чехла. По системе трещин глубинной разломной зоны гидротермы проникают на поверхность, образуя гидротермальные источники. Гидротермы содержат большое количество рудных компонент, которые при осаждении в приповерхностных частях земной коры образуют рудопроявления. Гидротермальные источники и рудные образования в большей мере проявились в районах XII, XIII, XIV, где литосфера содержит аномалии пониженного электрического сопротивления и сейсмической скорости, связываемых с магматическими расплавами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глубинное строение вулканической зоны изучено с помощью МТЗ и другой геолого-геофизической информации. Интерпретация МТЗ выполнена по кривым кажущегося электрического сопротивления, ориентированным по простиранию и вкрест простирания основных тектонических зон Южной Камчатки. Кривые МТЗ по своей форме организованы в семейства, отвечающие различному типу геоэлектрического разреза. По этому признаку на профиле выделено 15 районов с различным характером распределения глубинной электропроводности. Анализ показал, что продольные и поперечные кривые подвержены эффекту ρ , связанному с действием гальванических эффектов за счет влияния мелких геоэлектрических неоднородностей. Для подавления эффекта ρ использовано конформное осреднение кривых МТЗ.

Результаты численного трехмерного моделирования пробных моделей свидетельствуют о том, что продольные и поперечные кривые подвержены влиянию индукционного и берегового эффектов. Установлено, что продольные кривые до периода 400 с слабо затронуты влиянием индукционного эффекта и в лучшей мере отражают изменение электропроводности с глубиной. Поэтому для изучения электропроводности литосферы в качестве основных приняты продольные кривые до периода 400 с. Поперечные кривые использованы для уточнения геоэлектрической модели.

В результате инверсии продольных кривых МТЗ получен глубинный геоэлектрический разрез до глубины около 60 км. Выявлены аномалии повышенной и пониженной электропроводности в литосфере, которые в большинстве случаев находят отражение в поведении поля силы тяжести и геомагнитного поля. Большой интерес представляет аномалия повышенной электропроводности в районе вулкана Горелый. Она характери-

зуется пониженной сейсмической скоростью по данным сейсмической томографии.

Комплексный анализ электропроводности и сейсмической скорости позволил оценить пористость пород литосферы в районе аномалии и возможное содержание магматических расплавов, которое может достигать 1.5% при полной связанности каналов. Предполагается, что аномалия связана с магматическим очагом, в районе которого формируются гидротермы, поднимающиеся по трещинам в верхние части осадочно-вулканогенного чехла. При подъеме гидротерм происходит понижение температуры, и из них осаждаются рудные компоненты. На земной поверхности рудные проявления и гидротермальные источники в большей мере проявились в районе выявленной литосферной аномалии повышенной электропроводности, связываемой с магматическим очагом.

Работы выполнены ОАО “Камчатгеология” с участием ООО “Северо-Запад” (г. Москва) в соответствии с Государственным контрактом, заключенным в 2007 г. между Управлением по недропользованию по Камчатской области (“Камчатнедра”) и ОАО “Камчатгеология”.

Авторы выражают благодарность ООО “Северо-Запад” и ОАО “Камчатгеология” за предоставленные данные МТЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамчук Ю.В., Трубников Б.А. Электропроводность текущей лавы южного Ново-Толбачинского прорыва (Препринт) // Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова: ИАЭ-2841. М.: ОНТИ ИАЭ, 1977. 8 с.
- Апрелков С.Е. Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // Геотектоника. 1971. № 2. С. 47–61.
- Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра, 1981. 270 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.
- 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.
- Декин Г.П., Зубин М.И. Рельеф основных поверхностей раздела земной коры Камчатки // Геофизические поля северо-запада Тихоокеанского подвижного пояса. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 44–55.
- 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. Глубинная геоэлектрическая модель Южной Камчатки // Тихоокеанская геология. 1985. № 6. С. 100–105.
- Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Мороз Ю.Ф., Киликян В.А., Порай-Кошиц А.М. Магнитовариационное зондирование Южной Камчатки // Физика Земли. 1990. № 2. С. 49–54.
- Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 97–109.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–71.
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А. Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58–66.
- Мороз Ю.Ф., Скрипников А.П. Магнитотеллурическое зондирование Мутновского геотермального района Южной Камчатки. М.: ВИНТИ, 1985. № 1840-85. Деп. 15 с.
- Мороз Ю.Ф., Скрипников А.П. Глубинная геоэлектрическая модель вулкана на Камчатке // Физика Земли. 1995. № 7. С. 82–88.
- Нурмухамедов А.Г., Чернев И.И., Алексеев Д.А., Яковлев А.Г. Трехмерная геоэлектрическая модель Мутновского месторождения парогидротерм // Физика Земли. 2010. № 9. С. 15–26.
- Ривов Л.А. О тектонике Камчатского полуострова и дна прилегающих к нему морских районов (по геофизическим данным) // Геология и геофизика. 1963. № 6. С. 30–47.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М. Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 16–31.
- Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // J. Geophysics. 1988. № 62. P. 119–127.
- Frischnecht P.C. Fields about an oscillating dipole // Colorado School of Mines. 1967. V. 62. № 326. 78 p.
- Keller G., Rapolla A. Physical volcanology. Amsterdam. New York. 1974. 133 p.
- 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.
- Murase T., McBirney A. Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures // Bull. Geol. Soc. Amer. 1973. V. 84. № 11. P. 6–13.
- Niblett E.R., Sayn-Wittgensien C. Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method // Geophysics. 1960. V. 25. № 5. P. 998–1008.
- Rai C.S., Manghanani M.H. Electrical conductivity of ultramafic rock to 1820 Kelvin // Phys. Earth Planet. Inter. 1978. V. 17. P. 6–13.
- Shankland T.I., Waff H.S. Conductivity in fluid-bearing rocks // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 32. P. 5409–5417.

Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation. Dept. of Geology and Geophysics. MIT. Cambridge. Mass. 1967.

The Deep Structure of the Southern Kamchatka Volcanic Zone from Geophysical Data

Yu. F. Moroz and O. M. Samoilova

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: morozyf@kscnet.ru*

Abstract—We discuss the interpretation method and results of magnetotelluric soundings in combination with other geological and geophysical data. The interpretation method was developed by studying possible distortions in MTS curves using 3D-numerical modeling of the magnetotelluric field. Deep conductivity was studied by using longitudinal MTS curves below a period of 400 s, which are nearly unaffected by the induction effect due to marine electrical currents. Transverse curves were used to obtain more detail for the geoelectric model. Inversion of average longitudinal MTS curves resulted in a geoelectric section of the lithosphere down to a depth of 60 km. Anomalies of high conductivity in the lithosphere were detected and were found to produce certain effects in gravity and seismic velocities. MTS and seismic tomography data were used to determine the possible origin of the high conductivity anomaly and to estimate rock porosity and the concentration of magma melts.