

УДК 550.837

РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПО РЕГИОНАЛЬНОМУ ПРОФИЛЮ «ЮЖНЫЙ» (КАМЧАТКА)

© 2017 Ю.Ф. Мороз^{1,2}, О.М. Самойлова¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: olgasm415@mail.ru

²Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, 670047

Рассмотрены результаты интерпретации данных магнитотеллурического зондирования, полученных по региональному профилю, расположенному на юго-восточном побережье Камчатки. Обсуждается глубинная геоэлектрическая модель, построенная с помощью численного двумерного моделирования магнитотеллурического поля. Приводится характеристика выявленных аномалий и их возможной природы.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, глубинная геоэлектрическая модель, двумерная инверсия.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитотеллурические зондирования (МТЗ) по региональному профилю «Южный» протяженностью 209 км были выполнены в 2009 г. на восточном побережье Камчатки предприятиями ООО «Камчатгеология» (г. Петропавловск-Камчатский) и ООО «Северо-Запад» (г. Москва). Северо-восточная часть профиля расположена напротив Авачинской бухты, а юго-восточная — развернута к побережью Тихого океана (рис. 1). Полученный экспериментальный материал дает информацию о глубинной электропроводности вулканической зоны Южной Камчатки, где проявляется современный вулканизм и гидротермальная активность. В 2013 г. была опубликована работа (Мороз, Самойлова, 2013), в которой подробно рассматриваются результаты обработки и качественной интерпретации экспериментальных МТЗ по этому профилю. Анализ полевых кривых МТЗ и их сопоставление с модельными кривыми, для получения которых было выполнено численное трехмерное моделирование, показали, что на восточном побережье региона в низкочастотной области проявляется береговой эффект. Нами была проведена качественная интерпретация экспериментального материала с помощью дифференциальной трансформации

Ниблетта (Niblett, Sayn-Wittgensien, 1960). Она позволила получить первое представление о геоэлектрическом разрезе в районе исследований. С целью получения более полной и точной информации в данной работе проведена количественная интерпретация путем итерационного решения обратной задачи МТЗ с последовательной минимизацией расхождений между экспериментальными и модельными кривыми кажущегося сопротивления. В 2016 г. была опубликована работа (Мороз и др., 2016), в которой рассматривается двумерная геоэлектрическая модель для центральной части южной Камчатки. В статье (Белявский, Алексанова, 2014) была предложена трехмерная геоэлектрическая модель южной Камчатки, дающая обобщенные представления о глубинной электропроводности на юге полуострова. Т.к. южная часть региона характеризуется наличием зоны субдукции, то в связи с этим есть необходимость уточнить и скорректировать геоэлектрическую модель юго-восточного побережья региона для получения более детальной картины распределения электропроводности с глубиной в зоне перехода «океан-континент». Основываясь на том, что в низкочастотной области геоэлектрические неоднородности в районе профиля «Южный», в первом приближении имеют двумерную размерность, мы предприняли попытку провести

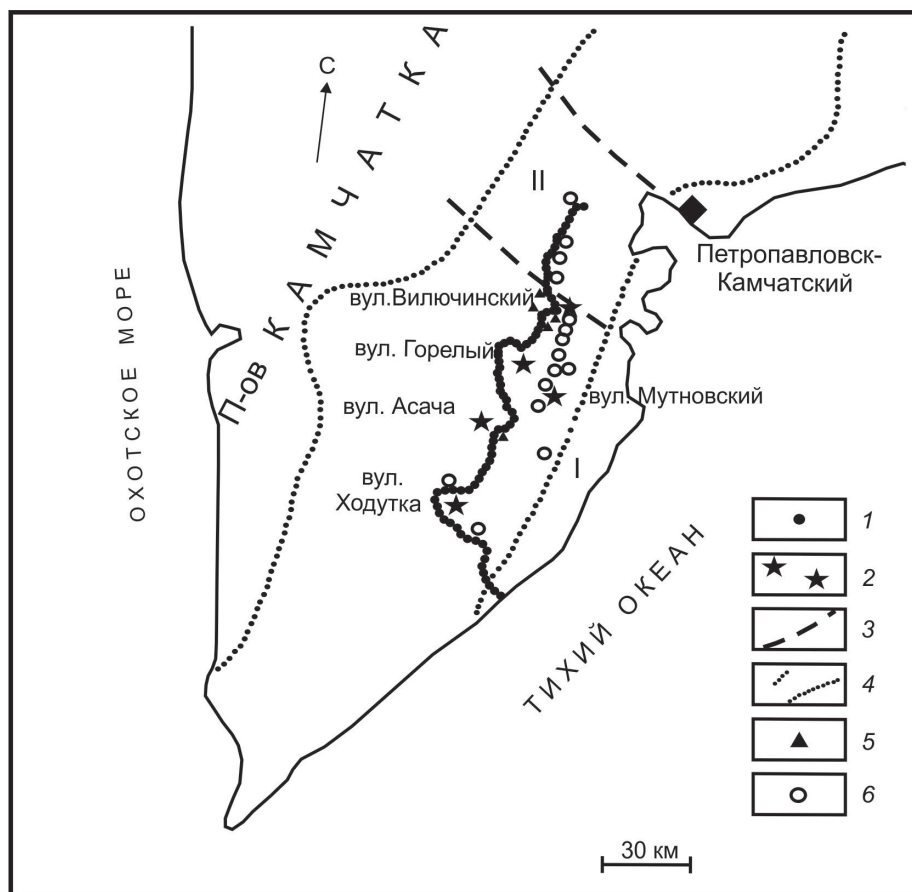


Рис. 1. Схема расположения профиля МТЗ (Мороз, Самойлова, 2013): 1 — пункты МТЗ; 2 — вулканы; 3 — граница поперечной структуры (Апрелков, 1971; Геология ..., 1964); 4 — границы Восточно-Камчатского вулканического пояса (Геология ..., 1964); 5 — гидротермальные источники (Карта ..., 1999); 6 — рудопроявления (Карта ..., 1999). I — Южно-Камчатский антиклинорий, II — Начикинская складчато-блоковая зона.

двумерную инверсию данных МТЗ. Описанию результатов инверсии посвящена настоящая статья.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Региональный профиль «Южный» находится в пределах Начикинской зоны поперечных дислокаций и Восточно-Камчатского вулканического пояса, и проходит западнее Южно-Камчатского антиклинория (рис. 1) (Апрелков, 1971; Геология ..., 1964). На юго-востоке Начикинская складчато-блоковая зона представляет собой грабенообразную структуру с домеловыми отложениями, погруженными на глубину до 6 км (Апрелков, Попруженко, 2003). Границы этой зоны, в качестве которых выступают глубинные разломы, выделены по гравиметрическим и геологическим данным (рис. 1). На юге Начикинская складчато-блоковая зона граничит по крупному разлому с Южно-Камчатским антиклинорием северо-восточного простирания (Апрелков, 1971). Геологическое строение антиклинория отличается значительной слож-

ностью, что связано с большим числом крупных разломов. Осевая часть антиклинория совпадает с береговой линией, а его юго-восточное крыло погружено под воду (Власов, Ярмолюк, 1959). Согласно схеме аномалий гравитационного поля в редукции Фая (рис. 2) со стороны Тихого океана протягиваются разломы северо-западного простирания. Предполагается, что они продолжают на восточное побережье Камчатки (Очерки ..., 1987). Вследствие этого структуры (включая западное крыло антиклинория) разбиты на блоки. Наряду с рассматриваемыми крупными структурами района здесь выделяется Восточно-Камчатский вулканический пояс с современными действующими вулканами (рис. 1). Вулканический пояс имеет северо-восточное простирание и является наложенным, перекрывающим структуры северо-западного простирания (Геология ..., 1964).

Гравитационное поле Южной Камчатки даёт представление о распределении плотностных неоднородностей в земной коре и верхней мантии (рис. 2). В целом по направлению к Тихому океану происходит закономерное возрастание интенсивности поля. На суше

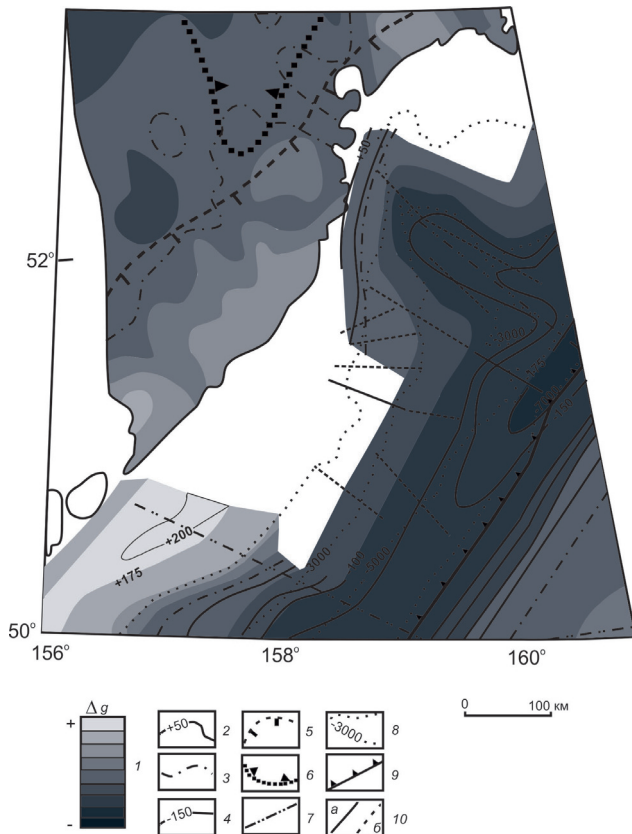


Рис. 2. Схема аномалий гравитационного поля (Селиверстов, 1998): 1 — относительная интенсивность аномалий гравитационного поля в редукции Фая; 2–4 — изолинии аномального гравитационного поля в редукции Фая для акваторий Камчатско-Командорского региона (мГал): положительные (2), нулевые (3) и отрицательные (4) значения поля; 5–6 — изостатические аномалии гравитационного поля положительные (5) и отрицательные (6); 7 — положение гравиметрических профилей; 8 — изобаты (м); 9 — осевые зоны глубоководных желобов; 10 — новейшие разрывные нарушения, выделенные по морфологическим признакам: а — установленные; б — предполагаемые.

зона максимальных значений силы тяжести соответствует восточным п-овам Камчатки. В вулканических зонах положительные аномалии поля силы тяжести в ряде случаев соответствуют магматическим интрузивным и эффузивным образованиям. В поле силы тяжести изучаемому району соответствуют положительные значения. Исключение составляет участок, где профиль пересекает вулканические образования вулкана Горелый. В этой области гравитационное поле характеризуется отрицательными значениями, что связано с наличием в земной коре пород с пониженной плотностью или с большой мощностью континентальной коры. Максимальные значения приурочены к самому южному участку профиля, это объясняется уменьшением мощности или увеличением плотности земной коры (Декин, Зубин, 1976).

Аномальное магнитное поле ΔT_a в районе исследований имеет полосовой характер, отражающий зональное распределение главных тектонических элементов. Областям вулканических построек соответствуют положительные аномалии магнитного поля (Ривош, 1963).

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

Согласно работам (Мороз, 1985; Мороз и др., 2001) верхняя часть геоэлектрического разреза южной части Камчатки мощностью в первые сотни метров представлена четвертичными вулканогенными и осадочными породами с удельным электрическим сопротивлением сотни-первые тысячи Ом·м и более. Следующая подстилающая толща неоген-четвертичного возраста мощностью до 4 км характеризуется удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом·м. Ниже нее расположен комплекс верхнемеловых осадочно-вулканогенных образований с удельным электрическим сопротивлением до первых сотен Ом·м. Фундамент данного района имеет сопротивление в первые тысячи Ом·м.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Метод МТЗ основан на изучении линейной связи между горизонтальными компонентами электромагнитного поля в одной точке. Эта связь определяется оператором импеданса $[Z]$ (Бердичевский, Жданов, 1981):

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

В неоднородных средах анализируются тензорные амплитудно-фазовые характеристики импеданса, содержащие информацию о строении среды, в том числе о степени ее размерности и о направлении главных геологических структур (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Однако чтобы осуществить визуализацию геоэлектрической среды, амплитудные оценки импеданса преобразуют в параметры кажущегося сопротивления. В рамках данного исследования был проведен анализ амплитудных кривых кажущегося сопротивления и фазовых импедансных кривых, полученных при протекании тока вдоль и

вкрест простирания Камчатки. Будем называть такие кривые, соответственно, продольными и поперечными.

Следует сказать, что форма кривой отвечает определенному типу геоэлектрического разреза. Поэтому близкие по форме кривые организованы в 15 семейств. В работе (Мороз, Самойлова, 2013) подробно описан анализ этих семейств. Для каждого из них были получены средние продольные и фазовые кривые (рис. 3), что позволило ослабить влияние приповерхностных гальванических эффектов, приводящих к статическому сдвигу амплитудных кривых во всем частотном диапазоне.

Помимо статического сдвига кривые кажущегося сопротивления подвержены влиянию берегового эффекта (крупной электромагнитной аномалии, возникающей из-за большого различия в значениях удельного электрического сопротивления суши и воды) в низкочастотной области. Как показали исследования этой проблемы (Мороз, Самойлова, 2013), продольные кривые при действии данного эффекта имеют минимум на периодах 2500–5000 с, который связан с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в водной толще. Поперечные кривые в своей правой части

представлены восходящей асимптотической ветвью, которая выполаживается на периодах 5000–10000 с. Такое затягивание ветвей кривых МТЗ по уровню кажущегося сопротивления в низкочастотной области говорит о том, что часть тока, который индуцируется в водной толще, при гальваническом перетекании на территорию суши не успевает перераспределиться из верхней части земной коры в мантию, обладающую повышенной электропроводностью.

Таким образом, избыточные токи в земной коре вблизи побережья создают ложную восходящую ветвь. Для определения периодов, с которых начинает действовать береговой эффект было привлечено численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки (Мороз, Самойлова, 2013). По результатам трехмерного моделирования было установлено, что отклонение поперечной кривой от локально-нормальной из-за берегового эффекта начинается на периодах 50–60 с, а отклонение продольной кривой — на периодах около 400 с. Следовательно, использование поперечных кривых для получения сведений о глубинной электропроводности, приведет к ложным высокоомным областям, не имеющим к реальному геоэлектрическому разрезу никакого отношения. Поэтому двумерная

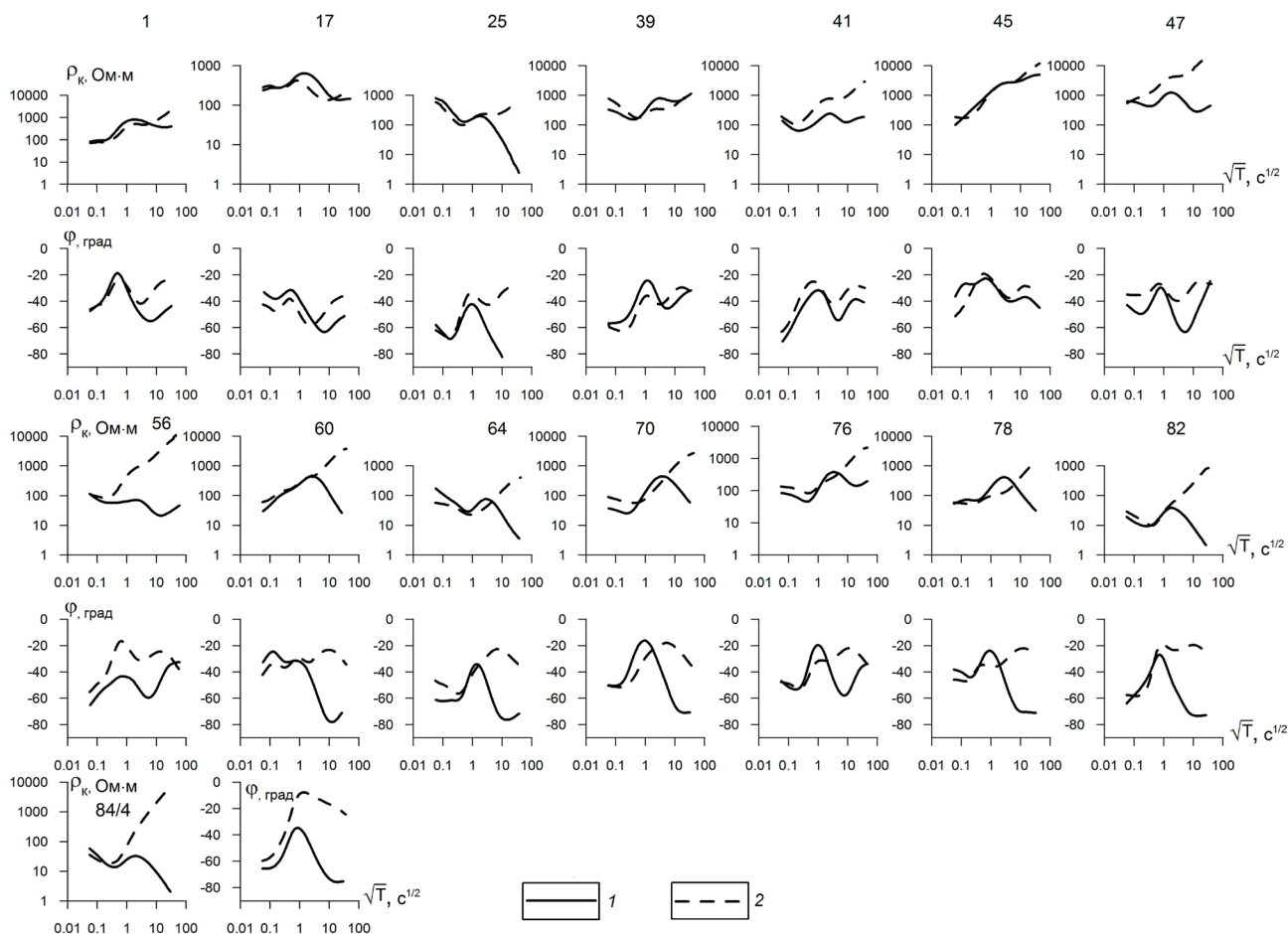


Рис. 3. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ: 1 — продольные кривые, 2 — поперечные кривые.

инверсия проведена по продольным кривым, но только до периода 400 с. Поперечные кривые кажущегося сопротивления и фаз импеданса в этом случае использованы только для уточнения верхней части геоэлектрического разреза.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МТЗ

Экспериментальные данные получены в диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 с. Точность определения модулей магнитотеллурических параметров составляет первые проценты, фаз импеданса — первые градусы.

Первичный геоэлектрический разрез по профилю был получен с помощью дифференциальной трансформации Ниблетта (Niblett, Saun-Wittgensien, 1960). Его глубина достигает 60 км. Результаты дифференциальной трансформации представлены на рисунке 4а. В центральной части профиля до глубин в первые десятки километров выделяется субвертикальная аномалия повышенного удельного сопротивления, которая лежит в пределах от нескольких сотен до нескольких тысяч Ом·м. В северо-восточном районе профиля в земной коре на глубинах 20–40 км выделяется аномалия пониженного удельного сопротивления в первые десятки Ом·м. Эта низкоомная область совпадает в пространственном отношении с зоной низких сейсмических скоростей, которая была выделена по данным сейсмотомографии (Гонтовая и др., 2010). В районе пунктов МТЗ № 55–66 в результате трансформации кривых МТЗ была получена аномалия пониженного удельного электрического сопротивления в первые десятки Ом·м на глубинах 30–50 км. В юго-восточной части профиля в земной коре также выражена низкоомная аномалия с удельным электрическим сопротивлением 10–20 Ом·м.

МЕТОДИКА 2D ИНВЕРСИИ

Для проведения двумерной инверсии мы воспользовались программой Макки, в основе которой лежит алгоритм, подробно описанный в работе (Rodi, Mackie, 2001). В данной программе использована схема нелинейных сопряженных градиентов.

При работе с квазидвумерными средами принято вести раздельный, либо совместный анализ кажущихся сопротивлений и импедансных фаз для двух поляризаций электромагнитного поля. Их называют Е-поляризацией (с электрическим полем вдоль простирания структур) и Н-поляризацией (с электрическим полем вкрест простирания структур) (Бердичевский,

Дмитриев, 2009). В нашем случае продольные кривые, полученные по простиранию Камчатки, являются поперечными для Начикинской зоны поперечных дислокаций и для блоков Южно-Камчатского антиклинория. Инверсии проводились в несколько итераций с участием продольных кривых в рамках Н-поляризованного поля, и в качестве результата рассматривался геоэлектрический разрез на итерации с минимальной невязкой (значение $RMS = 0.6$).

В качестве стартовой была принята модель с однородным полупространством с удельным сопротивлением в 100 Ом·м до глубин 60 км. Это полупространство подстилается нормальным разрезом до глубин 350 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ 2D ИНВЕРСИИ

Как показал анализ экспериментальных и модельных кривых кажущегося удельного сопротивления, полученных с помощью трехмерного моделирования с применением простых пробных моделей, мы можем использовать для интерпретации кривые до периода не более 400 с (Мороз, Самойлова, 2013). Низкочастотная область в данном случае искажена влиянием трехмерного берегового эффекта. Обратимся к кривым МТЗ, полученным в результате двумерной инверсии (рис. 5). Для инверсии были использованы экспериментальные данные с 52 пунктов. Мы убрали из рассмотрения точки, расположенные на близком расстоянии друг от друга ($\ll 3$ км), и точки, в которых было нарушено дисперсионное отношение между амплитудными и фазовыми кривыми. Для 42 пунктов зондирования было получено удовлетворительное соответствие модельных продольных амплитудных и фазовых кривых экспериментальным кривым до периода 400 с. На периодах свыше 400 с начинается расхождение фазовых модельных и экспериментальных кривых.

Рассмотрим геоэлектрическую двумерную модель, полученную по профилю «Южный» (рис. 4б). Также как и в разрезе, полученном в результате дифференциальной трансформации, в северо-восточной части профиля, в районах пунктов МТЗ № 1–21, выделяется высокоомная область с удельным электрическим сопротивлением первые тысячи Ом·м. Глубина залегания этой области достигает 20 км. К южной границе высокоомной области приурочен вулкан Вилучинский, и повышенное сопротивление здесь может быть связано с наличием в разрезе вулканических пород. Двигаясь в южном направлении в районе пунктов МТЗ № 25–33, можно увидеть область пониженного удельного сопротивления, залегающую на глубине от 10 до 50 км. Значения удельного электрического сопротивления этой

РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ

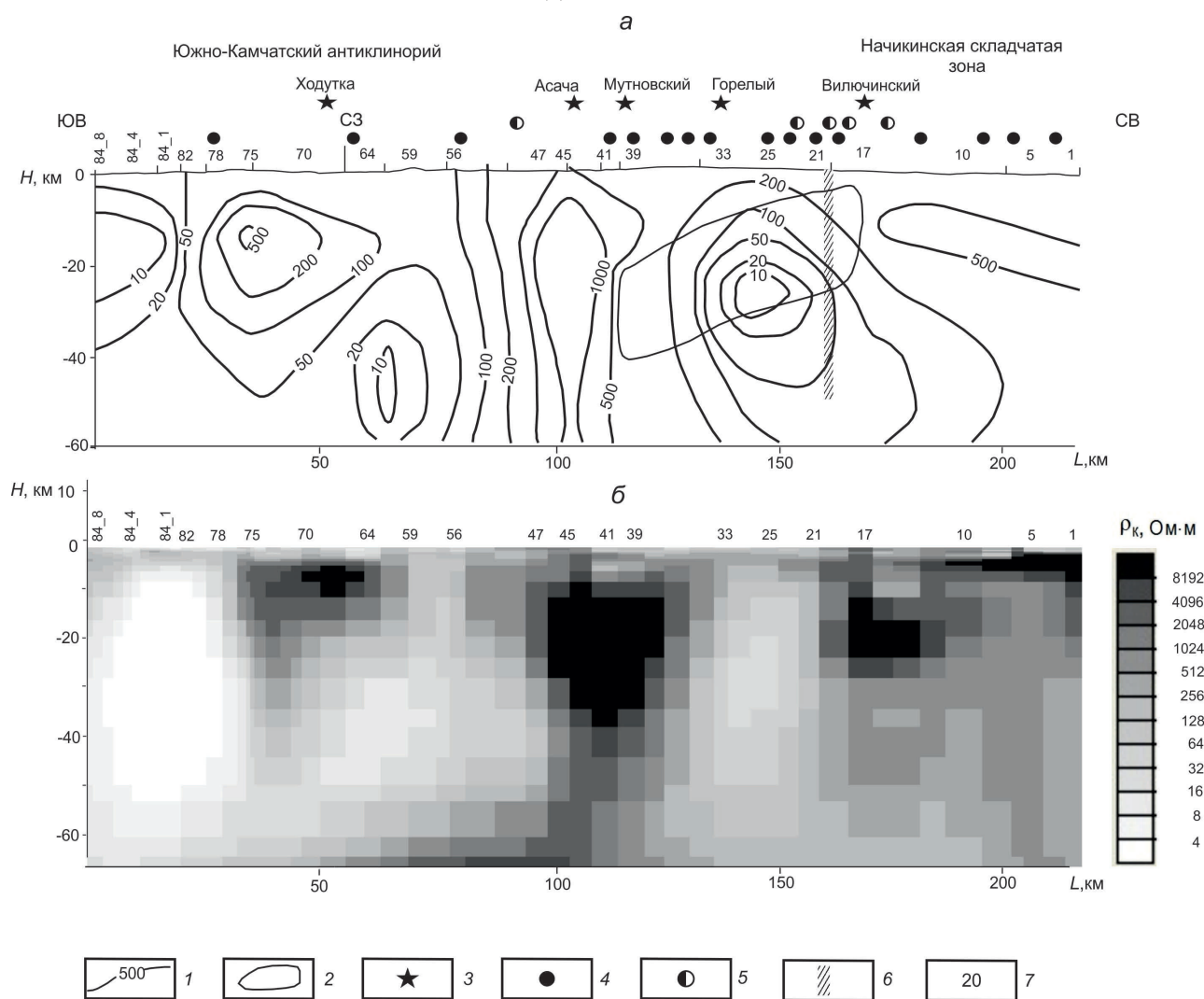


Рис. 4. Глубинный геоэлектрический разрез по профилю «Южный» полученный с помощью дифференциальной трансформации Ниблетта (а) (Мороз, Самойлова, 2013) и с помощью двумерной инверсии (б): 1 — изолинии, в Ом·м; 2 — аномалия пониженной сейсмической скорости (Гонтовая и др., 2010); 3 — вулканы; 4 — гидротермальные источники; 5 — рудопоявления ископаемых; 6 — разлом (Карта ..., 1999); 7 — номера пунктов МТЗ.

области лежат в пределах первых десятков Ом·м. К району выделенной высокоомной области приурочен вулкан Горелый. Такая проводящая область, по нашему мнению, может быть связана с наличием в разрезе магматических расплавов и гидротермальных растворов.

В районах пунктов МТЗ № 39–47 отчетливо выражена область с удельным электрическим сопротивлением до нескольких тысяч Ом·м. Она фиксируется на глубине первых км и продолжается до 60 км. Стоит обратить внимание на то, что данная высокоомная аномалия находится в районе вулканов Мутновский и Асача. По нашему мнению, ее природа может быть связана с присутствием в разрезе магматических пород, обладающих высоким удельным электрическим сопротивлением. Далее в районах пунктов МТЗ № 59–75 в верхней части разреза отчетливо выделяется высокоомная зона небольшой мощности в пер-

вые км, возможно связанная с магматическими породами вулкана Ходутка. В этих же районах в интервале глубин 25–45 км присутствует аномалия пониженного удельного сопротивления, которая может быть связана с глубинным разломом, насыщенным магматическим расплавом. В юго-восточной оконечности профиля (МТЗ № 76–84_8) выделяется область низкого удельного сопротивления в первые десятки Ом·м. Она расположена в интервале глубин 5–60 км. В пределах выявленной низкоомной аномалии находится вулкан Ходутка. Возможно, природа аномалии также связана с глубинным разломом, насыщенным высокоминерализованными растворами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведена двумерная инверсия с помощью продольных кривых МТЗ

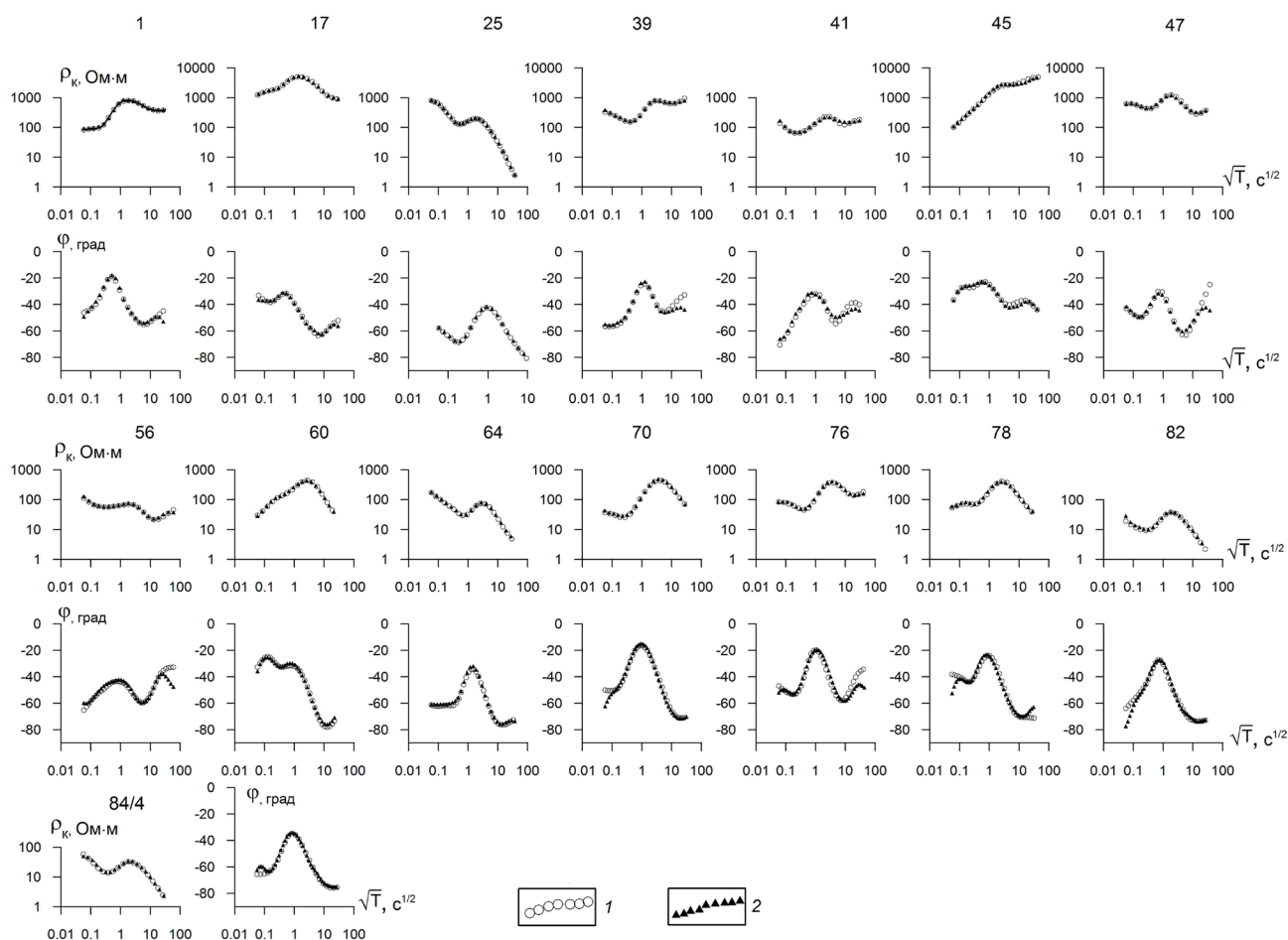


Рис. 5. Модельные и экспериментальные продольные кривые кажущегося сопротивления и фаз импеданса, полученные по результатам двумерной инверсии: 1 — продольные экспериментальные кривые, 2 — продольные модельные кривые.

в рамках Н-поляризованного поля. Поперечные кривые МТЗ по отношению к простиранию Камчатки в сильной степени искажены береговым эффектом в диапазоне периодов от 50–60 с и выше. В связи с этим такие кривые были применены для уточнения верхней части разреза. В результате инверсии получен геоэлектрический разрез до 60 км, уточняющий распределение электропроводности с глубиной в районе юго-восточного побережья Камчатки. Выделенные аномалии повышенного и пониженного удельного сопротивления согласуются с поведением поля силы тяжести и геомагнитного поля.

Для изучения глубинной части геоэлектрического разреза на периодах более 400 с необходимо решение обратной задачи МТЗ с привлечением трехмерной модели, включающей водную толщу океана, омывающего регион.

Авторы признательны ОАО «Камчатгеология» и ООО «Северо-Запад» за предоставленные данные МТЗ. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 16-35-00088, РФФИ:16-05-00059; ДВО РАН:15-1-2-008.

Список литературы

- Апрелков С.Е. Тектоника и история вулканизма Южной Камчатки // Геотектоника. 1971. № 2. С. 47–61.
- Апрелков С.Е., Попруженко С.В. Основные черты Корякского нагорья и Камчатки // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Издательство «Наука — для Камчатки», 2003. 129 с.
- Белявский В.В., Алексанова Е.Д. Трехмерная геоэлектрическая модель южной части полуострова Камчатка // Физика Земли. 2014. № 1. С. 11–32.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
- Власов Г.М., Ярмолюк В.А. Структурно-тектонические районы Камчатки. Докл. АН СССР. Т. 127. № 1. 1959.
- 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.
- Мороз Ю.Ф.* Глубинная геоэлектрическая модель Южной Камчатки // Тихоокеанская геология. 1985. № 6. С. 100–105.
- Мороз Ю.Ф., Логинов В.А., Улыбышев И.С.* Глубинный геоэлектрический разрез области сочленения Срединного камчатского массива, Ганальского выступа и Центрально-Камчатского прогиба // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Выпуск № 29. С. 18–34.
- Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Глубинное строение вулканической зоны южной Камчатки по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 12–26.
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А.* Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58–66.
- Очерки тектонического развития Камчатки. М.:Наука. 1987. 248 с.
- Ривош Л.А.* О тектонике Камчатского полуострова и дна прилегающих к нему морских районов (по геофизическим данным) // Геология и геофизика. 1963. № 6. С. 30–47.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М:Научный Мир.1998.164 с.
- Niblett E.R., Sayn-Wittgensien C.* Variation of electrical conductivity with depth by the magnetotelluric method // Geophysics. 1960. V. 25. № 5. P. 998–1008.
- Rodi W. and Mackie R. L.* Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. V. 66. №. 1. P. 174–187.

THE RESULTS OF TWO-DIMENSIONAL INVERSION OF MAGNETOTELLURIC DATA ALONG THE REGIONAL PROFILE «YUZNYI» (KAMCHATKA)

Yu.F. Moroz^{1,2}, O.M. Samoylova¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, 683006, Petropavlovsk-Kamchatskii, Russia; e-mail: olgasm415@mil.ru*

²*Geological Institute of SB RAS, Russian Academy of Sciences, 670047, Ulan-Ude, Russia*

The authors considered the results of magnetotelluric data interpretation along the regional profile, which is located on the south-eastern coast of Kamchatka. A deep two-dimensional geoelectric model for this Kamchatka zone was introduced. The model was created using longitudinal apparent resistivity and impedance tensor curves of soundings. The authors provide the description of obtained anomalies and their probable nature.

Keywords: magnetotelluric sounding, deep geoelectrical model, two-dimensional inversion.