

*На правах рукописи*

*Осам*

**Самойлова Ольга Михайловна**

**ГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ  
ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ**

Специальность 25.00.10 — Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Петропавловск-Камчатский — 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Мороз Юрий Федорович**,  
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории тектоники и геофизики ФГБУН Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Официальные оппоненты: **Пушкарев Павел Юрьевич**,  
доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

**Туруганов Евгений Хрисанфович**,  
доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией комплексной геофизики ФГБУН Института земной коры СО РАН (г. Иркутск)

Ведущая организация: ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН (г. Хабаровск)

Защита состоится «14» ноября 2018 г. в 9<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 003.022.03 при Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИЗК СО РАН и на сайте: [http://www.crust.irk.ru/newsfull\\_172.html](http://www.crust.irk.ru/newsfull_172.html)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru). Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «7» августа 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 003.022.03  
кандидат физико-математических наук



А.А. Добрынина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Объект исследований

Объектом исследования в настоящей работе является литосфера восточного побережья северной и южной Камчатки, представляющая собой сложную в тектоническом и геологическом отношении область. Предмет исследования – электропроводность литосферы, характеризующая физическое состояние горных пород. Основным источником информации об электропроводности недр являются данные электромагнитного поля. На основе имеющихся представлений об источниках поля определяются законы, устанавливающие связь между ним и характеристиками изучаемой среды, содержащей геоэлектрические неоднородности. Присутствие последних вызывает появление аномалий переменного электромагнитного поля, которые имеют высокую научную и практическую значимость ввиду содержания в них информации о термодинамическом состоянии земной коры и верхней мантии, наличии гидротермальных растворов и объемов частично расплавленного вещества.

### Актуальность темы исследования

Восточное побережье северной и южной Камчатки характеризуется высокой сейсмичностью и гидротермальной активностью. Исследуемые районы входят в состав Центрально-Камчатского вулканического пояса на северо-восточном побережье и Восточно-Камчатского вулканического пояса на юго-восточном побережье полуострова (рис. 1 а). В пределах последнего сконцентрировано подавляющее большинство действующих и потенциально активных вулканов. Следует отметить, что северный и южный районы восточного побережья Камчатки находятся в разных геодинамических обстановках. Восточная часть региона от мыса Лопатка до Камчатского п-ова, расположенная на границе с Тихим океаном, а также прилегающий участок Курило-Камчатского глубоководного желоба относятся к активной континентальной окраине, где происходит погружение Тихоокеанской плиты под континентальную. Часть восточной Камчатки, граничащей с Беринговым морем, соответствует пассивной окраине континента [Селиверстов, 1998].

Изучение особенностей глубинного строения как островной, так и материковой части восточной Камчатки является важным для решения вопросов тектоники и геологии региона. Информация о строении литосферы играет большую роль в понимании геологических процессов, проявляющихся в электропроводности земной коры и верхней мантии. Так изучению геоэлектрического строения Камчатки посвящен ряд работ [Мороз 1985; Мороз, Скрипников, 1995; Нурмухамедов, 2001, 2003; Мороз, Нурмухамедов, 2004; Нурмухамедов и др., 2010; Белявский, Алексанова, 2014; Мороз и др., 2008, 2015, 2016; Мороз, Логинов, 2016; Белявский, Яковлев, 2016]. Однако по-прежнему остается слабоизученным восточное побережье региона со сложным

очертанием береговой линии, где в сильной степени проявляется береговой эффект, создающий проблемы в изучении глубинной электропроводности литосферы в зоне субдукции и за ее пределами. В этой связи существует необходимость в создании глубинных геоэлектрических моделей восточного побережья северной и южной Камчатки с учетом особенностей проявления трехмерного берегового эффекта.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является создание моделей электропроводности литосферы восточного побережья северной и южной Камчатки по данным магнитотеллурических зондирований (МТЗ) и определение возможной природы выявленных аномалий. Для реализации поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Анализ и обобщение экспериментальных данных МТЗ, полученных по региональным профилям «Северный» и «Южный». Изучение геоэлектрической неоднородности сред с помощью полярных диаграмм компонент тензора импеданса, параметра неоднородности  $N$  и параметров асимметрии Свифта ( $skew_S$ ) и Бара ( $skew_B$ ); систематизация кривых МТЗ в семейства по методике конформного осреднения с последующим расчетом средних амплитудных и фазовых кривых для каждого семейства;

2. Построение схем индукционных стрелок Визе-Паркинсона для разных периодов вариаций;

3. Изучение особенностей трехмерного берегового эффекта с помощью численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля Камчатки на базе пробных моделей;

4. Проведение двумерной инверсии данных МТЗ в районах северо-восточного и юго-восточного побережий Камчатки с использованием продольных кривых до периода 400 с и поперечных кривых до периода 80 с;

5. Районирование восточного побережья северной и южной Камчатки по типам кривых МТЗ для построения глубинных геоэлектрических моделей с учетом действия трехмерного берегового эффекта; сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

### **Этапы выполнения исследования**

Проведенная работа делится на четыре этапа. Первый посвящен изучению характера и степени геоэлектрической неоднородности в прибрежных районах восточной Камчатки на основе анализа тензора импеданса. В соответствии с результатами определен интерпретационный план, согласно которому для проведения анализа данных МТЗ на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности районов исследования аппроксимируются в качестве квазидвумерных. Для получения наиболее вероятных количественных оценок параметров геоэлектрического разреза следует проводить моделирование с учетом трехмерного берегового эффекта. Более глубокий

анализ берегового эффекта является вторым этапом работы, на котором проводилось численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки вдоль региональных профилей «Северный» и «Южный» и в дополнительных 14 точках, расположенных в разных районах региона. По взаимному расположению локально-нормальных и азимутальных кривых МТЗ выявлены характерные особенности берегового эффекта на Камчатке. Третий этап исследования связан с подавлением влияния приповерхностных геоэлектрических неоднородностей на экспериментальные данные путем конформного осреднения кривых МТЗ с последующим проведением двумерной инверсии средних кривых МТЗ. И заключительный этап в работе – построение геоэлектрических моделей юго-восточного и северо-восточного районов исследования путем расчета параметра удельного электрического сопротивления и мощностей отдельных блоков на основе модели, учитывающей переход от континентальной части Камчатки к Тихому океану, Берингову и Охотскому морям.

### **Фактический материал и методы исследований**

В настоящее время одним из ведущих методов изучения глубинной электропроводности является метод МТЗ, основанный на фундаментальной теории и имеющий достаточно развитый математический аппарат для решения прямых и обратных задач. В данном исследовании используются МТЗ, выполненные по профилю «Северный» вдоль северо-восточного побережья от п. Оссора до п. Тиличики, общей протяженностью 350 км, и по профилю «Южный», протягивающемуся на 215 км от п. Николаевка до бухты Ходутка на юго-восточном побережье региона. В качестве дополнительной информации привлечены данные магнитовариационных зондирований (МВЗ), полученные вдоль указанных профилей. Полевые работы выполнялись предприятием ОАО «Камчатгеология» совместно с компанией ООО «Северо-Запад» в рамках долговременной программы геолого-геофизических исследований земной коры и верхней мантии Камчатки.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Восточное побережье Камчатки находится под влиянием регионального и локального трехмерных береговых эффектов. Региональный эффект обусловлен токами, обтекающими Камчатку, Алеутскую островную дугу, и концентрирующимися в морях и в Курило-Камчатском глубоководном желобе. Локальный эффект связан с обтеканием электрическими морскими токами полуостровов восточного побережья региона и их концентрацией в заливах.

2. Для изучения электропроводности литосферы районов восточного побережья Камчатки можно использовать двумерные модели с ограничением до периода 400 с для продольных кривых и до периода 80 с для поперечных кривых. На больших периодах необходимо привлечение трехмерного

моделирования магнитотеллурического поля (МТ-поля) из-за влияния берегового эффекта.

3. Геоэлектрические модели северо-восточного и юго-восточного побережий Камчатки содержат литосферный проводящий слой. Кровля слоя на северо-восточном побережье находится на глубинах от 10 до 40 км, на юго-восточном – от 5 до 30 км.

### **Научная новизна работы**

На основе анализа экспериментальных данных и результатов численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля Камчатки впервые получены геоэлектрические модели восточного побережья северной и южной Камчатки с учетом действия берегового эффекта. Глубинность моделей составляет 80 км. Литосферный проводящий горизонт, выделенный в обоих районах исследования восточной Камчатки, залегает на разных глубинах, и максимальное приближение кровли слоя к поверхности наблюдается в юго-восточном разрезе.

В диссертационной работе также представлены оригинальные научные результаты, имеющие отношение к методике интерпретации данных МТЗ, полученных в прибрежной зоне. Определены периоды, с которых начинается действие берегового эффекта на продольные и поперечные кривые МТЗ, и выделены особенности локального и регионального трехмерного берегового эффектов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

В соответствии с формулой специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых» настоящая диссертационная работа представляет собой исследование электропроводности отдельной оболочки Земли, литосферы, в пределах восточного побережья Камчатки. Полученные научные результаты соответствуют пункту 8 – «Изучение Земли и ее частей по таким свойствам, как плотность, теплопроводность, электропроводность и т.п.» и пункту 14 – «Методы обработки и интерпретации результатов измерения геофизических полей» паспорта специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

### **Личный вклад**

В исследованиях глубинной электропроводности восточной Камчатки автор принимает участие с 2012 г. За это время при непосредственном участии автора выполнен анализ параметра неоднородности, параметров асимметрии, полярных диаграмм тензора импеданса и экспериментальных кривых МТЗ, полученных вдоль региональных профилей «Северный» и «Южный»; дополнительные МТЗ в широком диапазоне частот в отдельных точках по профилю «Южный»; районирование северо-восточного и юго-восточного

побережий Камчатки по типам кривых МТЗ; анализ индукционной матрицы Визе-Паркинсона; оценка берегового эффекта с помощью численного 3D моделирования на базе пробных моделей; 2D инверсия экспериментальных данных МТЗ по региональным профилям «Северный» и «Южный»; построение геоэлектрических моделей для исследуемых районов восточного побережья Камчатки с учетом трехмерного берегового эффекта.

### **Практическое применение**

Настоящая работа будет полезна специалистам в области глубинной геоэлектрики, так как в ней сформулирована и показана на примере двух региональных профилей современная методика интерпретации данных МТЗ, полученных в переходной зоне «океан-континент». Выполненные исследования показали, что на восточном побережье региона при проведении двумерной инверсии экспериментальных материалов необходимо использовать в качестве основных продольные значения кажущегося сопротивления и фаз импеданса, т.к. они, в отличие от поперечных значений, в меньшей степени искажены влиянием трехмерного берегового эффекта (продольные кривые свободны от такого влияния до периода 400 с, а поперечные – до периода 80 с). Для того чтобы использовать весь диапазон периодов, необходимо переходить к классу трехмерных моделей, что также продемонстрировано на примере данных двух профилей.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были представлены в виде устных докладов на девяти российских и трех международных научных конференциях: региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога (г. Петропавловск-Камчатский, 2012, 2014, 2016, 2018); межрегиональной научно-практической конференции "Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук" (г. Петропавловск-Камчатский, 2014, 2015); VI международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (г. Бишкек, 2014); XVI Уральской молодежной научной школе по геофизике (г. Пермь, 2015); Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (г. Иркутск, 2015, 2017); Siberian early career geoscientists conference (г. Новосибирск, 2016); Международной научной конференции молодых ученых «Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства» (г. Цахкадзор, 2017).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано восемнадцать статей, четыре из которых в журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы общим объемом 107 страниц, включающим 32 иллюстрации и 2 таблицы. Список литературы состоит из 122 наименований, в том числе 25 иностранных.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Ю.Ф. Морозу за высокопрофессиональное руководство и всестороннюю помощь на всех этапах проведения настоящего исследования.

Работа выполнена на основе полевых данных, полученных ОАО «Камчатгеология» (г. Петропавловск-Камчатский) 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». Автор выражает благодарность ОАО «Камчатгеология» и ООО «Северо-Запад» за предоставленные данные МТЗ.

Автор искренне признателен С.М. Лимаревой за поддержку и помощь в подготовке иллюстрированного материала, В.А. Тупицыну за ценный практический опыт проведения полевых наблюдений, к.т.н. В.А. Рашидову, д.г.-м.н. А.Ю. Озерову, д.г.-м.н. А.И. Кожурину за ценные замечания к работам, подготавливаемым по теме диссертации, В.А. Логинову и И.С. Улыбышеву за помощь в получении дополнительных полевых данных МТЗ.

Частично работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-35-00088, 16-05-00059), один из которых выполнен под руководством автора.

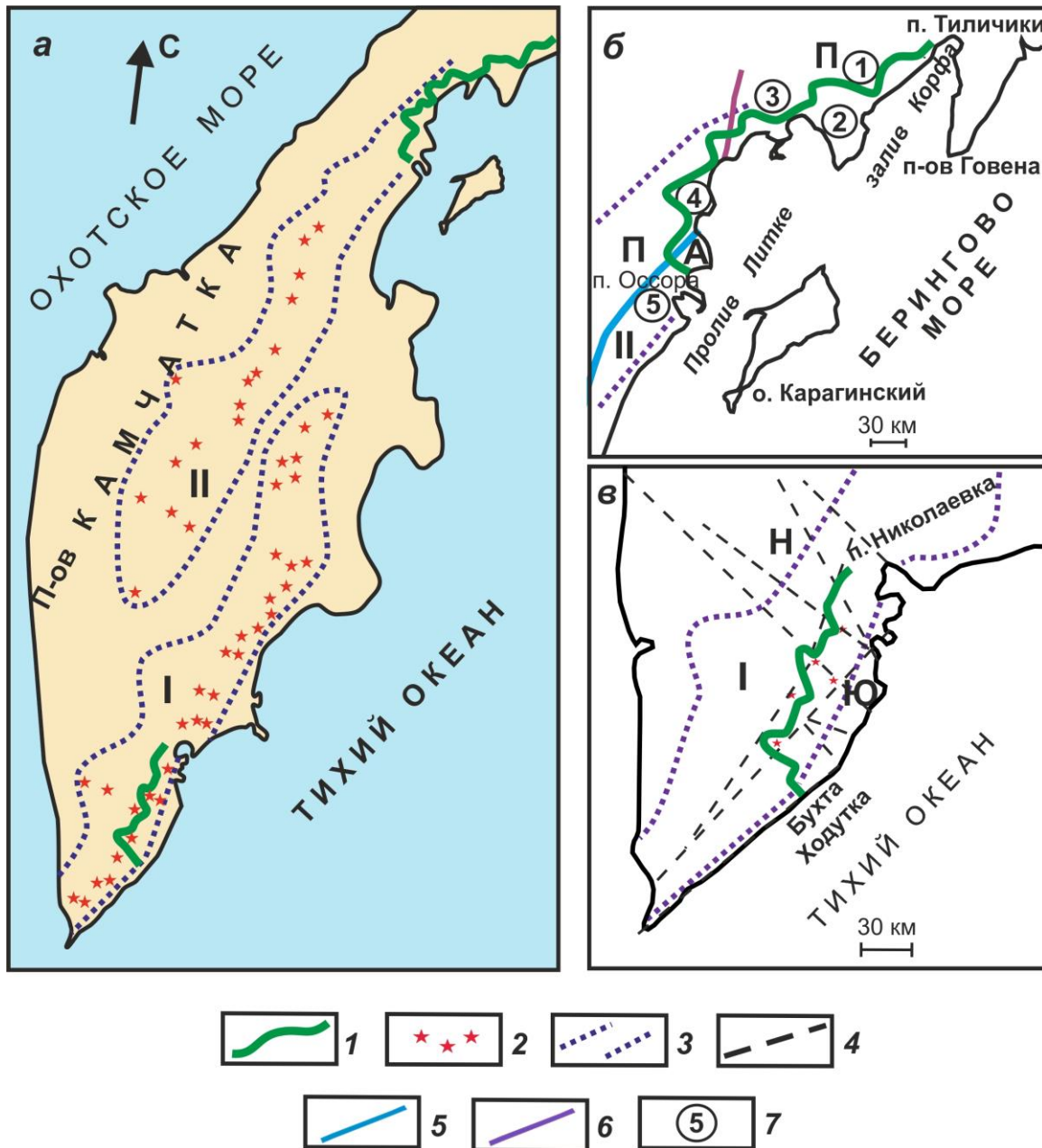
## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Геолого-геофизическая характеристика районов исследования**

В первой главе представлены подробные сведения о геолого-тектоническом строении и геофизической изученности районов восточного побережья Камчатки, в которых расположены региональные профили «Северный» (рис. 1 б) и «Южный» (рис. 1 в).

### **Глава 2. Современные представления о магнитотеллурических методах**

Вторая глава посвящена истории развития метода МТЗ от первых попыток использовать естественное переменное электромагнитное поле Земли для геологических целей до характеристики современного состояния этого метода и описания современного графа анализа и обработки экспериментальных материалов.



**Рисунок 1.** Схема расположения вулканических поясов Камчатки (а); схемы расположения региональных профилей МТЗ «Северный» (б) и «Южный» (в), составленные по [Геология, 1964; Апрельков, 1971; Карта ..., 1999]: **I** – профили МТЗ; **2** – вулканы; **3** – границы вулканических поясов – **I** – Восточно-Камчатского вулканического пояса и **II** – Центрально-Камчатского вулканического пояса; **4** – разрывные нарушения [Селиверстов, 2009]; **5** – тектонические границы структурно-формационных зон, соответствующие глубинным разломам, выделенные по геологическим данным; **6** – тектонические границы структурно-формационных зон, соответствующие глубинным разломам, выделенные по геофизическим данным; **7** – структурные элементы второго порядка: **1** – Вывенская впадина, **2** – Ильпинское поднятие, **3** – Анапкинская впадина, **4** – Кичигинская впадина, **5** – Тымлатское поднятие; **II** – Ильпино-Литкенский прогиб; **А** – Лесновско-Ватынский антиклинорий, **Н** – Начикинская зона поперечных дислокаций; **Ю** – Южно-Камчатский антиклинорий.

При проведении региональных работ по профилям «Южный» и «Северный» наблюдения магнитотеллурического поля осуществлялись с помощью станций MTU-5A и MTU-2E компании «Phoenix Geophysics Ltd» (Канада) [Fox, 2001].

В каждом пункте наблюдения по горизонтальным компонентам электрического и магнитного поля получен магнитотеллурический импеданс  $\mathbf{Z}$  – передаточная функция, выражающая связь между указанными компонентами полей. Импеданс является комплексным числом, т.к. электрические и магнитные составляющие магнитотеллурического поля сдвинуты между собой по фазе. В связи с этим обработка данных сводится к расчету тензора импеданса  $[\mathbf{Z}]$  [Бердичевский, Жданов, 1981]:

$$E_{гор} = [\mathbf{Z}]H_{гор}, \text{ где } [\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $[\mathbf{Z}]$  – тензор импеданса,  $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$ ,  $Z_{yy}$  – комплексные компоненты тензора импеданса, зависящие от периода, распределения удельного электрического сопротивления в изучаемой среде и ориентации координатных осей. Через эти компоненты в каждом пункте МТЗ получено кажущееся удельное электрическое сопротивление  $\rho_T$ .

### **Глава 3. Анализ экспериментальных данных по региональным профилям «Южный» и «Северный»**

В третьей главе приводится подробный анализ экспериментальных данных МТЗ. В результате рассмотрения полярных диаграмм компонент тензора импеданса, параметра неоднородности  $N$ , параметров асимметрии Свифта  $skew_S$  и Бара  $skew_B$  установлено, что восточное побережье как северной, так и южной Камчатки отличается сложным геоэлектрическим строением в виду наложения мелких локальных приповерхностных неоднородностей на крупные региональные структуры.

На следующем этапе работы характеризуются экспериментальные амплитудные и фазовые кривые МТЗ в направлениях, ориентированных по простиранию (продольные кривые) и вкрест простирания п-ова (поперечные кривые). Форма кривых МТЗ отвечает геоэлектрическому разрезу в точке зондирования. В связи с этим проведено районирование восточного побережья южной и северной Камчатки по типам геоэлектрического разреза через организацию в семейства кривых МТЗ, близких по форме. Профиль «Южный» разделен на 15 семейств, а профиль «Северный» – на 8. Изучение таких семейств показало, что продольные и поперечные кривые подвержены шифт-эффекту, связанному с действием избыточных гальванических зарядов, концентрирующихся на границах приповерхностных локальных неоднородностей. Для подавления шифт-эффекта использована методика конформного осреднения кривых МТЗ.

В заключительной части главы приводится анализ индукционных стрелок Визе-Паркинсона, который показал, что литосфера обоих районов исследования содержит горизонт повышенной электропроводности.

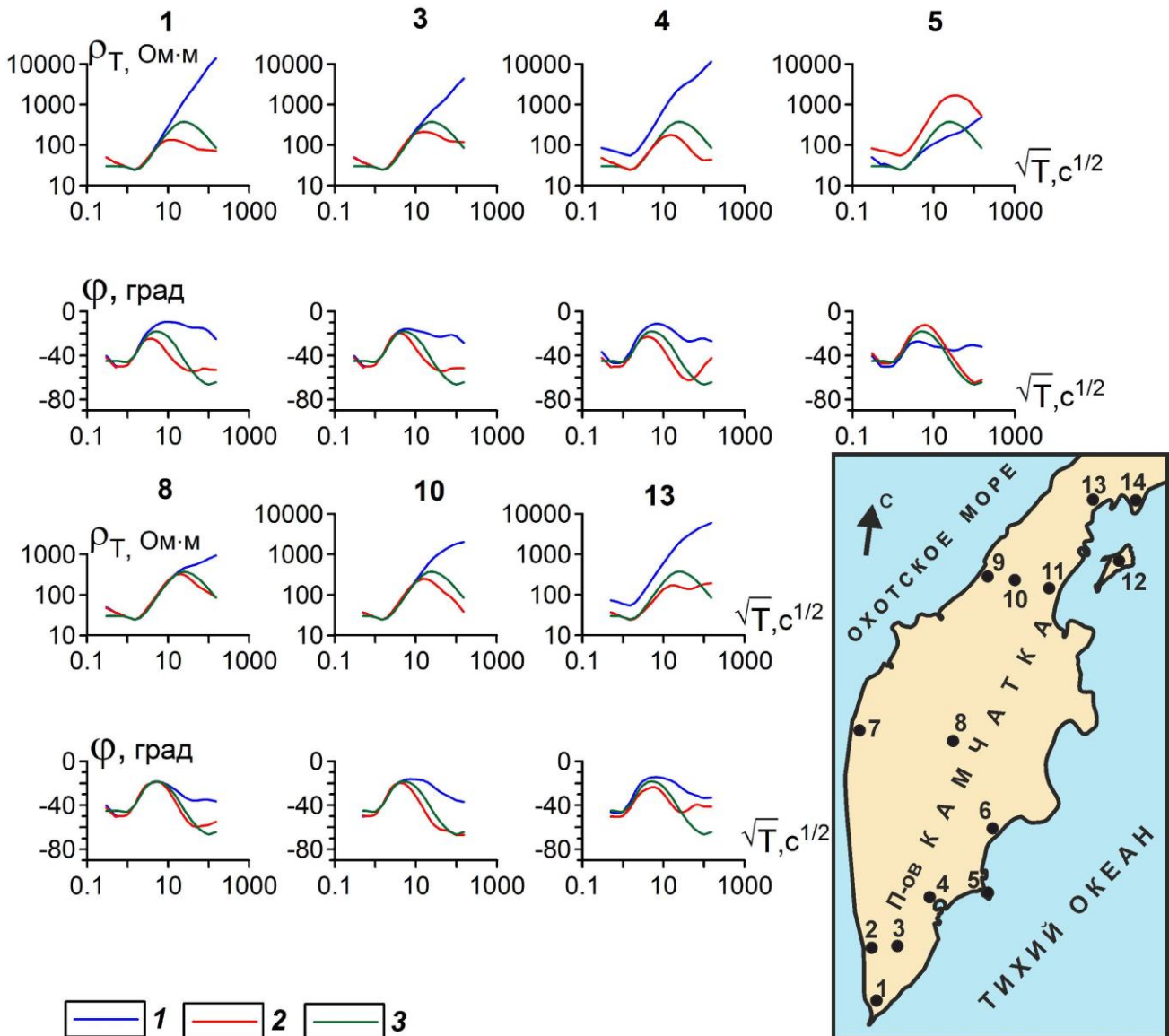
#### **Глава 4. Изучение берегового эффекта**

Береговой эффект представляет собой сложное явление, связанное с воздействием геоэлектрической неоднородности в виде моря или океана на поле геомагнитных вариаций и теллурических токов, и проявляющееся на относительно небольшом расстоянии от береговой линии на суше или на море [Мардерфельд, 1977].

В связи с проведением на Камчатке исследований методом МТЗ вблизи побережья Тихого океана и Берингова моря изучение берегового эффекта является актуальной задачей. В общих чертах он рассмотрен в работе [Мороз, Мороз, 2011]. В настоящем исследовании проводится тщательное изучение берегового эффекта и его особенностей, обусловленных сложной конфигурацией береговой линии восточного побережья полуострова, наличием островных дуг и глубоководных желобов. Для этого применялось численное трехмерное моделирование магнитотеллурического поля. Трехмерная геоэлектрическая модель построена на основе батиметрических данных из [Селиверстов, 2009]. Для верхнего слоя на суше приняты средние по региону геоэлектрические параметры: мощность осадочно-вулканогенного чехла – 3 км; его удельное электрическое сопротивление – 30 Ом·м; удельное электрическое сопротивление морской воды – 0.25 Ом·м [Мороз, 1991]. Обобщенные параметры глубинных геоэлектрических разрезов континента взяты из работы [Ваньян, 1997]. Моделирование выполнено для региона, ограниченного 50° и 62° с.ш. и 155° и 170° в.д.; модель состоит из 60 ячеек по оси  $X$ , 150 – по оси  $Y$  и 12 – по оси  $Z$ . Для изучения природы берегового эффекта и особенностей его воздействия на кривые МТЗ моделирование проведено в точках, расположенных на разных удалениях от береговой линии.

Прямая задача решалась с помощью программы МТЗDFwd [Mackie et al., 1994] в диапазоне периодов от 0.1 до 10000.0 с. Помимо продольных и поперечных кривых в каждом пункте моделирования рассчитывалась локально-нормальная кривая, отвечающая геоэлектрическому разрезу, не искаженному влиянием морской воды.

По взаимному расположению кривых можно выделить двумерный и трехмерный региональный береговой эффект. Двумерный эффект, выраженный в виде затягивания амплитудных поперечных кривых вверх, а продольных кривых вниз по уровню кажущегося сопротивления, выделен в центральной части полуострова (т. 8) и в центре Камчатского перешейка (т. 10) (рис. 2). В т. 8 есть слабое проявление трехмерного регионального берегового эффекта, выраженное в пересечении продольных и локально-нормальных кривых на больших периодах.



**Рисунок 2.** Модельные поперечные (1), продольные (2) и локально-нормальные (3) кривые МТЗ, полученные в разных районах п-ова Камчатка. На вставке показаны пункты моделирования.

Сильный трехмерный региональный береговой эффект отмечается в южной оконечности Камчатки в т.т. 1, 3. В этом районе поперечные амплитудные кривые характеризуются наиболее крутыми углами наклона восходящих ветвей. На продольных амплитудных кривых прослеживается минимум, соответствующий периоду 4900 с.

Локальный береговой эффект начинает проявляться на меньших периодах (первые десятки секунд). Он ярко выражен на восточном побережье в точках моделирования 4, 5 и 13, расположенных вблизи заливов и полуостровов. Причиной его возникновения является сложная конфигурация береговой линии. Индуцированные морские токи обтекают полуострова и концентрируются в заливах, создавая локальные трехмерные эффекты, которые в зависимости от

места наблюдения по-разному проявляются на продольных и поперечных кривых.

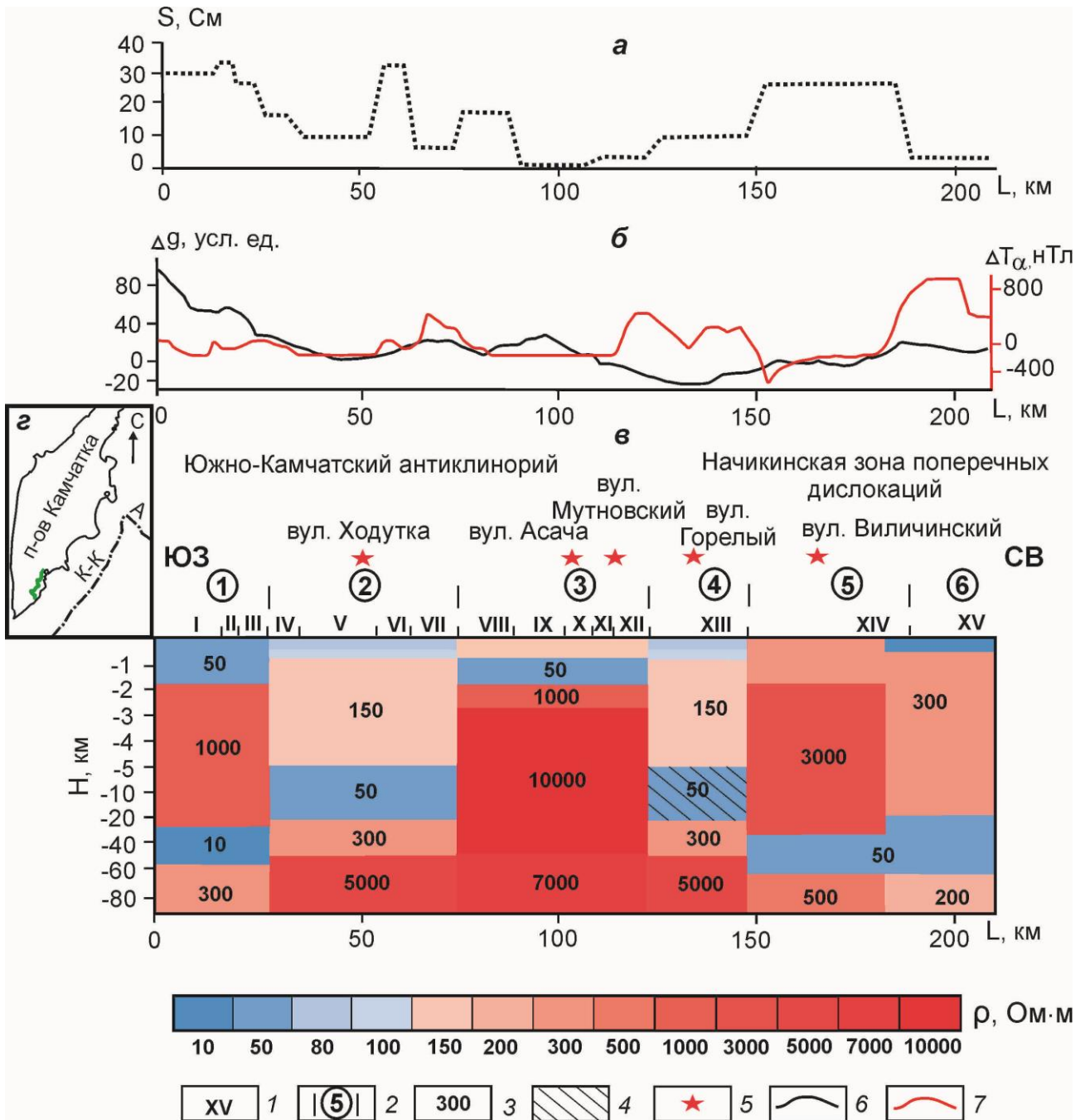
### **Глава 5. Интерпретация МТЗ в районах восточного побережья южной и северной Камчатки**

В пятой главе отражены результаты моделирования экспериментальных данных МТЗ с учетом действия берегового эффекта. Система координат модели согласована с системой наблюдений, в которой азимут оси  $x$  составляет  $120^\circ$ , оси  $y$  –  $30^\circ$ . Область моделирования покрывает территорию  $1380 \times 2240$  км при размерах пространственной прямоугольной сетки  $60 \times 150 \times 30$  ячеек. Глубина разреза составляет 900 км при достаточно детальном разделении на слои верхней части. До отметки 10 км мощность слоев меняется от 0.1 до 2.0 км. До глубины 120 км размер ячеек варьируется от 10 до 20 км. Ниже этой отметки вертикальный размер блоков увеличивается от 50 до 400 км.

Фоновый геоэлектрический разрез, окружающий рабочую область модели, является двумерным. В верхней части до глубин 7 км находится низкоомный слой с удельным электрическим сопротивлением  $0.25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Он имитирует водную толщу Тихого океана, Охотского и Берингова морей. Водный слой перекрывает однородный высокоомный горизонт ( $1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) мощностью 80 км. Ниже отметки глубины 87 км высокоомный горизонт подстилается низкоомными слоями мощностью от 120 до 400 км и удельным электрическим сопротивлением, меняющимся в пределах от 100 до 10  $\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Расчеты проведены в программе МТЗDFwd [Mackie et al., 1994] в диапазоне периодов от 0.1 до 10000.0 с.

Результаты моделирования для района юго-восточного побережья Камчатки представлены на рис. 3. Верхняя часть разреза до глубин 1.5-2 км характеризуется низким удельным электрическим сопротивлением от 50 до 150  $\text{ Ом}\cdot\text{м}$  на протяжении всей исследуемой территории за исключением района вулкана Вилючинский, где данный параметр до глубины 2 км принимает значение 300  $\text{ Ом}\cdot\text{м}$  и возрастает до 3000  $\text{ Ом}\cdot\text{м}$  на глубинах 20-30 км.

Под вулканом Мутновский на глубине от 1 до 2 км находится низкоомная аномалия со значением удельного электрического сопротивления  $50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , которая также была выделена при построении трехмерной геоэлектрической модели Мутновского месторождения парогидротерм [Нурмухамедов и др., 2010]. Вероятно, наличие низкоомной аномалии связано с зоной тектонического нарушения, которое отражено на [Карте ..., 1999], и оно может выступать в качестве резервуара, содержащего минерализованные растворы. От отметки 2 км начинается субвертикальная высокоомная аномалия с удельным электрическим сопротивлением от 1000 до 10000  $\text{ Ом}\cdot\text{м}$ .



**Рисунок 3.** Глубинный геоэлектрический разрез вдоль регионального профиля «Южный» (в), приведенный в сопоставлении с графиком суммарной продольной проводимости осадочно-вулканогенного чехла (а) и графиками геофизических полей (б): 1 – зоны, выделенные на первом этапе конформного осреднения кривых МТЗ; 2 – блоки, выделенные на втором этапе конформного осреднения кривых МТЗ; 3 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м; 4 – область пониженных сейсмических скоростей [Гонтова и др., 2010]; 5 – вулканы [Карта полезных ..., 1999]; 6 – график поля силы тяжести [Декин, Зубин, 1976]; 7 – график аномального магнитного поля [Ривош, 1963]. На вставке (з) зеленой линией показано расположение регионального профиля «Южный», черной линией показано положение осей глубоководных желобов (К-К – Курило-Камчатский, А – Алеутский) [Селиверстов, 2009].

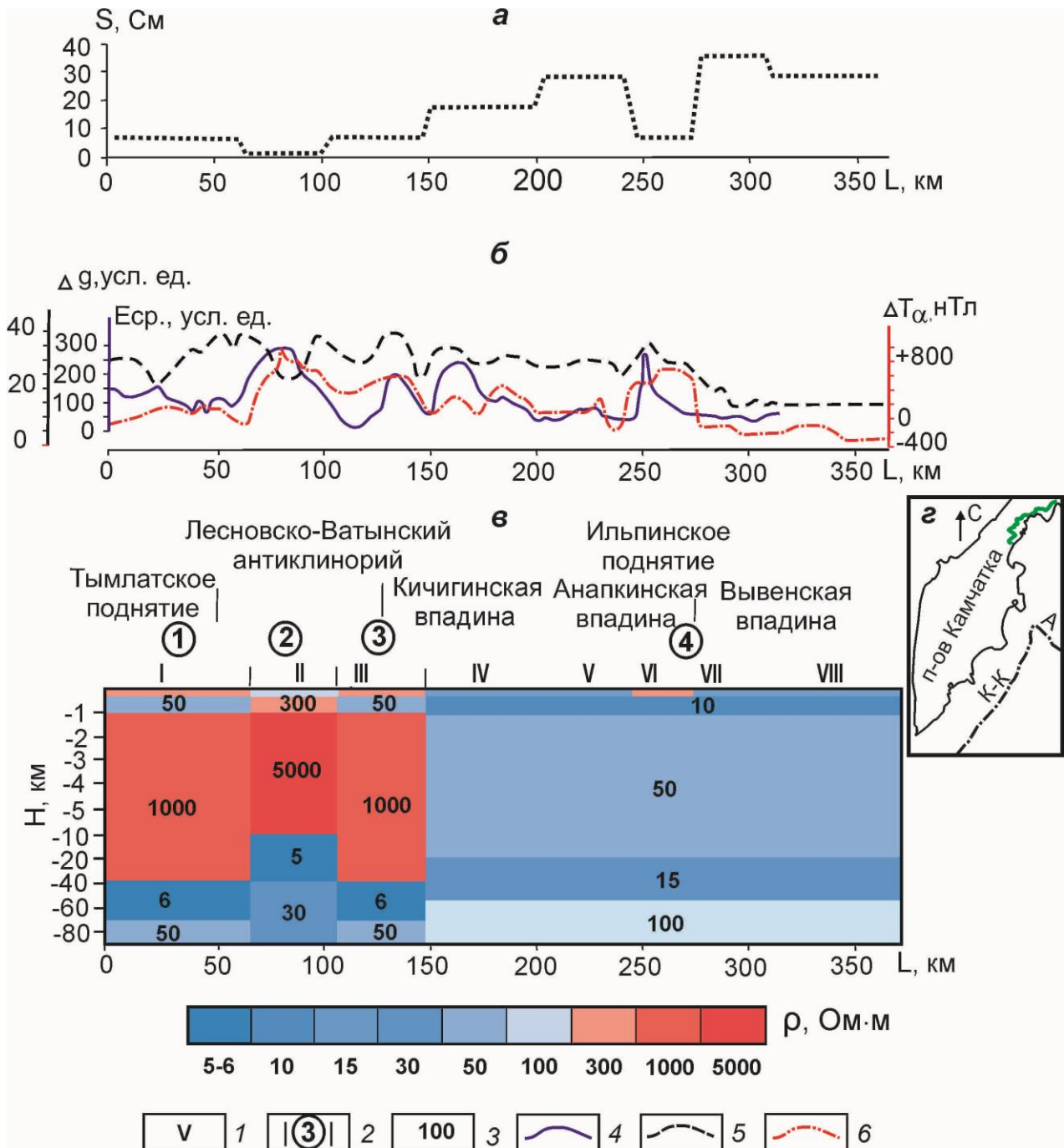
Верхняя часть разреза земной коры (до 2 км) в юго-западной части района исследований выражается слоем низкого удельного электрического сопротивления в 50 Ом·м. Эта аномалия перекрывает высокоомные отложения (1000 Ом·м) мощностью 30 км.

Результаты моделирования в районе северо-восточного побережья Камчатки представлены на рис. 4. Так же, как и в предыдущем случае, разрез сопоставлен с графиками геофизических полей. Геоэлектрический разрез характеризуется изменением удельного электрического сопротивления в широких пределах от первых единиц до 5000 Ом·м в юго-восточной части исследуемого района и плавным изменением этого параметра в северо-восточной части. Здесь удельное электрическое сопротивление принимает значения от 10 до 100 Ом·м.

В районе Тымлатского поднятия и Лесновско-Ватынского антиклинория выделена высокоомная аномалия (1000-5000 Ом·м) в интервале глубин от 1 до 40 км в зонах I и III и от 1 до 10 км в зоне II. В верхней части разреза Тымлатское поднятие характеризуется преимущественно увеличенным удельным электрическим сопротивлением кайнозойской толщи, составляющим 150 Ом·м. В пределах Лесновско-Ватынского антиклинория до глубины около 1 км удельное электрическое сопротивление достигает порядка 300 Ом·м. По-видимому, это связано с присутствием в разрезе вулканогенных образований. В этом районе на дневной поверхности закартированы интрузии четвертичного и неогенового возрастов [Карта полезных ..., 1999].

Кичигинская, Анапкинская и Вывенская впадины характеризуются повышенной электропроводностью осадочно-вулканогенного чехла, в разрезе которого преобладают терригенные породы с удельным электрическим сопротивлением порядка 10 Ом·м. Мощность низкоомной толщи кайнозойских отложений составляет 1 км.

В литосфере выделен слой с удельным электрическим сопротивлением 5-15 Ом·м, мощность которого достигает 30 км в пределах всего района исследований. Примечательно, что в зоне II, расположенной в пределах Лесновско-Ватынского антиклинория кровля низкоомного слоя находится на глубине 10 км. В юго-западном направлении, под Тымлатским поднятием, а также на границе Лесновско-Ватынского антиклинория и Кичигинской впадины глубина кровли выделенного слоя погружается до 35 км. Ниже корового проводящего горизонта геоэлектрический разрез в целом является низкоомным. Стоит отметить, что полученный результат согласуется с ранее полученным геоэлектрическим разрезом вдоль профиля, пересекающего Камчатский перешеек от поселка Лесная до поселка Оссора [Нурмухамедов, 2003].



**Рисунок 4.** Глубинный геоэлектрический разрез вдоль профиля «Северный» (в), приведенный в сопоставлении с графиком суммарной продольной проводимости осадочно-вулканогенного чехла (а) и графиками геофизических полей (б): 1 – зоны, выделенные на первом этапе конформного осреднения кривых МТЗ; 2 – блоки, выделенные на втором этапе конформного осреднения кривых МТЗ; 3 – значения удельного электрического сопротивления в Ом·м; 4 – график средней напряженности теллурического поля [Мороз, 1976]; 5 – график поля силы тяжести [Декин, Зубин, 1976]; 6 – график аномального магнитного поля [Ривош, 1963]. На вставке (з) зеленой линией показано расположение регионального профиля «Северный», черной линией показано положение осей глубоководных желобов (К-К – Курило-Камчатский, А – Алеутский) [Селиверстов, 2009].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе получены глубинные геоэлектрические разрезы восточного побережья северной и южной Камчатки. В процессе исследований решены следующие задачи:

1. Проведен анализ полярных диаграмм компонент тензора импеданса, параметров неоднородности и асимметрии, который показал, что восточное побережье Камчатки имеет сложное геоэлектрическое строение, обусловленное наложением мелких локальных приповерхностных неоднородностей на крупные региональные структуры. Для изучения глубинного геоэлектрического разреза геоэлектрические неоднородности районов исследования можно аппроксимировать в качестве квазидвумерных. Это обосновано тем, что Камчатка и ряд крупных тектонических структур, имеющих северо-восточное простирание, характеризуются продольными размерами, значительно превышающими поперечные. Однако для изучения глубинного геоэлектрического строения восточной Камчатки, подверженной влиянию трехмерного берегового эффекта, необходимо привлечение трехмерного численного моделирования магнитотеллурического поля.

2. Выполнен анализ экспериментальных кривых МТЗ по профилям «Северный» и «Южный». Он указывает на то, что большинство амплитудных кривых подвержено влиянию приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. На этапе качественной интерпретации нормализация кривых выполнена с привлечением методики конформного осреднения.

3. Построены и проанализированы схемы индукционных стрелок Визе-Паркинсона на разных периодах. Их поведение указывает на действие берегового эффекта. Характерно, что по мере увеличения периода во многих пунктах МВЗ происходит затухание берегового эффекта, обусловленное наличием в разрезе слоя повышенной электропроводности.

4. Выполнена оценка трехмерного берегового эффекта с привлечением численного трехмерного моделирования магнитотеллурического поля Камчатки на базе пробных моделей – однородной и содержащей литосферный проводящий горизонт, выявленный на стадии анализа экспериментальных данных. Этот подход в исследовании позволил не только определить периоды влияния данного эффекта на кривые МТЗ, но также дал возможность выявить в низкочастотном диапазоне ряд особенностей в проявлении берегового эффекта.

5. По данным МТЗ и МВЗ с привлечением априорной геолого-геофизической информации созданы геоэлектрические модели земной коры и верхней мантии в районах Курило-Камчатского и Берингоморского сегментов Тихоокеанской зоны перехода. В литосфере выявлены проводящие горизонты, природа которых связывается с наличием минерализованных растворов и с электропроводящими сульфидными образованиями.

6. Сопоставление полученных геоэлектрических разрезов восточного побережья северной и южной Камчатки указывает на их принципиально разное

строение. Так северо-восточный район характеризуется высокой степенью проявления регионального метаморфизма. Вследствие этого верхняя часть разреза северо-восточного побережья обладает меньшими значениями удельного электрического сопротивления по сравнению с юго-восточным районом, сложенным высокоомными вулканогенными образованиями. Следует отметить, что изменение параметра сопротивления вдоль юго-восточного побережья Камчатки происходит резко, отражая блочное строение этого участка, в виде чередования областей высокой и низкой электропроводности. Характерно, что литосферный проводящий слой северо-восточного побережья Камчатки обладает большей электропроводностью и залегает на больших глубинах, чем слой юго-восточного побережья.

На основании полученных в диссертационной работе моделей планируется продолжить изучение глубинных частей верхней мантии. Для этого необходима регистрация магнитотеллурического поля в диапазоне периодов от первых тысяч до нескольких десятков тысяч секунд. Наличие низкочастотной ветки таких кривых позволит выйти на стандартную кривую, характеризующую распределение электропроводности до глубин первые сотни километров.

Предложенная методика по учету влияния локального и регионального береговых эффектов на кривые МТЗ может быть использована для исследования глубинной электропроводности прибрежных районов. На Камчатке данный подход целесообразно применять для изучения геоэлектрического разреза восточных полуостровов, расположенных в зоне субдукции, где в сильной мере проявляется трехмерный береговой эффект, как региональный, так и локальный.

Разработанные геоэлектрические модели земной коры и верхней мантии восточного побережья северной и южной Камчатки рекомендуется положить в основу создания глубинных геофизических моделей с привлечением данных глубинных МТЗ, сейсмологии, теплового потока, поля силы тяжести, аномального магнитного поля и другой геолого-геофизической информации. Геофизические модели дадут возможность выявить области питания зон современного вулканизма, определить существование астеносферного проводящего слоя, природа которого может быть связана с частичным плавлением ультраосновных пород.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах перечня ВАК:**

1. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Глубинное строение вулканической зоны южной Камчатки по геофизическим данным // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 1-15.

2. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М., Мороз Т.А.* Глубинная электропроводность восточного побережья северной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 65-80.

3. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Результаты двумерной инверсии данных магнитотеллурического зондирования по региональному профилю «Южный» (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 2. Выпуск 34. С. 14-21.

4. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Особенности регионального и локального береговых эффектов в магнитотеллурическом поле Камчатки // Геофизические исследования. 2017. Том 18. № 3. С. 81-94.

### **Прочие публикации:**

1. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.* Магнитовариационные исследования восточного побережья северной Камчатки // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 241-248.

2. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М., Мороз Т.А.* Глубинное строение побережья северной Камчатки по геофизическим данным // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 206-213.

3. *Самойлова О.М.* Изучение берегового эффекта по магнитовариационным данным // Материалы XIV межрегиональной научно-практической конференции «Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук», 4-6 февраля 2014 г. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2014. С. 231-238.

4. *Самойлова О.М.* Об особенностях методики интерпретации МТЗ в области перехода «океан-континент» // Материалы IV международной научно-практической конференции «Современные научные исследования: инновации и опыт», 10-11 октября 2014 г. Екатеринбург: Национальный межотраслевой институт «Наука и образование», 2014. №4. С. 119-124.

5. *Moroz Yu.F., Samoylova O.M., Moroz T.A.* The investigation of the three dimensional effect in magnetotelluric field of Kamchatka east coast // 10-th International conference «Problems of Geocosmos», October 6-10 2014. St. Petersburg, Petrodvorets, 2014. P. 20-21.

6. *Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М., Мороз Т.А.* О глубинной электропроводности восточного побережья северной Камчатки // Тезисы IV международного симпозиума «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», 23-29 июня 2014 г. Бишкек: НС РАН. 2014. С. 206-207.

7. **Самойлова О.М.** Численное моделирование магнитотеллурического поля юго-восточного побережья Камчатки // Сборник научных материалов XVI уральской молодежной научной школы по геофизике. Пермь: ГИ Уро РАН, 2015. С. 269-272.

8. **Самойлова О.М.** Глубинная геоэлектрическая электропроводность восточного побережья южной Камчатки // Материалы XXVI Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика», г. Иркутск, 20-25 апреля 2015 г. - г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2015. С. 156-157.

9. **Самойлова О.М.** Опыт применения магнитотеллурического зондирования для изучения строения восточного побережья Камчатки // Материалы XV межрегиональной научно-практической конференции «Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук», 3-6 февраля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2015. С. 132-136.

10. **Логонов В.А., Самойлова О.М., Улыбышев И.С., Авдась А.С.** Методика и результаты магнитотеллурических зондирований в районе ГТИ им. 50-летия ИВиС // Материалы XIV региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки» 14 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 119-130.

11. **Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.** Региональный и локальный береговой эффекты в магнитотеллурическом поле // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 270-282.

12. **Samoylova O.M.** About three-dimensional coast effect in Kamchatka // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Siberian Early Career GeoScientists Conference 13-24 June 2016. Novosibirsk: IGM SB RAS, IPPG SB RAS, NSU, 2016. P. 409-410.

13. **Мороз Ю.Ф., Самойлова О.М.** Геофизическая модель вулканической зоны южной Камчатки // Материалы Восьмой международной научной конференции «Вулканизм, биосфера и экологические проблемы», 1-6 октября 2016 г. Майкоп: Изд-во «Магарин О.Г.», 2016. С. 93-95.

14. **Самойлова О.М.** Двумерное моделирование данных МТЗ, полученных на юго-восточном побережье Камчатки // Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика» 22-28 мая 2017 г. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2017. С. 203-204.