

Научные статьи

УДК 550 837

DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-9-24

ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ НА КАМЧАТКЕ

© 2019 Ю.Ф. Мороз^{1,2}, В.А. Логинов¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006, Петропавловск-Камчатский, Россия; e-mail: morozyf@ksnet.ru

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

Рассмотрены методика и результаты магнитотеллурических зондирований в районе Авачинско-Корякской группы вулканов. Геоэлектрический разрез изучен в диапазоне периодов 0.0001 – 1000 с и более. Выполнено численное двумерное моделирование. Предварительно с помощью пробных моделей изучены возможные искажения кривых зондирований. По данным качественного анализа магнитотеллурических параметров определен характер геоэлектрических неоднородностей. В качестве основных приняты кривые по простиранию и вкрест простирания структур Камчатки. Продольные кривые, в меньшей степени подверженные влиянию берегового эффекта, использованы совместно с поперечными кривыми для создания геоэлектрической модели с помощью численного двумерного моделирования магнитотеллурического поля. Полученная геоэлектрическая модель содержит в верхней части разреза проводящий слой, связанный с осадочно-вулканогенным чехлом. Глубинная часть модели включает субвертикальные проводящие зоны, отражающие зону глубинных разломов. Рассматривается возможная природа выявленных аномалий и приближенная оценка пористости пород в проводящих зонах.

Ключевые слова: электропроводность, магнитотеллурическое зондирование, Авачинско-Корякская группа вулканов, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Получение информации о глубинном строении районов современного вулканизма представляет, по мнению авторов, повышенный интерес для геологов, вулканологов и геофизиков. Практическое значение имеет поиск геотермальных месторождений, связанных с магматическими очагами. Актуальной задачей на Камчатке является изучение глубинного строения Авачинско-Корякской группы вулканов, расположенной вблизи г. Петропавловска-Камчатского. Решение этой задачи представляет перспективы по обеспечению тепловой энергией жителей Петропавловска-Камчатского и близлежащих районов. В районе Авачинско-Корякской группы вулканов проведены геофизические исследования различными методами (Балеста,

1981; Зубин, Козырев, 1981; Мороз, Гонтовая, 2003; Мороз, Нурмухамедов, 1998 и др.). Среди них важное место занимают магнитотеллурические методы, позволяющие обнаружить зоны, насыщенные гидротермальными растворами и магматическими расплавами, так как электропроводность является более чувствительной к наличию жидких флюидов по сравнению с другими геофизическими параметрами, включая скорость сейсмических волн.

В районе Авачинско-Корякской группы вулканов в 1990-х гг. выполнен большой объем магнитотеллурических зондирований (МТЗ), который позволил получить информацию о структуре электропроводности земной коры (Мороз, Нурмухамедов, 1998). Однако, несмотря на полученные результаты, по ряду причин, не удалось в полной мере изучить электропроводность

под Авачинско-Корякской группой вулканов. К сожалению после этого, в описываемом районе, магнитотеллурических зондирований не проводилось.

В период 2016–2017 гг. нами проведены магнитотеллурические зондирования по профилю (рис. 1) длиной ~45 км с шагом 0.3–2 км с использованием современной аппаратуры компании «Phoenix Geophysics Ltd» MTU-5A в расширенном диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 с и более. Это дало возможность получить более полную, по сравнению с работами конца XX в., информацию о структуре электропроводности земной коры под Авачинско-Корякской группой вулканов.

Настоящая статья посвящена результатам выполненных нами магнитотеллурических

исследований, существенно уточняющим геоэлектрическую модель литосферы Авачинско-Корякской группы вулканов.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Авачинско-Корякская группа вулканов расположена в 30 км севернее г. Петропавловска-Камчатского (рис. 1). Она включает вулканы: Авачинский, Корякский, Козельский, Аиг, Арик. Действующими и наиболее крупными являются Корякский и Авачинский вулканы. Вулканические постройки сложены современными эффузивно-пирокластическими образованиями. Они приурочены к Авачинской

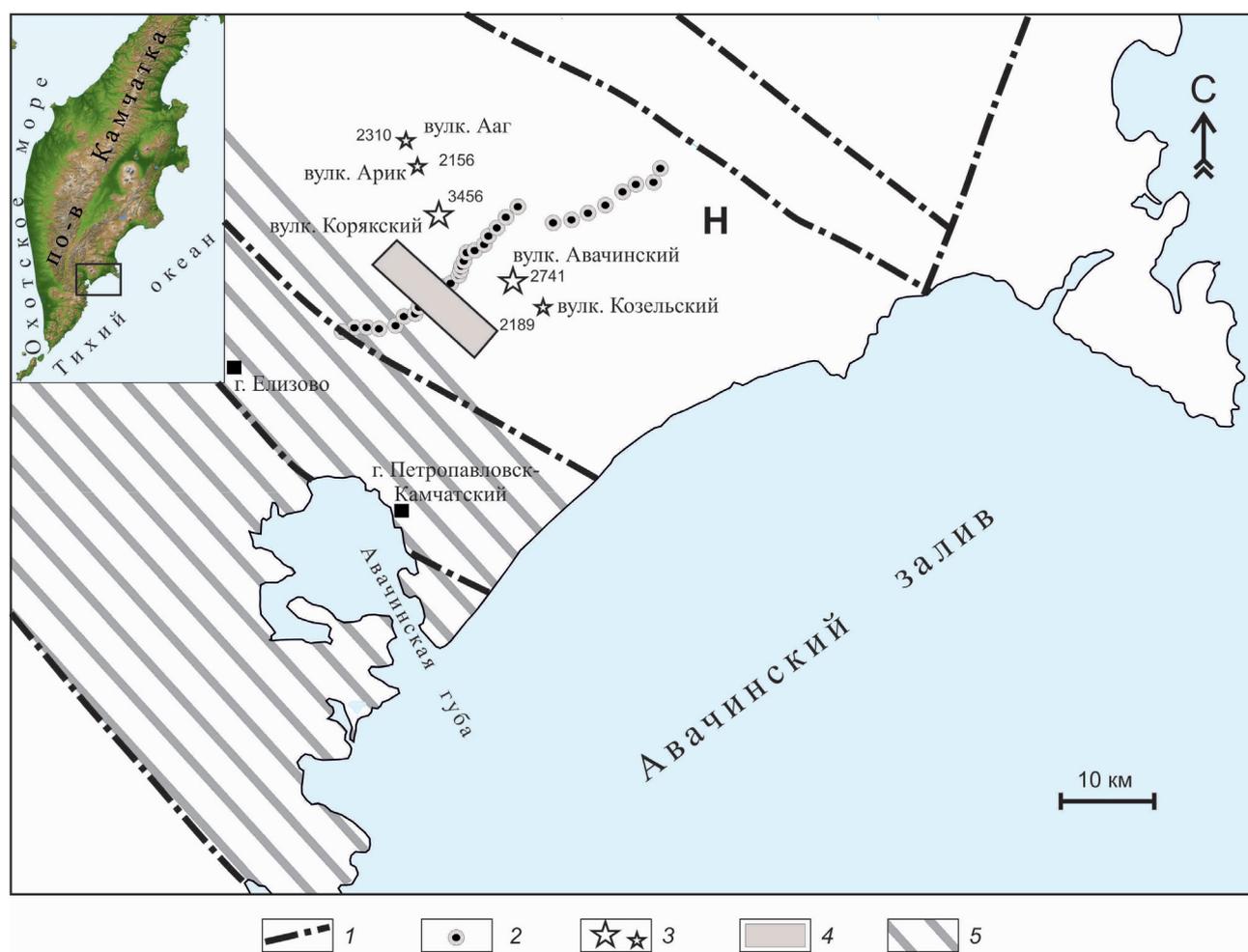


Рис. 1. Схема расположения основных разломов Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций (Карта ..., 1999): 1 — глубинные разломы; 2 — пункты МТЗ; 3 — вулканы Авачинско-Корякской группы; 4 — подтвержденные границы Авачинского грабена; 5 — Петропавловск-Малкинская зона поперечных дислокаций. Цифрами рядом с вулканами обозначена максимальная отметка над уровнем моря в м. Н — Налычевская структура. Прямоугольником на врезке показан район исследований.

Fig. 1. The layout of the main faults at the Petropavlovsk-Malkinskaya zone of transverse dislocations (Map ..., 1999): 1 — deep faults; 2 — points of MTS; 3 — volcanoes of the Avacha-Koryaksky group of volcanoes; 4 — confirmed Avachinsky graben boundaries; 5 — Petropavlovsk-Malkinsky zone of transverse dislocations. Numbers near volcanoes denote the maximum elevation above sea level in m. Н — Nalychevskaya structure. The research area is shown by rectangle on the inset.

депрессии (грабену), выполненной палеоген-неогеновыми вулканогенно-осадочными породами. Депрессия является составной частью Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций (рис. 1), имеющей северо-западное простирание. Большую роль в строении зоны играют разломы северо-западной ориентировки, определяющие ее блоковое строение (Геология ..., 1964; Карта ..., 1999). Преимущественный состав лав, излившихся на поверхность, средний и основной. Породы представлены базальтами, андезибазальтами и андезитами. Наиболее распространены андезибазальты. На возможный мантийный источник первоначальных магм указывают ксенолиты, представленные перидотитами и пироксенитами (Действующие ..., 1991).

По данным электромагнитных исследований (Мороз, Гонтовая, 2003; Мороз, Нурмухамедов, 1998) геоэлектрический разрез земной коры под Авачинско-Корякской группой в обобщении выглядит следующим образом. Верхняя часть разреза, сложенная четвертичными вулканогенными и осадочными образованиями, мощностью в первые сотни метров, характеризуется удельным электрическим сопротивлением сотни – первые тысячи Ом·м. Ниже залегает кайнозойская толща со средним удельным электрическим сопротивлением от десятков до первых тысяч Ом·м. Мощность этой толщи меняется от 0 до

первых км. Консолидированный фундамент имеет удельное электрическое сопротивление первые тысячи Ом·м. Глубинная часть разреза содержит коровую и астеносферную проводящие зоны (Мороз, 1991). В районе Авачинско-Корякской группы вулканов земная кора разделяется на две зоны различной электропроводности. Восточная зона характеризуется повышенным электрическим сопротивлением. Западная зона содержит слой с пониженным электрическим сопротивлением до 8 Ом·м. Середина слоя поднимается примерно с глубины 30–35 км на юго-западе до глубины 10–15 км под западным склоном Авачинского и Корякского вулканов, где осадочно-вулканогенная толща содержит аномалию повышенной электропроводности до глубины 4–5 км. Эта аномалия отражает Авачинский грабен, выполненный преимущественно проводящими отложениями. (Мороз, Гонтовая, 2003; Мороз, Нурмухамедов, 1998).

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Магнитотеллурические исследования выполнены нами по профилю, пересекающему вулканическую зону через Авачинский перевал в северо-восточном направлении (рис. 2). В вулканической зоне он располагается между Корякским и Авачинским вулканами, между

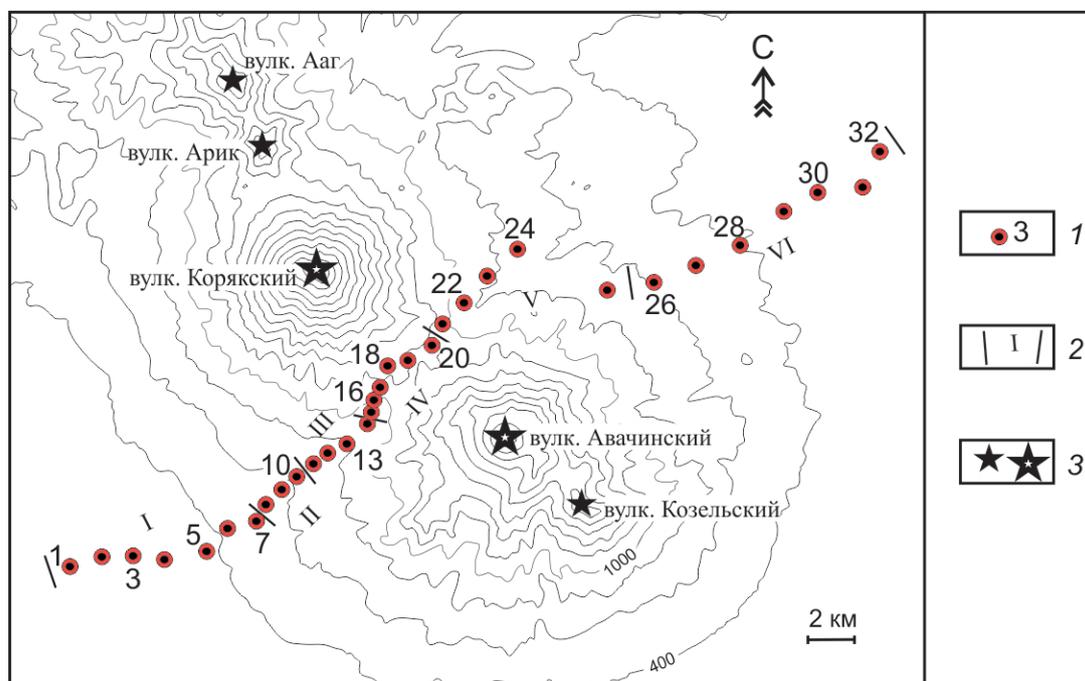


Рис. 2. Схема расположения пунктов МТЗ: 1 — пункты МТЗ и их номера, обозначенные арабскими цифрами; 2 — границы семейств характерных кривых МТЗ и их номера, обозначенные римскими цифрами; 3 — вулканы Авачинско-Корякской группы.

Fig. 2. The layout of the MTS points: 1 — MTS points and their numbers, denoted by Arabic numerals; 2 — borders of typical MTS curves families and their numbers, indicated by Roman numerals; 3 — volcanoes of the Avacha-Koryaksky group.

вершинами которых около 13 км. Протяженность профиля 45 км, расстояние между пунктами зондирования 0.3–2 км со сгущением шага в аномальной области. Регистрация магнитотеллурического поля, в исследуемом районе, впервые проводилась с помощью двух облегченных станций MTU-5A. Наблюдения магнитотеллурического поля осуществлялись в диапазоне периодов 0.0001–1000 секунд и более. Для регистрации электрического поля использовалась четырехэлектродная крестообразная измерительная установка, заземленная неполяризуемыми электродами. Длина электрических линий 80 м, азимут линий 30° и 120°. Магнитные датчики (МТС-50Н) также ориентировались по магнитным азимутам 30° и 120°. Для подавления ветровых помех и микросейсм датчики размещались в ямы глубиной около 30 см и присыпались землей. Кроме того, с целью подавления влияния помех также применялась методика синхронных измерений двух станций.

Обработка МТ-данных выполнена с использованием пакета программ компании «Phoenix Geophysics Ltd» SSMT-2000, Synchro Time Series View и МТ-Editor.

Рассчитаны функции взаимной корреляции всех компонент поля и произведены Фурье-преобразования; в результате определены кросс-спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые пересчитаны в компоненты тензора импеданса. В дальнейшем при помощи программы МТ-Editor осуществлена статистическая робастная отбраковка полученных на каждой частоте массивов данных с целью подавления влияния собственных шумов аппаратуры, случайных и техногенных помех. Эта работа выполнена как в одиночном, так и в синхронном режимах. Углубленная окончательная обработка осуществлена с использованием программы МТ-Corrector (ООО «Северо-Запад»). В результате получены сглаженные кривые импеданса, фазы импеданса в диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 с и более, которые использованы для качественного анализа и решения обратной задачи данных МТЗ. Точность определения модулей магнитотеллурических параметров составляет первые проценты, фаз импеданса — первые градусы.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МТЗ

Для определения методики интерпретации МТЗ необходимо оценить характер и степень геоэлектрической неоднородности среды. Для этого выполнен анализ полярных диаграмм импеданса (Бердичевский, Дмитриев, 2009), параметра неоднородности (Varh, 1988) и параметра асимметрии (Swift, 1967). Параметр неоднородности

имеет значения в первые десятые доли на коротких периодах. На длинных периодах указанный параметр возрастает, что связано с влиянием крупных структур. Полярные диаграммы импеданса и параметр асимметрии свидетельствуют о том, что на длинных периодах вариаций магнитотеллурического поля геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в виде квазидвумерных, что обусловлено влиянием вытянутых структурных зон (глубинных разломов). В основу интерпретации положены кривые, полученные в главных направлениях. Эти кривые будем называть продольными и поперечными, в соответствии с их направлением относительно основных тектонических структур полуострова Камчатка. Амплитудные и фазовые кривые характеризуются дисперсионными соотношениями, что дает возможность использовать их для совместной интерпретации. Некоторые продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса приведены на рис. 3.

Кривые МТЗ получены в условиях горного рельефа на побережье Авачинского залива Тихого океана. Профиль находится на расстоянии ~30 км от береговой черты. Поэтому важно определить в какой мере полученные продольные и поперечные кривые МТЗ могут быть подвержены влиянию рельефа и берегового эффекта (Мороз, Мороз, 2011; Бердичевский, Дмитриев, 2009). Важно отметить, что профиль проходит не через вершины Корякского и Авачинского вулканов, а между ними на высоте до 2 км. Анализ полученных данных свидетельствует, что влияние рельефа проявляется в диапазоне 0.0001–0.0025 с. В большей мере оно выражено вблизи вершин вулканических построек. При удалении от вулканов данное влияние практически отсутствует. Искажение кривых в указанном диапазоне имеет весьма сложный вид и пока не находит физического объяснения. Эти высокочастотные искажения с понижением частоты исчезают и их можно не учитывать. Поэтому в основу интерпретации приняты кривые в диапазоне периодов 0.0025–1000 с.

Береговой эффект также как и влияние рельефа изучен с помощью трехмерного численного моделирования магнитотеллурического поля, для чего использована модель параметры которой описаны в работе (Мороз, Мороз, 2011). В ней мощность и удельное электрическое сопротивление осадочно-вулканогенного чехла на суше приняты постоянными. Это дает возможность оценить влияние берегового эффекта, независимо от влияния вулканов и геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенного чехла. Для исследуемой площади геоэлектрические параметры верхнего слоя на

ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

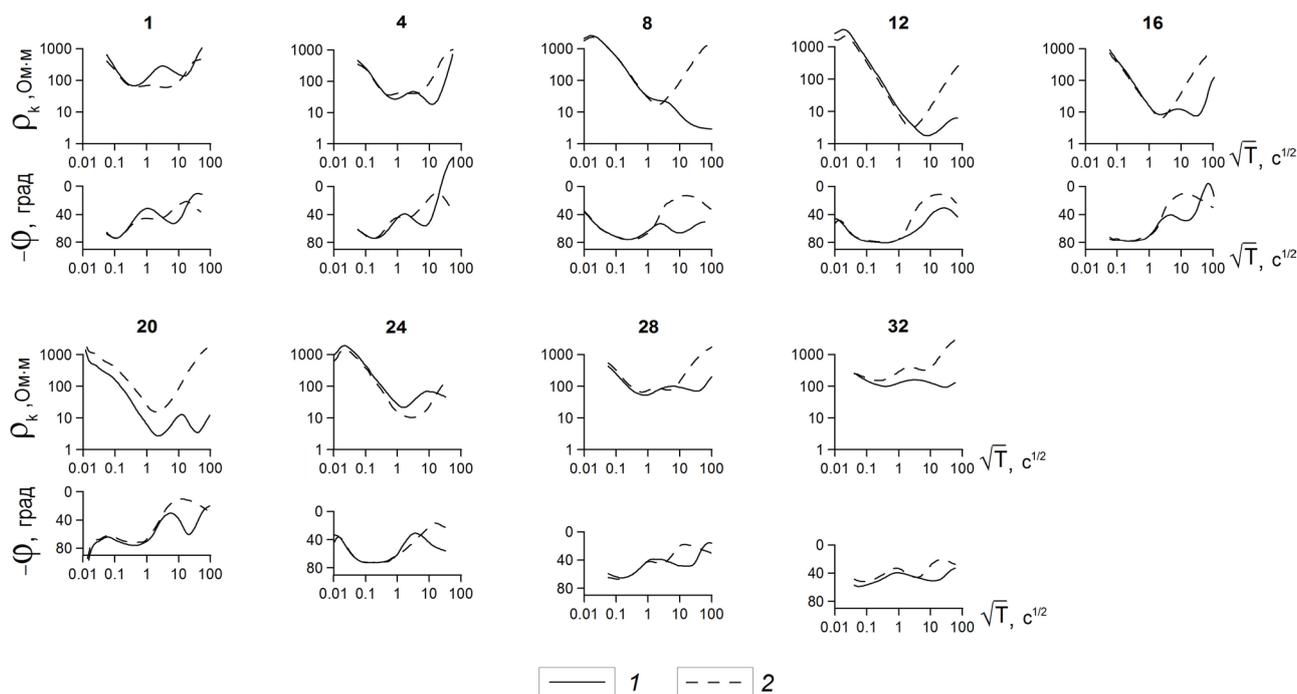


Рис. 3. Совмещенные продольные и поперечные кривые МТЗ на некоторых пунктах: 1 и 2 — продольные и поперечные кривые МТЗ. Цифрами над кривыми обозначены номера пунктов, показанных на рис. 2.

Fig. 3. Combined longitudinal and transverse MTS curves on some observation points: 1 and 2 — longitudinal and transverse MTS curves. The numbers above the graphs denote the numbers of observation points shown in Fig. 2.

суше приняты осредненные значения из работы (Мороз, Нурмухамедов, 1998). Мощность осадочно-вулканогенного чехла составляет 3 км с удельное электрическое сопротивление 20 Ом·м. Удельное электрическое сопротивление морской воды принято 0.25 Ом·м. Глубинные геоэлектрические разрезы континента и дна океана приняты из работы (Ваньян, 1997) для теплового потока изучаемой территории в 60 мВт/м² и возраста дна омывающих морей и океана в 40 млн лет (Геология ..., 1964; Смирнов, 1980).

В результате моделирования по программе Макки (Maskie, 1994) рассчитаны продольная, поперечная и локально-нормальная кривые МТЗ по профилю (рис. 2). На рис. 4а в качестве примера приведены модельные кривые МТЗ рассчитанные в пунктах 1, 18 и 32. На рисунке показано, что амплитудные модельные продольные и поперечные кривые практически совпадают с локально-нормальной кривой до периода 100 с. С увеличением периода отмечаются отклонения амплитудных продольной и поперечной кривых от локально-нормальной кривой. Отклонение поперечной кривой от локально-нормальной на периодах 400–900 с составляет первые десятки процентов. Отклонение продольной кривой от локально-нормальной кривой на указанных периодах составляет 10–25%. При этом отклонение до 25% отмечается на первом пункте, приближенном к Авачинской бухте (губе). Таким образом можно полагать, что продольные кривые

МТЗ до периода 900 с слабее затронуты береговым эффектом и характеризуют распределение электропроводности с глубиной. С увеличением периода вариаций проявляется действие регионального берегового эффекта. На периодах более 6000 с эффект является трехмерным за счет сложной конфигурации полуострова и влияния Алеутской островной дуги (Мороз, Мороз, 2011). Он выражен отклонением продольной кривой от локально-нормальной кривой в низкочастотной области в область высоких сопротивлений.

По полученным продольным кривым МТЗ и результатам ранее выполненных работ (Мороз, 1991; Мороз, Нурмухамедов, 1998; Мороз и др., 1995) установлено, что литосфера содержит слой повышенной электропроводности на глубинах ~20–35 км с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом·м. Исходя из этого, также выполнены расчеты в пробной модели, содержащей литосферный слой повышенной электропроводности (рис. 4б). В первоначальную модель со стандартным распределением глубинной электропроводности введен литосферный проводящий слой, верхняя граница которого располагается на глубине 25 км. Мощность слоя 20 км, удельное электрическое сопротивление 20 Ом·м. Продольная и локально-нормальная амплитудные кривые являются близкими на периодах до 900 с. Поперечная и локально-нормальная амплитудные кривые согласуются только на периодах до 100 с. В низкочастотном

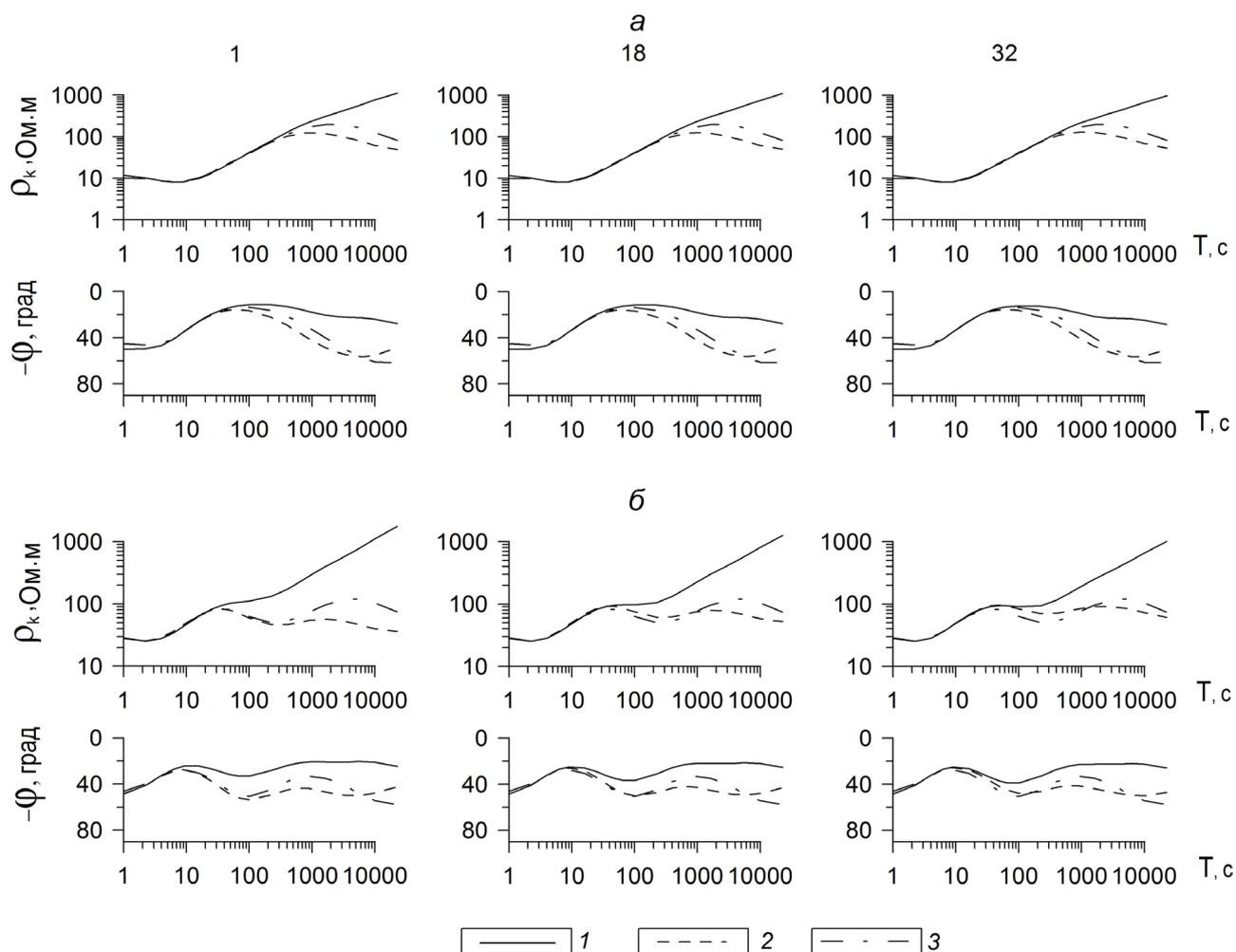


Рис. 4. Модельные кривые МТЗ, характеризующие влияние берегового эффекта в пунктах наблюдений: *a* — кривые кажущегося электрического сопротивления и фазы импеданса в пробных моделях, со стандартным распределением глубинной электропроводности и *б* — в модели с литосферным проводящим слоем. 1, 2 и 3 — поперечная, продольная и локально-нормальная кривые МТЗ. Цифрами над кривыми обозначены номера пунктов, показанных на рис. 2.

Fig. 4. Model MTS curves, characterizing coast effect at observation points: *a* — the curves of apparent electrical resistance and impedance phase in test models, with a standard distribution of the deep electrical conductivity and *б* — in the model with a lithospheric conductive layer. 1, 2 and 3 — transverse, longitudinal and locally normal MTS curves. The numbers above the graphs indicate the numbers of observation points shown in Fig. 2.

диапазоне поперечная кривая отклоняется от локально-нормальной кривой в сторону высоких сопротивлений из-за влияния трехмерного берегового эффекта (Мороз, Мороз, 2011).

Анализ магнитотеллурических данных и результаты изучения пробных моделей свидетельствуют, что продольные кривые МТЗ обладают повышенной разрешающей способностью к наличию проводящих зон в земной коре и верхней мантии по сравнению с поперечными кривыми. Поэтому продольные кривые приняты в качестве основных для изучения электропроводности литосферы. Поперечные кривые использованы совместно с продольными до периода 100 с при выявлении геоэлектрических неоднородностей в осадочно-вулканогенной толще.

КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ МТЗ

Качественный анализ МТЗ выполнен по семействам продольных (рис. 5а) и поперечных (рис. 5б) кривых кажущегося сопротивления и фаз импеданса. Семейства включают кривые, близкие по форме, то есть характеризующие примерно одинаковый тип геоэлектрического разреза. На профиле выделено шесть (I–VI) таких семейств (рис. 2). Характерно, что как продольные, так и поперечные кривые кажущегося сопротивления в большинстве семейств заметно расходятся по уровню сопротивления при сохранении их формы. Это расхождение достигает в ряде семейств почти порядка. Однако фазовые значения импеданса в ограниченных

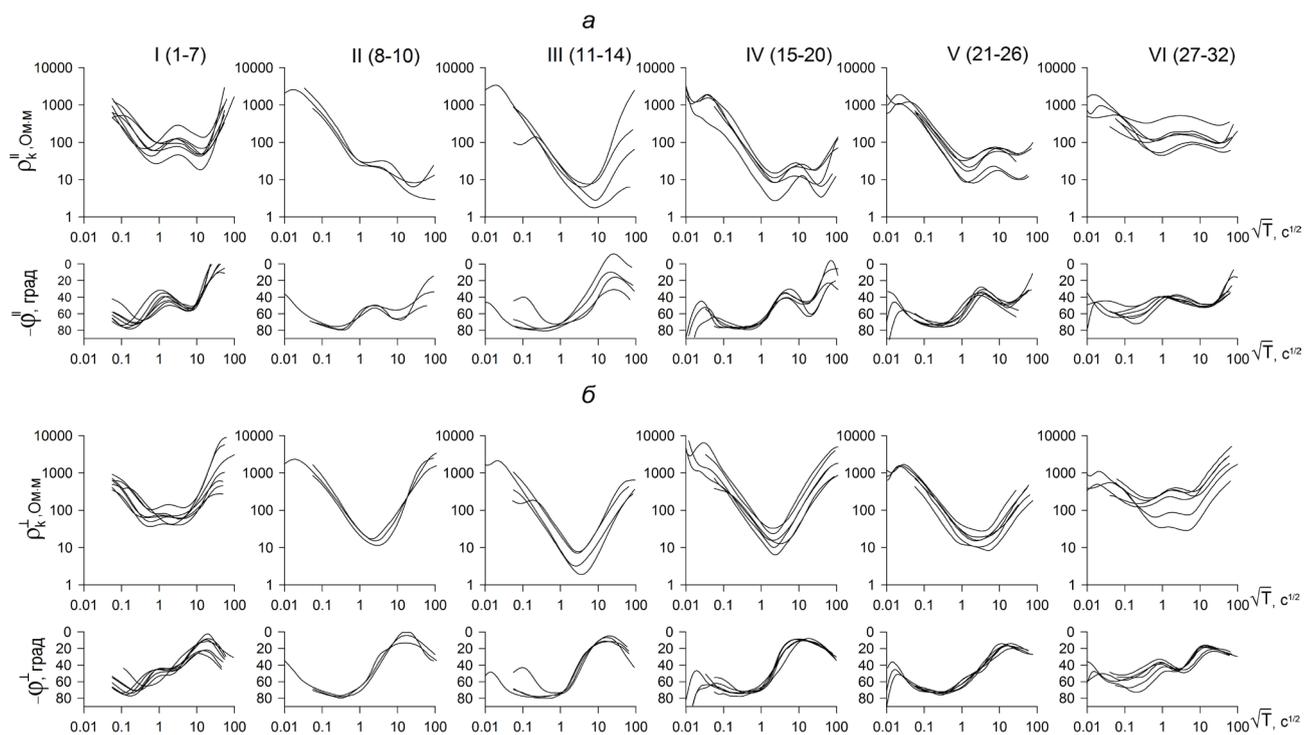


Рис. 5. Семейства экспериментальных продольных (а) и поперечных (б) кривых МТЗ. Римской цифрой над графиками указан номер группы, в скобках арабскими цифрами показаны номера кривых, входящих в группу.

Fig. 5. The families of experimental longitudinal (а) and transverse (б) MTS curves. The Roman numeral above the graphs denotes the family number, the Arabic numerals in brackets show the numbers of the curves included in the family.

частотных диапазонах расходятся лишь в рамках допустимой погрешности аппаратуры. Это свидетельствует, что продольные и поперечные амплитудные кривые подвержены влиянию локальных геоэлектрических неоднородностей (эффект «р»). Погашение влияния этого эффекта произведено при решении обратной задачи.

Семейства продольных и поперечных кривых отличаются в большинстве случаев по форме, что указывает на сильную геоэлектрическую неоднородность геологической среды. Особенно это характерно для семейств с II по V. Рассмотрим особенности форм кривых в семействах.

Кривые первого семейства (пункты МТЗ с 1 по 7) относятся к типу НКН (Хмелевской, 1984). На продольных кривых в левой части выражен минимум кажущегося электрического сопротивления, связываемый с осадочно-вулканогенным чехлом. За минимумом следует максимум, обусловленный высокоомной частью земной коры. В правой части кривых проявился минимум, отражающий, по-видимому, наличие глубинного проводящего слоя. Поперечные кривые по форме также можно отнести к типу НКН. Однако на них слабо выражен максимум, характеризующий высокоомную толщу в земной коре. Это можно объяснить тем, что продольные кривые обладают повышенной разрешающей

способностью к поперечному сопротивлению высокоомной коровой зоны. Следует отметить, что продольные амплитудные кривые имеют более крутые низкочастотные восходящие ветви, что может быть связано с влиянием поперечных структур. На поперечных кривых в низкочастотной области выражены также восходящие асимптотические ветви. Они начинают проявляться на более ранних периодах (50–60 с), чем на продольных кривых. Данная особенность поперечных кривых хорошо выражена и в других семействах кривых в связи с влиянием берегового эффекта.

Второе семейство (пункты МТЗ с 8 по 10) кривых также относится к типу НКН. В этом семействе, в отличие от первого семейства, на продольных кривых отмечается уменьшение сопротивления с понижением частоты в виде нисходящего тренда. На таком фоне выражен минимум в левой части кривых, затем также максимум и минимум в правой части графиков, которые соответственно связываются с осадочно-вулканогенным чехлом, высокоомной толщей литосферы и проводящим слоем в земной коре. Поперечные кривые в данном семействе, как и в последующих семействах III–V, относятся к типу Н (Хмелевской, 1984). Амплитудные кривые кажущегося сопротивления, как и фазовые

кривые импеданса, практически совпадают. Минимум на амплитудных кривых выражен на периодах 15–25 с. Восходящая асимптотическая ветвь обусловлена влиянием высокоомного слоя, подстилающего осадочно-вулканогенный чехол, и действием берегового эффекта на периодах примерно более 100 с.

Третье семейство продольных и поперечных кривых кажущегося электрического сопротивления (пункты МТЗ с 11 по 14) имеет в обобщенном виде тип близкий к Н. Минимумы на кривых характеризуются пониженным электрическим сопротивлением от первых единиц до 10 Ом·м, что связано с увеличенной проводимостью осадочно-вулканогенной толщи. Данная проводящая неоднородность в сильной мере экранирует магнитотеллурическое поле. По-видимому, по этой причине на продольных амплитудных кривых не проявился максимум, характеризующий высокоомный коровый слой, выраженный только на кривых фаз импеданса, так как они обладают повышенной чувствительностью к глубинным частям разреза и максимум на них проявился раньше. Поперечные кривые (продольные по отношению к Авачинскому грабену) имеют более «узкий» минимум, обусловленный небольшой шириной структуры (первые км). Восходящие асимптотические ветви в низкочастотном диапазоне также связаны с высокоомным слоем и влиянием берегового эффекта.

Четвертое семейство продольных кривых (пункты МТЗ с 15 по 20) относится к типу НКН. Оно по форме кривых является близким к семейству I. Однако кривые семейства IV характеризуются более низкими значениями кажущегося электрического сопротивления, отражающего проводящий осадочно-вулканогенный чехол, толщу высокоомной земной коры и глубинную проводящую зону.

Пятое семейство кривых кажущегося электрического сопротивления (пункты МТЗ с 21 по 26) имеют вид НКН. Они характеризуются увеличением значений ρ_k в области минимума, максимума и минимума, связываемых, соответственно, с проводящим осадочно-вулканогенным чехлом, высокоомной толщей земной коры и глубинной проводящей зоной. Наряду с этим следует отметить увеличение диапазона периодов, в котором проявляется высокоомный слой, что свидетельствует о существенном увеличении мощности высокоомного слоя литосферы и увеличении глубины проводящего коро-мантийного слоя. Поперечные амплитудные кривые в данном семействе имеют в общем виде тип Н. Они от подобных кривых II, III зон отличаются более выположенным минимумом в расширенном диапазоне периодов.

Шестое семейство кривых кажущегося сопротивления (пункты МТЗ с 27 по 32) имеют такой же вид, как и в семействе V. Отличительной особенностью является увеличение кажущегося сопротивления почти на порядок в средней и правой частях кривых. Также следует отметить более пологий максимум в расширенном диапазоне периодов от 5 до 100 с, указывающий на увеличение мощности высокоомного слоя и глубины погружения проводящей глубинной зоны по сравнению с V семейством. Характерно, что на поперечных кривых в этой части профиля проявляется высокоомный литосферный слой, который не был выражен на поперечных кривых в семействах II и V.

Качественное представление об основных особенностях в распределении геоэлектрических неоднородностей в зависимости от периода вариаций дают пространственно-временные разрезы кажущегося электрического сопротивления и фаз импеданса. Как мы уже отмечали, кривые кажущегося электрического сопротивления подвержены влиянию ρ -эффекта. Поэтому псевдоразрезы ρ_k осложнены этим влиянием. Фазовые кривые импеданса свободны от таких искажений, и они в лучшей мере отражают наличие зон повышенной и пониженной электропроводности. Так как продольные кривые МТЗ в меньшей мере затронуты береговым эффектом, то по ним можно судить о структуре электропроводности в изучаемом диапазоне частот. Обратимся к псевдоразрезу по продольным кривым фазы импеданса (рис. 6а). В ее поведении выражены зоны пониженных значений фазы импеданса, которые отражают проводящие структуры. В коротко-периодном диапазоне ($-\log T = 3-0$) проявился осадочно-вулканогенный слой повышенной электропроводности, который характеризуется значениями фазы (от -70 до -80°). В низкочастотном диапазоне ($-\log T = -1-4$) аномалии повышенной электропроводности выражены значениями фазы (от -40 до -60°).

На псевдоразрезе поперечной фазы импеданса (рис. 6б) хорошо выражен слой со значениями фазы от -70 до -80° в диапазоне периодов ($-\log T = 0-2$). Он связывается с влиянием проводящей осадочно-вулканогенной толщи. В низкочастотном диапазоне фаза импеданса отражает влияние берегового эффекта.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МТЗ

Выполненный анализ показал, что продольные кривые практически не искажены береговым эффектом в изучаемом диапазоне периодов. Они по формальным признакам

ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

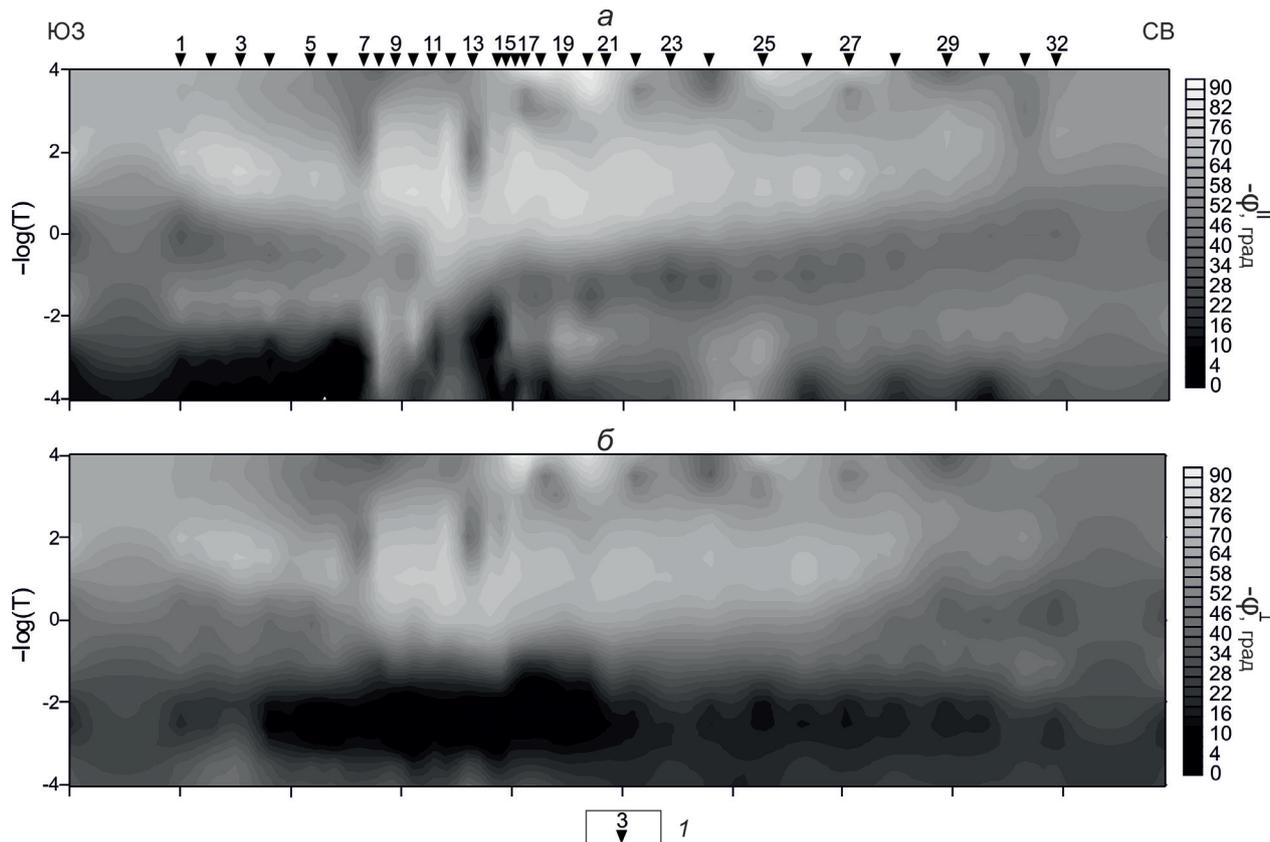


Рис. 6. Псевдоразрезы продольной (а) и поперечной (б) фаз импеданса: 1 — пункт МТЗ и его номер.

Fig. 6. Pseudodepth plots of the longitudinal (a) and transverse (b) impedance phases: 1 — observation point of MTS and its number.

более информативны. На кривых проявился минимум, связанный с осадочно-вулканогенным чехлом, на большинстве кривых выражены максимумы, отражающие высокоомный слой в литосфере и минимумы в низкочастотной области, обусловленные глубинными проводящими зонами. Поперечные кривые подвержены влиянию берегового эффекта и в меньшей мере пригодны для изучения глубинной электропроводности. Поэтому для изучения глубинного геоэлектрического разреза, в качестве основных, приняты продольные кривые. Поперечные кривые в диапазоне периодов, в котором не проявился береговой эффект, использованы в качестве дополнительных для выделения совместно с продольными кривыми геоэлектрических неоднородностей. Следует отметить, что продольные кривые ориентированы примерно вдоль побережья Авачинского залива (рис. 1). Этим профилем пересечена поперечная структура — Авачинский грабен. Поэтому инверсия кривых выполнена с использованием ТМ-моды (Бердичевский, Дмитриев, 2009) по программе (Rodi, Mackie, 2001). Стартовая модель принята по данным интерпретации индивидуальных кривых МТЗ в рамках одномерной модели с учетом априор-

ной геолого-геофизической информации. При моделировании предусматривалось погашение р-эффекта путем увеличения веса фазовых кривых, так и статической нормализацией. В результате расчетов на большинстве пунктов достигнута удовлетворительная сходимость модельных и практических данных МТЗ (рис. 7). По данным инверсии кривых МТЗ представлены геоэлектрические разрезы до глубин 10 (приповерхностная часть разреза) и 60 км, который отражает глубинную часть земной коры. Над разрезами изображены графики поля силы тяжести и геомагнитного поля.

Рассмотрим геоэлектрический разрез земной коры до глубины 10 км (рис. 8). Верхняя часть осадочного чехла земной коры является высокоомной с удельным электрическим сопротивлением в первые тысячи — сотни Ом·м, мощностью в первые сотни метров. Она представлена преимущественно вулканогенными породами. В разрезе хорошо выражен осадочно-вулканогенный слой с пониженным удельным электрическим сопротивлением до 5–10 Ом·м на глубинах от первых сотен метров до 2–5 км. Мощность слоя в районе Авачинско-Корякской группы вулканов составляет около 2 км. В этом слое по данным (Балеста и др., 1989) выделяется

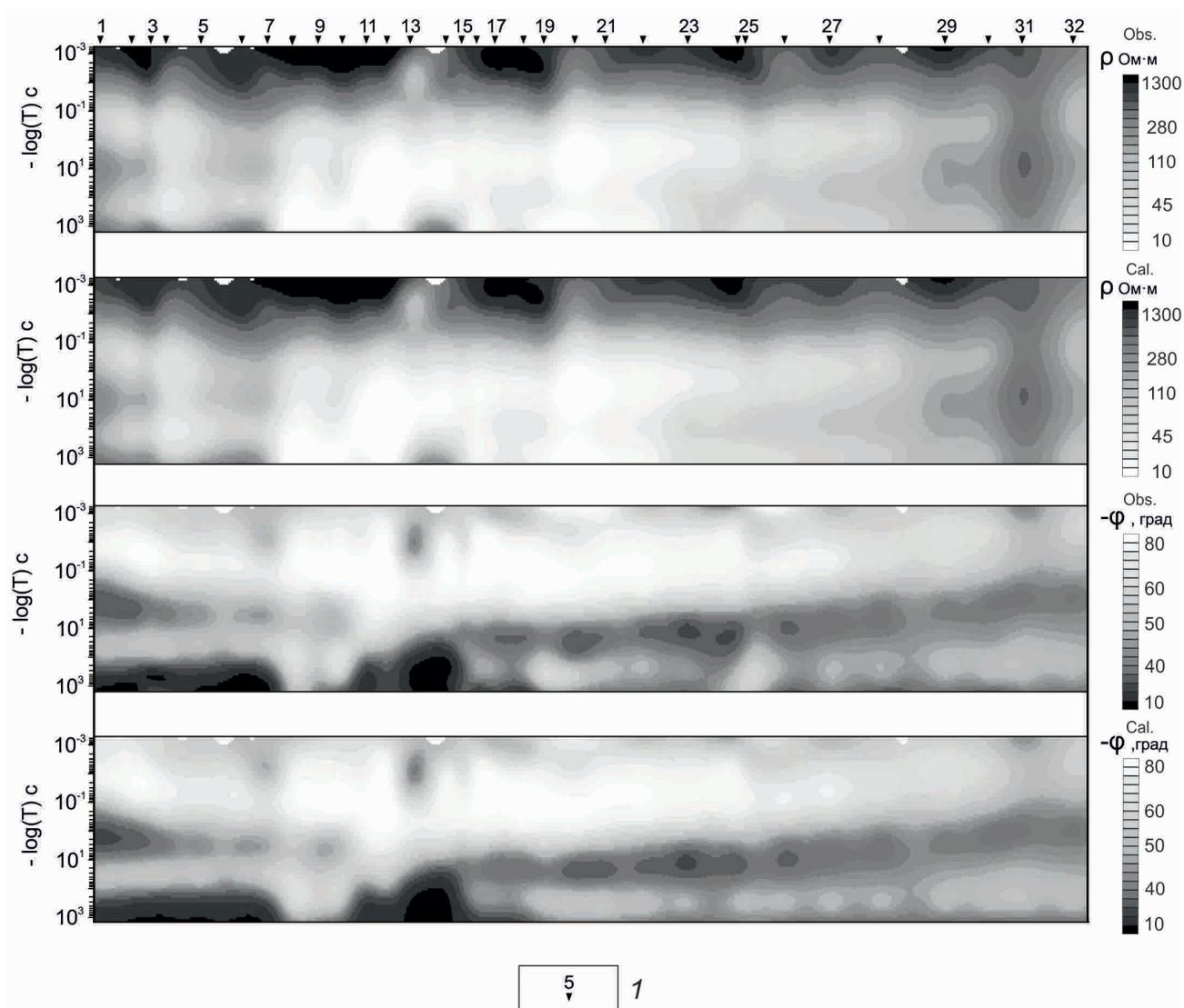


Рис. 7. Сопоставление псевдоразрезов по экспериментальным и модельным данным: *1* — пункт МТЗ и его номер.

Fig. 7. Comparison of pseudodepth plots using experimental and model data: *1* — observation point of MTS and its number.

зона затухания сейсмических волн, которая может быть связана с жидкими флюидами.

В районе пунктов МТЗ 11–13 мощность осадочно-вулканогенной толщи повышенной электропроводности возрастает до 5–8 км. В этой части профиля выражен Авачинский грабен, выявленный ранее по данным сейсмических и электромагнитных исследований (Мороз, Гонтовая, 2003). Он выполнен толщей низкоскоростных и проводящих осадочно-вулканогенных отложений мощностью до 5 км. Повышенная электропроводность и пониженная сейсмическая скорость отложений в нижних частях грабена связывается с наличием жидких флюидов. Следует отметить, что в районе СВ борта грабена отмечается большое число экструзий (Заварицкий, 1977). Наличие в разрезе магматических пород основного состава находит отражение в

виде аномалии повышенной интенсивности в магнитном поле (рис. 8).

Рассмотрим разрез до глубины 60 км, приведенный на рис. 9. В западной части профиля (пункты МТЗ 1–7) на глубинах 15–25 км проявился слой Г (рис. 9) повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением ~10 Ом·м. Это согласуется с полученными ранее результатами (Мороз, Гонтовая, 2003; Мороз и др., 1995). Данный слой и аномалия Б (рис. 9) повышенной электропроводности Авачинского грабена сопряжены с указанной крупной субвертикальной зоной А (рис. 9) пониженного удельного электрического сопротивления от первых единиц до 10 Ом·м (пункты МТЗ 8–10), достигающей глубины примерно 30 км. В районе пунктов МТЗ 14–22 также выражена субвертикальная проводящая аномальная зона В (рис. 9)

ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

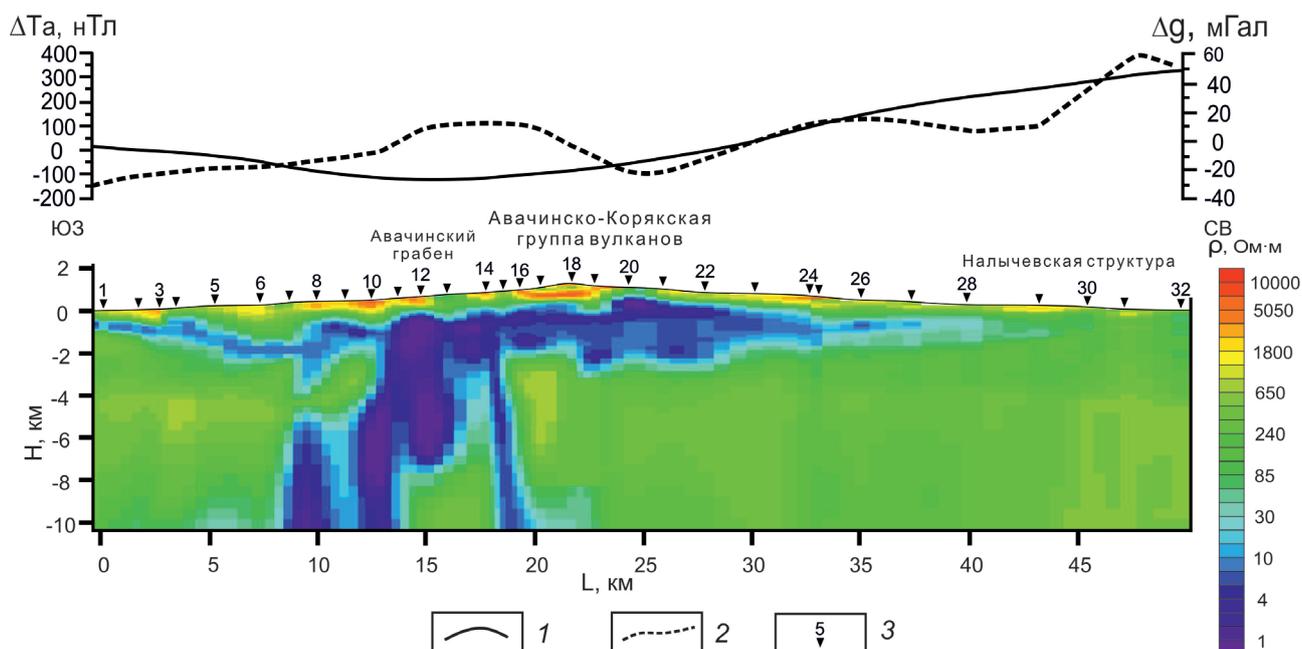


Рис. 8. Геоэлектрический разрез земной коры до глубины 10 км: 1 — график поля силы тяжести в редукции Буге; 2 — график локального аномального магнитного поля; 3 — пункт МТЗ и его номер.

Fig. 8. Geoelectric section of the earth's crust to the depth of 10 km: 1 — graph of the gravity field in the Bouguer reduction; 2 — local anomalous magnetic field graph; 3 — observation point of MTS and its number.

от подошвы осадочно-вулканогенного чехла до глубины примерно 40 км. Удельное электрическое сопротивление пород в пределах зоны — от первых единиц до 10 Ом·м. Данная зона по узкому проводящему каналу соединяется с осадочно-вулканогенным чехлом. Глубинные проводящие зоны приводят к разуплотнению земной коры, что выражено пониженной интенсивностью гравитационного поля на графике.

Следует отметить, что существование высокоомной зоны (под Авачинским грабеном) требует в дальнейшем уточнения с использованием более низкочастотных магнитотеллурических зондирований. Это обусловлено тем, что здесь на кривых МТЗ не выражена глубинная часть разреза из-за высокой проводимости осадочно-вулканогенной толщи в грабене. Также следует отметить искажение низкочастотных восходящих ветвей кривых МТЗ за счет резких крутых границ (разломов), ограничивающих грабен, установленных по данным сейсморазведки (Мороз, Гонтовая, 2003).

Земная кора юго-восточной части профиля (пункты МТЗ 27–32) характеризуется повышенным удельным электрическим сопротивлением в первые сотни Ом·м. Здесь в геомагнитном поле отмечается положительная аномалия интенсивностью в первые сотни нТл (рис. 9). Природа аномалии связывается нами с наличием магматических пород основного и ультраосновного состава в районе Налычевской структуры Н (рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Известно, что удельное электрическое сопротивление кристаллических пород литосферы составляет сотни — тысячи Ом·м (Пархоменко, Бондаренко, 1997). Появление в этих породах пористости в первые десятые доли процентов, содержащих гидротермальные растворы в гальванически связанном состоянии, понизит удельное электрическое сопротивление пород до единиц — первых десятков Ом·м (Лебедев, 1975). Для оценки их содержания можно использовать выражение, предложенное Ваньяном (на основе формулы Арчи):

$$\rho = \rho_{\phi} / (2/3)K,$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление проводящей зоны,

ρ_{ϕ} — удельное электрическое сопротивление корового флюида,

K — пористость.

Согласно (Ваньян, 1997; Ваньян, Хайдман, 1996), примем удельное электрическое сопротивление гидротермальных растворов в земной коре равным 0.01 Ом·м. Из формулы следует, что при удельном электрическом сопротивлении 5–10 Ом·м пористость будет 0.12–0.06% при полной связанности пор.

В районе Авачинско-Корякской группы вулканов земная кора, по нашему мнению, содержит магматические расплавы, которые могут быть выражены аномалиями повышенной электро-

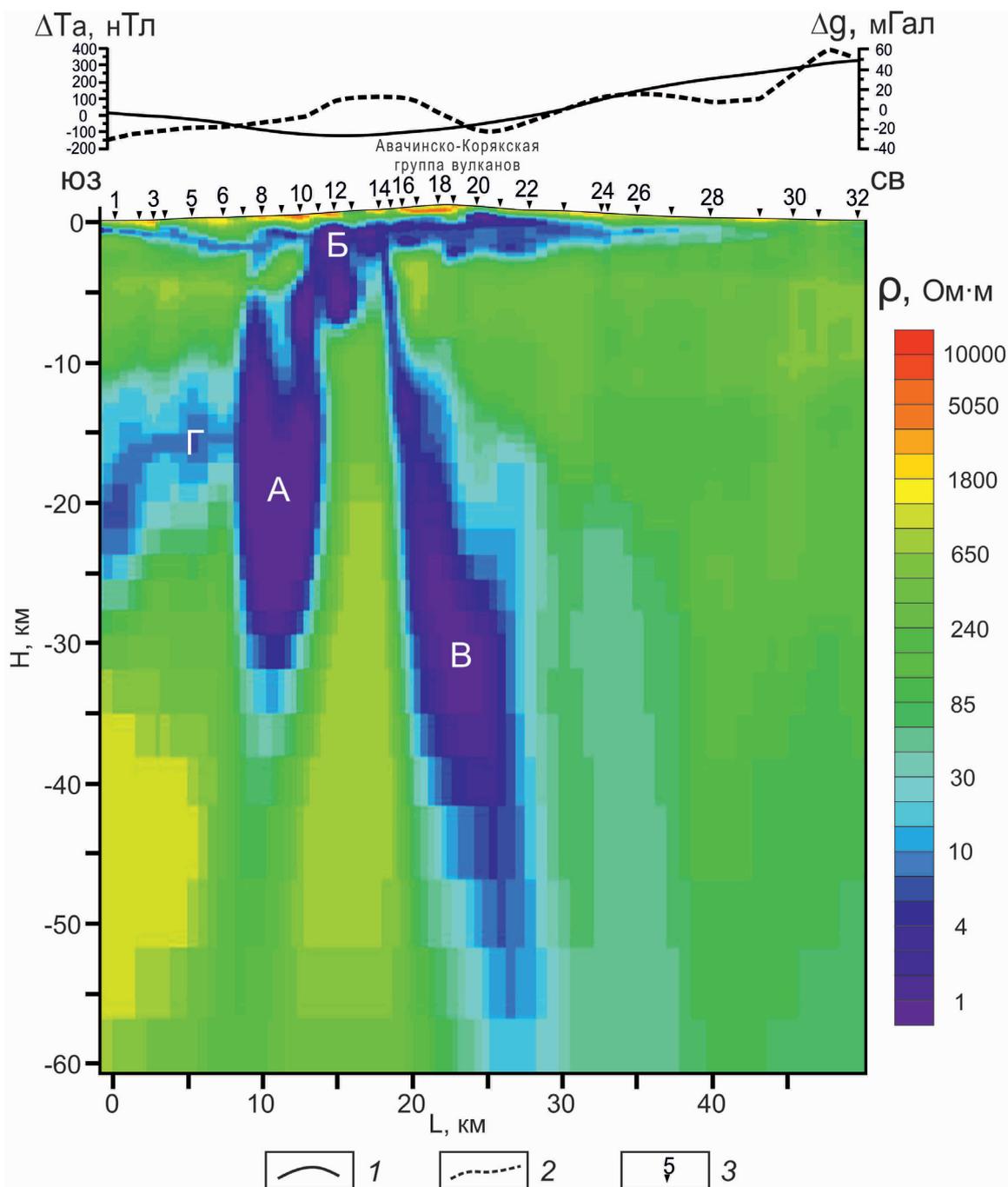


Рис. 9. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии до глубины 60 км: 1 — график поля силы тяжести в редукции Буге; 2 — график локального аномального магнитного поля; 3 — пункт МТЗ и его номер. Буквами А, Б, В, Г обозначены выявленные аномальные зоны повышенной электропроводности.

Fig. 9. Geoelectric section of the earth's crust and upper mantle to the depth of 60 km: 1 — graph of the gravity field in the Bouguer reduction; 2 — local anomalous magnetic field graph; 3 — observation point of MTS and its number. Letters A, B, B, Г denote the identified anomalous zones of the increased electrical conductivity.

проводности. Для оценки пористости пород в этом случае 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 поверхности, удельное электрическое сопротивление в большинстве случаев оценивается в первые десятки — единицы Ом·м (Адамчук, Трубников, 1977; Frishticht, 1967; Keller, Rapolla, 1974; Murase et al., 1973). 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 сопротивление расплава, содержащего воду, приближенно в 0.1 Ом·м. Следовательно, согласно вышеприведенной формуле при удельном электрическом сопротивлении проводящей зоны 5–10 Ом·м, пористость пород может быть в пределах 1.2–0.6% при полной связанности пор.

Рассмотрим с этих позиций возможную природу выявленных нами проводящих зон. В юго-западной части профиля в земной коре на глубинах 20–30 км выражен проводящий слой, который является продолжением регионального корового слоя, развитого на значительной части Камчатки (Мороз, 1991). Природа слоя связывается с наличием гидротермальных растворов. Пористость пород в проводящей зоне можно оценить с помощью формулы Арчи (Archie, 1942). Оценки показывают, что при удельном электрическом сопротивлении 10 Ом·м пористость будет 0.06%.

Данная субгоризонтальная зона (пункты МТЗ 7–12) сопряжена с субвертикальной проводящей зоной (пункты МТЗ 14–22), имеющей продолжение в мантию. Первая субвертикальная зона, скорее всего, отражает глубинный разлом, содержащий жидкие флюиды в виде гидротермальных растворов и магматических расплавов. Частичное плавление пород в зоне разлома можно объяснить поступлением растворов из субгоризонтальной зоны, которые существенно понижают температуру плавления пород земной коры. Пористость пород в зоне разлома в случае присутствия магматических расплавов составляет 1.2–0.6%.

Природа второй субвертикальной зоны повышенной электропроводности в земной коре — верхней мантии (пункты МТЗ 14–22) также может быть связана с магматическими расплавами. Зона имеет продолжение в верхнюю мантию. Она, по-видимому, также отражает глубинный разлом, проникающий до астеносферного слоя. Магматические расплавы из верхней мантии по разлому проникают в земную кору, где под вулканами формируется магматический очаг. Пористость пород при удельном электрическом сопротивлении пород в проводящей зоне 8 Ом·м будет ~1%. Это оценка пористости при гальванически связанном состоянии расплава. Однако, все проведенные оценки пористости, выполненные на основе электрических параметров, могут давать заниженное значение, так как при расчетах не учитывался закрытые (гальванически не связанные) каналы. Проводящая зона по узкому каналу соединена с осадочно-вулканогенным чехлом, по которому магматические расплавы проникают в него и распространяются под Авачинско-Корякской группой вулканов и в

отдельных ослабленных структурах (трещинах, разломах) проникают на поверхность.

Следует отметить, что важную роль в миграции флюидов под Авачинско-Корякской группой вулканов играет осадочно-вулканогенная толща с повышенной пористостью пород. В этой толще выделяется ряд аномалий повышенной электропроводности, которые могут быть связаны с жидкими флюидами, представляющими интерес на поиски геотермального месторождения. Глубина залегания аномалий — в первые км. Наибольший интерес, на данной территории, по нашему мнению, представляет Авачинский грабен, содержащий мощную толщу пористых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены методика интерпретации и результаты магнитотеллурических зондирований. Геоэлектрический разрез изучен в диапазоне периодов 0.0001–1000 с и более с использованием магнитотеллурических станций «Phoenix Geophysics Ltd» MTU-5A. Впервые с использованием малогабаритных переносных станций удалось осуществить зондирование Авачинско-Корякской группы вулканов и получить информацию о распределении электропроводности под ними. Выполнен анализ магнитотеллурических параметров. С помощью пробных моделей изучен береговой эффект и влияние рельефа на поведение кривых МТЗ. В основу интерпретации положены кривые МТЗ, ориентированные по главным направлениям, отвечающим простиранию и вкрест простирания основных структурных зон. Продольные кривые МТЗ в меньшей мере затронуты влиянием берегового эффекта. Они, как и поперечные кривые, подвержены действию ρ -эффекта, который учитывался при решении обратной задачи. Глубинный геоэлектрический разрез получен в результате инверсии продольных кривых МТЗ в рамках ТН-моды. Поперечные кривые использованы в диапазоне периодов, на которых нет значительного влияния берегового эффекта, для уточнения структуры электропроводности верхних частей разреза.

Полученная геоэлектрическая модель представлена до глубины 60 км. На ней, под Авачинско-Корякской группой вулканов, хорошо выражен осадочно-вулканогенный слой с пониженным удельным электрическим сопротивлением до 5–10 Ом·м на глубинах от первых сотен метров до 2–5 км. Максимальная его мощность отмечается в Авачинском грабене, расположенном к западу от вулканических сооружений Авачинского и Корякского вулканов. По данным электропроводности

пористость пород, содержащих минерализованные растворы, по приближенным оценкам может быть около первых сотых долей процента. В юго-западной части профиля на глубинах 15–25 км выражен слой повышенной электропроводности, сопряженный с субвертикальной проводящей глубинной зоной. Глубинная часть модели содержит субвертикальные проводящие зоны с удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до 10 Ом·м. Аномальная зона повышенной электропроводности (пункты МТЗ 7–11), сопряжена в верхней части с Авачинским грабеном. Она распространяется до глубины примерно 30 км. Вторая аномальная зона повышенной электропроводности выделяется на глубинах от 10 до 40 км с удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до 10 Ом·м. Она по узкому проводящему каналу соединена с осадочно-вулканогенным чехлом.

Выявленные субвертикальные зоны повышенной электропроводности связаны, по нашему мнению, с глубинными разломами северо-западного простирания. По данным электропроводности пористость пород в разломах по приближенным оценкам составляет примерно 0,6–1%. С учетом тупиковых и закрытых каналов пористость может быть больше. Выявленные разломы являются составной частью Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций, имеющей значительную протяженность и пересекающей южную часть Камчатки от Авачинского залива до Охотского моря (Карта ..., 1999).

Проводящие глубинные разломы, по-видимому, содержат жидкие флюиды в виде гидротермальных растворов и магматических расплавов. Частичное плавление пород в зоне разломов может быть связано с поступлениями растворов из корового слоя и просачиванием вадозных, которые существенно понижают температуру плавления пород литосферы. Жидкие флюиды из глубинных разломов проникают в осадочно-вулканогенный чехол.

Важная роль в геоэлектрической модели отводится осадочно-вулканогенной толще под Авачинско-Корякской группой вулканов. Она имеет повышенную пористость и служит каналом для миграции жидких флюидов, которые в зонах повышенной проницаемости проникают на дневную поверхность, формируя вулканы и экструзии. Осадочно-вулканогенная толща имеет увеличенную мощность до 5 и более км в Авачинском грабене, где возможно скопление высокоминерализованных термальных растворов, представляющих интерес на поиски геотермального месторождения. Авторы считают целесообразным здесь выполнить бурение поисковой скважины глубиной до 4 км, что даст

возможность судить о перспективности данного района.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-05-00059а и ДВО № 16-1-1-012э, № 15-1-2-008.

Список литературы [Referencis]

- 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. [Adamchuk Yu.V., Trubnikov B.A. Electrical conductivity of the current lava of the southern Novo-Tolbachinsky breakthrough // Institute of Atomic Energy named after I.V. Kurchatov: IAE-2841. M.: OSTI IAE, 1977. 8 p. (in Russian)].
- Балеста С.Т.* Результаты просвечивания вулканов Авачинско-Корякской группы // Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука. 1981. С. 75–79 [Balesta S.T. The results of translucence of the volcanoes Avachinsko-Koryakoy group // Earth's crust and magmatic chambers of areas of modern volcanism. M.: Nauka, 1981. P. 75–79 (in Russian)].
- Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Гринь М.Е., Сенюков С.Л.* Возможности сейсмического метода при изучении зон питания современных вулканов // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 43–53 [Balesta S.T., Gontovaya L.I., Grin M.E., Senyukov S.L. The possibilities of the seismic method in the study of the feeding zones of modern volcanoes // Volcanologia i Seismologia. 1989. № 6. P. 43–53 (in Russian)].
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 677 с. [Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. Models and methods of magnetotellurics. M.: Nauka, 2009. 677 p. (in Russian)].
- Ваньян Л.Л.* Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 214 с. [Vanyan L.L. Electromagnetic soundings. M.: Nauka, 1997. 214 p. (in Russian)].
- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д.* О природе электропроводности консолидированной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 5–11 [Vanyan L.L., Heidman R.D. About the nature of the electrical conductivity of the consolidated crust // Fizika Zemli. 1996. № 4. P. 5–11 (in Russian)].
- Геология СССР. Камчатка, Курильские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1964. 733 с. [Geology of the USSR. Kamchatka, Kuril Islands. Geological description. V. 31. M.: Nedra, 1964. 733 p. (in Russian)].
- Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. Т. 1. 300 с. [Active volcanoes of Kamchatka / Edited by S.A. Fedotov, Yu.P. Masurenkov. M.: Nauka, 1991. V. 1. 300 p. (in Russian)].

- Заварицкий А.Н.* Вулкан Авача на Камчатке. М.: Наука, 1977. 307 с. [*Zavariitsky A.N.* Avacha volcano in Kamchatka. M.: Nauka, 1984. 307 p. (in Russian)].
- Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81–94 [*Zubin M.I., Kozurev A.I.* Gravitational model of the structure of the Avacha volcano (Kamchatka) // *Volcanologia i Seismologia*. 1989. № 1. P. 81–94 (in Russian)].
- Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб 1 : 500000 / Под ред. Литвинова А.Ф., Патоки М.Г., Марковского Б.А. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. Л. XIII [Map of minerals of the Kamchatka region. Scale 1 : 500000 / Edited by Litvinova A.F., Patoka M.G., Markovskiy B.A. St. Petersburg: VSEGEI, 1999. S. XIII (in Russian)].
- Лебедев Е.Б.* Влияние воды на физические свойства магматических расплавов // Физико-химические проблемы гидротермальных магматических процессов. М.: Наука, 1975. С. 48–54 [*Lebedev E.B.* Effect of water on the physical properties magmatic melt // *Physico-chemical problems of hydrothermal magmatic processes*. M.: Nauka, 1975. P. 48–54 (in Russian)].
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с. [*Moroz Yu.F.* Electrical conductivity of the earth's crust and upper mantle of Kamchatka. M.: Nauka, 1991. 181 p. (in Russian)].
- Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И.* Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10 [*Moroz Yu.F., Gontovaya L.I.* The deep structure of the Avachinsko-Koryaksky volcanos group. Kamchatka // *Volcanologia i Seismologia*. 2003. № 4. P. 3–10 (in Russian)].
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–73 [*Moroz Yu.F., Moroz T.A.* Numerical 3D modeling of the magnetotelluric field in Kamchatka // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2011. V. 5. № 5. P. 138–146. <https://doi.org/10.1134/S1069351311010071>].
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г.* Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 77–84 [*Moroz Yu.F., Nurmukhamedov A.G.* Magnetotelluric sounding at the Petropavlovsk Geodynamic Test Site. Kamchatka // *Volcanologia i Seismologia*. 1999. V. 20. № 2. P. 141–149].
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лощинская Т.А.* Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 127–138 [*Moroz Yu.F., Nurmukhamedov A.G., Loschinskaya T.A.* Magnetotelluric Sounding of the Crust in South Kamchatka // *Volcanologia i Seismologia*. 1996. V. 17. № 4–5. P. 509–534].
- Пархоменко Э.И., Бондаренко Л.Т.* Электропроводность горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1972. 179 с. [*Parkhomenko E.I., Bondarenko L.T.* The conductivity of rocks at high pressures and temperatures. M.: Nauka, 1972. 179 p. (in Russian)].
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-камчатской и Алеутской провинциях // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 16–31 [*Smirnov Ya.B., Sugrobov V.M.* Earth heat flux in the Kurilo-Kamchatkoy and Aleutskoy provinces // *Volcanologia i Seismologia*. 1980. № 1. P. 16–31 (in Russian)].
- Хмельевской В.К.* Электроразведка. М.: МГУ, 1984. 422 с. [*Khmelevskoy V.K.* Electrical prospecting. M.: MSU, 1984. 422 p. (in Russian)].
- Archie G.E.* The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // *Transactions of the 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. <https://doi.org/10.1029/94RS00326>.
- Murase T., McBirney A.* 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. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84<3563:POSCIR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84<3563:POSCIR>2.0.CO;2).
- 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. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(78\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0031-9201(78)90004-3).
- Rodi W., Mackie R.L.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // *Geophysics*. 2001. V. 66. № 1. P. 174–187.
- Shankland T.I., Waff H.S.* Conductivity in fluid-bearing rocks // *Journal of Geophysical Research*. 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, MIT, Cambridge. 1967. 248 p.

МОРОЗ, ЛОГИНОВ
**DEEP GEOELECTRICAL MODEL
OF THE AVACHA-KORYAKSKY GROUP OF VOLCANOES, KAMCHATKA**

Yu. F. Moroz^{1,2}, V.A. Loginov¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS 683009, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

²*Geological Institute SB RAS 670047, Ulan-Ude, Russia*

The article presents the methods and results of the magnetotelluric sounding within the Avacha-Koryaksky group of volcanoes. Geoelectrical section was studied within the period range from 0.0001 to 1000 seconds and above. The authors performed a numerical two-dimensional modeling. Initially, we used test models for possible distortions of curves. The analysis of the magnetotelluric parameters allowed us to characterize the geoelectrical inhomogeneities. Curves along the strike and across the strike were used as main curves. Since longitudinal curves are less prone to coast effect, they were used with transverse curves in order to create a geoelectrical model based on a 2D magnetotelluric field numerical modeling. The created geoelectrical model has a conductive bed in the upper part of the section that is connected with an igneous-sedimentary cover. The deep part of the model includes near-vertical conductive zones, which denote a zone with deep faults. The paper describes possible nature of the revealed anomalies and provides rough estimation of rock porosity in the conductive zones.

Keywords: conductivity, magnetotelluric sounding, Avacha-Koryaksky group of volcanoes, Kamchatka.