GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

RECENT GEODYNAMICS

2025 VOLUME 16 ISSUE 6 ARTICLE 0867

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2025-16-6-0867

NEW INSIGHTS INTO THE DEEP STRUCTURE OF THE KUNASHIR ISLAND FROM THE MAGNETOTELLURIC SOUNDING RESULTS

A.A. Chernikh [1]✉, **I.Yu. Koulakov** [2], **I.V. Buddo** [1,3], **A.V. Pospeev** [1]

[1] Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

[2] Skolkovo Institute of Science and Technology, 30-1 Bolshoy Blvd, Moscow 121205, Russia

[3] Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

ABSTRACT. The paper presents the first results of magnetotelluric (MT) sounding on Kunashir Island. MT curves were inverted for one-dimensional inhomogeneous medium using effective apparent-resistivity curves. Deep geoelectrical models of the Mendeleev Volcano's western slope have been compared using deep seismic sounding, earthquake converted-wave method, and potential-field measurement. There have been identified electrical conductivity features of the volcano-sedimentary cover and crustal zone, and an anomalously enhanced electrical conductivity of the crust and mantle, suggesting the presence of modern-day volcanic zones. Recommendations have been formulated on further geo-electrical investigations.

KEYWORDS: magnetotelluric soundings; geoelectrical models; Kunashir Island; potential fields; deep structure; Mendeleev Volcano; Kuril Islands

FUNDING: Not specified.

EDN: HEFUJV

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Alexey A. Chernikh, caa@crust.irk.ru

Received: October 17, 2025
Revised: November 10, 2025
Accepted: November 14, 2025

FOR CITATION: Chernikh A.A., Koulakov I.Yu., Buddo I.V., Pospeev A.V., 2025. New Insights Into the Deep Structure of the Kunashir Island from the Magnetotelluric Sounding Results. Geodynamics & Tectonophysics 16 (6), 0867. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0867

© Chernikh A. A., Koulakov I. Yu., Buddo I. V., Pospeev A. V., 2025

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ о. КУНАШИР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

А.А. Черных[1], **И.Ю. Кулаков**[2], **И.В. Буддо**[1,3], **А.В. Поспеев**[1]

[1] Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
[2] Сколковский институт науки и технологий, 121205, Москва, Большой б-р, 30, стр. 1, Россия
[3] Сибирская школа геонаук ИрНИТУ, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены первые результаты магнитотеллурического зондирования (МТЗ) центральной части о. Кунашир. Инверсия кривых МТЗ выполнена для одномерно-неоднородной среды с использованием эффективных кривых кажущегося сопротивления. Сопоставлены глубинные геоэлектрические модели западного склона вулкана Менделеева с привлечением данных глубинного сейсмического зондирования, метода обменных волн землетрясений и потенциальных полей. Выявлены ключевые особенности электропроводности осадочно-вулканогенного чехла и земной коры; обнаружены коровые и мантийные аномалии повышенной электропроводности, приуроченные к зонам современного вулканизма. Сформулированы рекомендации для последующих геоэлектрических исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитотеллурические зондирования; геоэлектрические модели; остров Кунашир; потенциальные поля; глубинное строение; вулкан Менделеева; Курильские острова

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Не указано.

1. ВВЕДЕНИЕ

Остров Кунашир, южное звено Курильской дуги, характеризуется высокой сейсмичностью, активным вулканизмом и гидротермальной деятельностью, обусловленными субдукцией Тихоокеанской плиты под Охотскую часть Евразийской [Bailey, 1996]. Геологическое строение острова сформировалось в результате многократно повторявшихся циклов вулканизма и осадконакопления. На острове четыре действующих вулкана, из которых Менделеева – один из наиболее доступных в хозяйственно-бытовом и туристическом отношении, однако геофизически он остается слабо изученным из-за плотного растительного покрова и труднопроходимого горного массива. Его термальные источники, фумаролы и грязевые котлы указывают на устойчивую гидротермальную активность и возможное магматическое подпитывание [Avdeiko et al., 2002; Gorshkov, 1967].

Цель работы – построение геоэлектрической модели подповерхностного строения вулкана Менделеева на основе данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Задачи исследования включали сбор и обработку геоэлектрических данных, проведение численной инверсии и построение одномерных геоэлектрических разрезов. Результаты позволят уточнить структурно-геофизическую модель центральной части Кунашира и оценить перспективы развития геотермальных ресурсов, необходимых для повышения эффективности действующей геоэлектростанции (7 МВт), эксплуатируемой в ограниченном режиме.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Курильская островодужная система сформировалась в результате погружения Тихоокеанской океанической плиты под восточную окраину Евразии и включает Курило-Камчатский глубоководный желоб, Большую Курильскую вулканическую гряду и Курильскую глубоководную котловину. При постоянной скорости конвергенции примерно 8.6 см/год возраст океанической коры изменяется с севера на юг – приблизительно от 90 до 118 млн лет. Глубокофокусные землетрясения с глубинами очагов до 650 км отражают значительное погружение океанической плиты в зоне субдукции, что характерно для плит древнего возраста [Bailey, 1996].

Курило-Камчатский желоб заполнен преимущественно океаническими осадками с примесью континентального материала, кремнистым биогенным осадком, вулканическим пеплом, небольшим количеством карбонатов [Ishikawa, Tera, 1997].

Формирование Большой Курильской вулканической гряды началось в олигоцене или раннем миоцене. Ее протяженность превышает 1150 км, ширина – 100–200 км. В пределах дуги выделяют северную, центральную и южную зону. Глубина залегания погружающейся плиты под вулканическим фронтом составляет около 90 км [Syracuse, Abers, 2006]. Мощность земной коры варьируется: от 28–33 км на юге, 25–30 км в центральной части, до 32–36 км на севере [Zlobin, 1987].

Присутствие ксенолитов метаморфических пород в вулканитах подтверждает континентальную природу коры по всей длине дуги. Состав включений варьируется: во фронтальной зоне преобладают оливин-пироксеновые габброиды, реже встречаются алливалиты, троктолиты, эвкриты и гранитоиды (острова Парамушир, Симушир, Кунашир). В тыловой зоне преобладают амфиболовые габбро и гипербазиты [Avdeiko et al., 1992].

Согласно данным U/Pb-датирования цирконов вулканического фундамента и термохронологических исследований пород Кунашира, были уточнены временные рамки их внедрения и последующей эксгумации [De Grave et al., 2016].

Вулканические породы Курил подразделяются на два структурных уровня [Martynov et al., 2010]:

1) нижний уровень – умеренно дислоцированные неогеновые отложения;

2) верхний уровень – плейстоцен-современные вулканиты.

Состав пород варьируется от базальтов до риолитов с преобладанием андезитов (базальтовых).

На о. Кунашир выделяются два комплекса:

– нижний комплекс представлен туфами, туфогенными песчаниками и брекчиями кислого и среднекислого состава. Эти отложения пронзают многочисленные субвулканические тела андезитов, дацитов, риолитов, а также глубинные интрузии гранодиорит-порфирового состава [Vergunov, 1961; Sergeev, 1976];

– верхний комплекс сложен лавовыми потоками базальтов и базальтовых андезитов, мелкими субвулканическими телами и современными андезитовыми стратовулканами.

Возраст нижнего комплекса – поздний миоцен – плиоцен. Он подразделяется на рыбаковскую и камуйскую свиты. Рыбаковская свита, приуроченная к наиболее эксгумированным блокам на севере острова, состоит преимущественно из андезитовых вулканитов и соответствует миоценовой свите зеленых туфов по [Martynov et al., 2010] Камуйская свита сложена флишеподобными вулканогенно-осадочными толщами с преобладанием дацитовых пемз мощностью более 1100 м.

Верхний комплекс представлен фрегатской свитой, перекрывающей рыбаковскую и камуйскую свиты с выраженным структурно-эрозионным несогласием. Он сложен субаэральными базальт-андезитовыми лавами, туфами, гиалокластитами и брекчиями [Syvorotkin, Rusinova, 1989]. Породы формировались преимущественно в надводных условиях, с эпизодическим осаждением в мелководной обстановке. Фрегатская свита формирует вулканическое плато, позднее расчлененное тектоническими движениями, что обусловило столообразный рельеф Кунашира. Возраст свиты – поздний плиоцен – ранний плейстоцен (по диатомеям и палинологии), что согласуется с K-Ar данными.

Рыбаковская свита формировалась исключительно в субаквальных условиях, тогда как вулканиты камуйской свиты имели субаэральный характер на севере и в центре и подводный – на юге острова. Во второй половине плиоцена происходило интенсивное тектоническое поднятие, вызвавшее резкий вертикальный дисбаланс между камуйской и фрегатской свитами. В результате сформировалось несогласие: на севере острова произошло поднятие более чем на 1 км, тогда как на юге оно составило 200–300 м. Деформации среднего – позднего миоцена, зафиксированные в работе [Sergeev, 1976], сопровождались складчатостью, внедрением интрузий и подъемом с денудацией на 1.5 км.

Четыре современных стратовулкана (плейстоцен – голоцен) существенно формируют рельеф острова. Они представлены чередующимися лавовыми и туфовыми толщами преимущественно базальт-андезитового и андезитового состава, с незначительным участием дацитов. Современный вулканизм ассоциирован с субдукцией Тихоокеанской плиты под Охотскую [Nakagawa et al., 2002]. Вулкан Тятя – один из наиболее активных и изученных в Курильской дуге.

Субвулканические тела пронизывают как нижний, так и верхний комплекс. В рыбаковской свите это штоки, дайки и силлы базальтового, андезитового и дацитового состава. В камуйской свите преобладают дацитовые интрузии. Глубинные интрузии представлены двумя комплексами:

1. Комплекс Прасолова – габбро, диорит, гранодиорит, тоналит и плагиогранит, включает массивы Прасолова, Мечникова и Лобанова. Прасоловский массив (18 км^2) на северо-востоке острова контактирует с породами рыбаковской свиты, преимущественно тектонически, реже – интрузивно, с ореолами кварц-биотитовых роговиков. Возраст – поздний миоцен – плиоцен, подтверждается K-Ar датировками (61±12 – 10 млн лет, чаще 11–10 млн лет) [Rybin, Danchenko, 1994].

2. Комплекс Докучаева – более молодой, включает мелкие штоки тоналит-порфира, гранодиорит-порфира и диорит-порфира, пересекающие камуйскую свиту. Включает массивы Докучаева, Валентины и Орлова. Валентина, на Охотском побережье, имеет преимущественно тектонические контакты. Комплекс датируется плиоценом (K-Ar: 6.5–4.2 млн лет).

С учетом того, что геодинамическая эволюция Курильской дуги определяется субдукцией древней океанической плиты и сопровождается резкой латеральной и вертикальной изменчивостью состава и мощности коры, ее современное строение остается дискуссионным. Сейсморазведочные, гравиразведочные и литолого-петрологические данные уточняют лишь отдельные элементы модели, но не позволяют однозначно проследить глубинные границы континентальной и океанической коры, локализовать зоны плавления и флюидонасыщенные разломы, контролирующие питание активных вулканов и размещение интрузивных массивов. МТЗ, чувствительное к вариациям электропроводности горных пород, прямо реагирует на присутствие расплавов, горячих флюидов и разуплотненных тектонических зон. Таким образом, применение МТЗ является необходимым этапом исследования глубинного строения Курильской островной дуги.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метод МТЗ был разработан в 1950 г. советским геофизиком А.Н. Тихоновым, а позже был дополнен исследованиями французского ученого Л. Каньяра. Важный вклад в развитие теории МТЗ внесли М.Н. Бердичевский

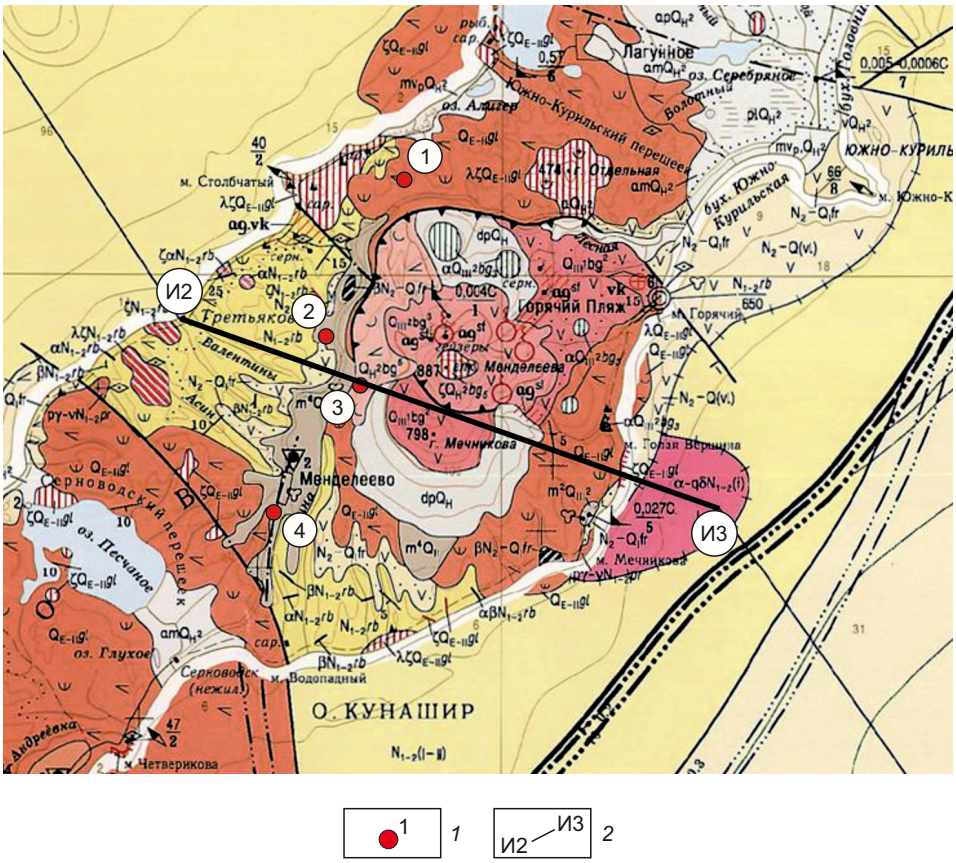
и В.И. Дмитриев. На сегодняшний день МТЗ широко применяется в геофизике для изучения глубинного строения Земли.

Магнитотеллурическое зондирование представляет собой вид индукционного частотного зондирования с неконтролируемым источником электромагнитного поля. МТ-поле формируется за счет природных источников – токов в ионосфере и магнитосфере, грозовой активности и солнечного ветра. В результате скин-эффекта высокочастотные компоненты электромагнитного поля быстрее затухают и дают информацию о приповерхностных слоях, тогда как низкочастотные колебания способны проникать на большие глубины, позволяя исследовать глубинное строение геоэлектрического разреза [Berdichevsky, Dmitriev, 2009].

Магнитотеллурические исследования были выполнены вдоль западного склона вулкана Менделеева, зарегистрировано 4 точки наблюдения (рис. 1). Расстояние между пунктами зондирований варьировалось от 2 до 5 км в зависимости от транспортной доступности и шумовых условий. Горизонтальные электрические (E_x, E_y) и магнитные компоненты (H_x, H_y) магнитотеллурического поля регистрировались аппаратурой MTU-5 канадской фирмы Phoenix Geophysics в диапазоне периодов 0.003–3000 с. Использовалась крестообразная установка с длиной электрических диполей 50 м, ориентированная по сторонам света; средняя длительность записи составляла 21 ч.

Перед проведением количественной интерпретации на этапе построения концептуальной геоэлектрической модели [Berdichevsky, Dmitriev, 2004] был проведен предварительный анализ материалов. С привлечением априорной геологической и геофизической информации о районе работ и на основе анализа измеренных компонент тензора импеданса оценена размерность и ориентировка геоэлектрических структур в плане. Анализ формы полярных диаграмм импеданса дает возможность оценить размерность геоэлектрических неоднородностей [Berdichevsky, Logunovich, 2005]. На рис. 2 представлены четыре характерных типа диаграмм: 1 – слабо выраженная анизотропия, вероятно соответствующая 1D или переходной 2D-структуре; 2 – вытянутые контуры, указывающие на 2D-геоэлектрическую среду с четко выраженным направлением простирания; 3 – сложная многолепестковая форма, характерная для 3D-неоднородностей; 4 – асимметричные эллипсы, отражающие 2D-структуру или локальную 3D-неоднородность.

Интересная особенность в поведении полярных диаграмм наблюдается в пунктах 2 и 3. Здесь на всех



1 1 И2 И3 2

Рис. 1. Схема расположения точек МТЗ на о. Кунашир (по [State Geological Map..., 2002]). *1* – пункты наблюдения МТЗ; *2* – линия разреза И2–И3.

Fig. 1. Location map of magnetotelluric sounding (MTS) stations on the Kunashir Island [State Geological Map..., 2002]. *1* – MTS observation sites; *2* – И2–И3 cross-section line.

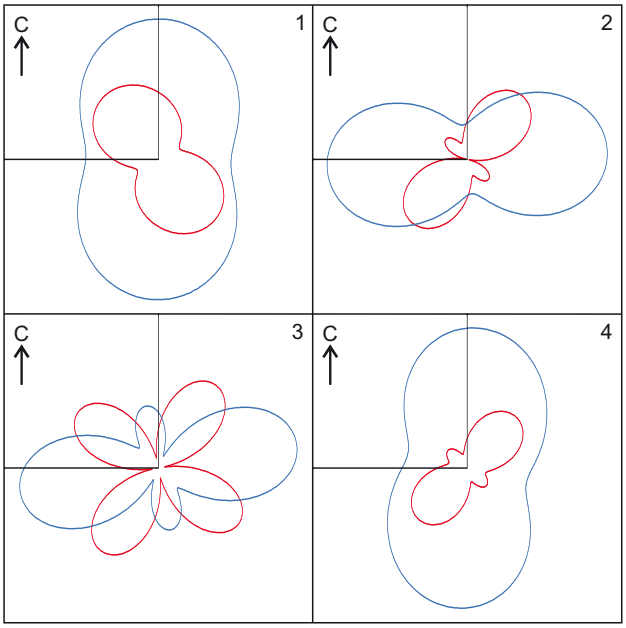


Рис. 2. Полярные диаграммы импеданса при $\sqrt{T}=4c^{1/2}$. Синий цвет – полярные диаграммы Z_{xy}; красный – Z_{xx}.

Fig. 2. Impedance polar diagrams at $\sqrt{T}=4c^{1/2}$. Blue curves correspond to the Z_{xy} impedance component; red curves represent the Z_{xx} component.

периодах происходит смена простирания модели разреза, т.е. кривые 1 и 2 совпадают с простиранием неоднородности, а кривые 2 и 3 расположены вкрест этого направления. Такие кривые не подлежат интерпретации в рамках 1D-модели, поэтому, начиная с этих периодов, кривые Z_{xy}, Z_{yx}, φ_{xy}, φ_{yx} меняются местами, а затем рассчитываются кривые ρ_k. Эта особенность, вероятнее всего, связана с тем, что данные пункты наблюдения расположены в непосредственной близости с разломом, ограничивающим вулканотектоничские структуры (разломы).

Обработка данных осуществлялась в программном комплексе Epi-Kit (ООО «Северо-Запад») и состояла из следующих этапов:

– просмотр и редакция временных рядов записей электромагнитного поля;

– спектральный анализ в частотной области;

– оценка компонент комплексного тензора импеданса на основе робастного решения переопределенных систем, связывающих фильтрованные компоненты поля;

– редактирование результатов обработки (кривых МТЗ).

В результате обработки получены гладкие частотные зависимости передаточных функций. Главные компоненты тензора импеданса пересчитывались в кривые кажущегося сопротивления.

Результативные кривые приведены на рис. 3.

Кривые кажущегося сопротивления ρ_{xy} и ρ_{yx} расходятся по уровню почти на порядок. Это свидетельствует о статическом сдвиге, вызванном локальными приповерхностными геоэлектрическими неоднородностями. На данном этапе исследований учет статического сдвига не представляется возможным по причине недостаточного объема данных, не позволяющего применить пространственную фильтрацию или осреднение, в том числе полиномиальную аппроксимацию. Дополнительные данные, например зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), отсутствуют. Отсутствие коррекции статического сдвига влияет главным образом на абсолютные значения кажущегося сопротивления (ошибка до порядка), однако не искажает фаз и не меняет относительное глубинное положение аномалий [Sternberg et al., 1988], поэтому интерпретацию следует рассматривать как надежную в относительном и структурном плане, при оговорке возможного смещения уровней сопротивлений.

Для оценки берегового эффекта в районе можно обратиться к численному двумерному моделированию магнитотеллурического поля. В основу моделирования положена пробная модель, в которой мощность и удельное электрическое сопротивление суши приняты постоянными, чтобы оценить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенного чехла.

Двумерная модель приведена на рис. 4. Верхний слой на суше имеет мощность 3 км, а удельное электрическое сопротивление – 100 Ом·м, удельное электрическое сопротивление морской воды – 0.25 Ом·м. Эти параметры были получены по данным вертикальных электрических зондирований из фондовых материалов [Gollerbakh, 1971]. Глубинные геоэлектрические разрезы континента и дна океана взяты из работы [Vanyan, Shilovsky, 1983] для теплового потока 90 мВт/м^2 и возраста дна омывающих морей и океана 40 млн лет [Rodnikov et al., 2005]. Астеносферный слой закартирован

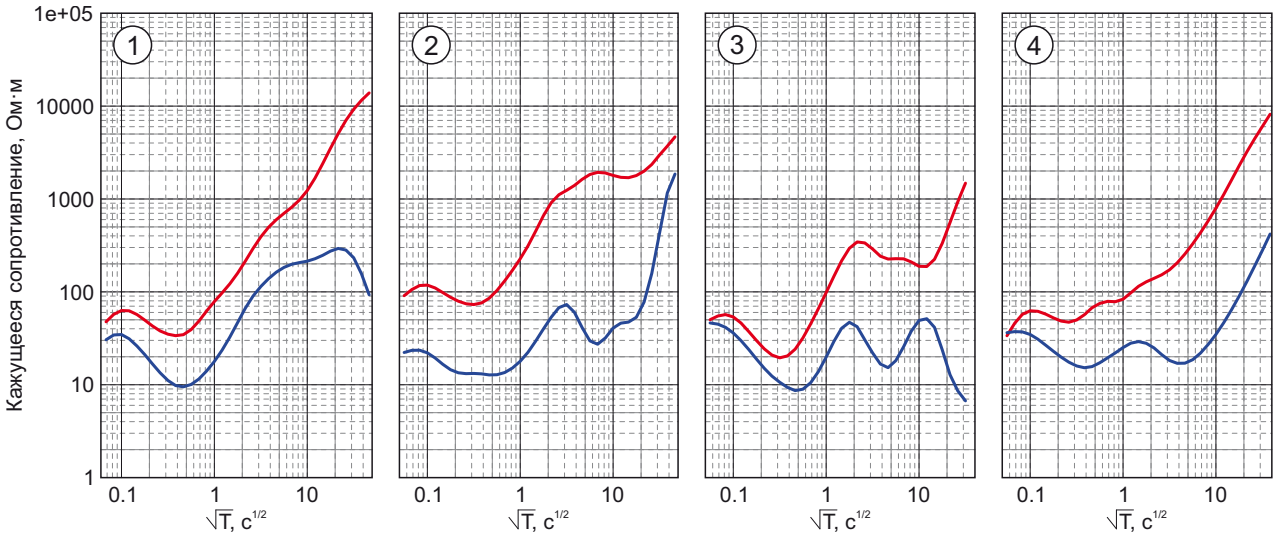


Рис. 3. Амплитудные кривые МТЗ. Синий цвет – кривые ρ_{xy}, красный – ρ_{yx}.

Fig. 3. Magnetotelluric amplitude curves. Blue lines represent ρ_{xy} apparent resistivity curves and red lines correspond to ρ_{yx}.

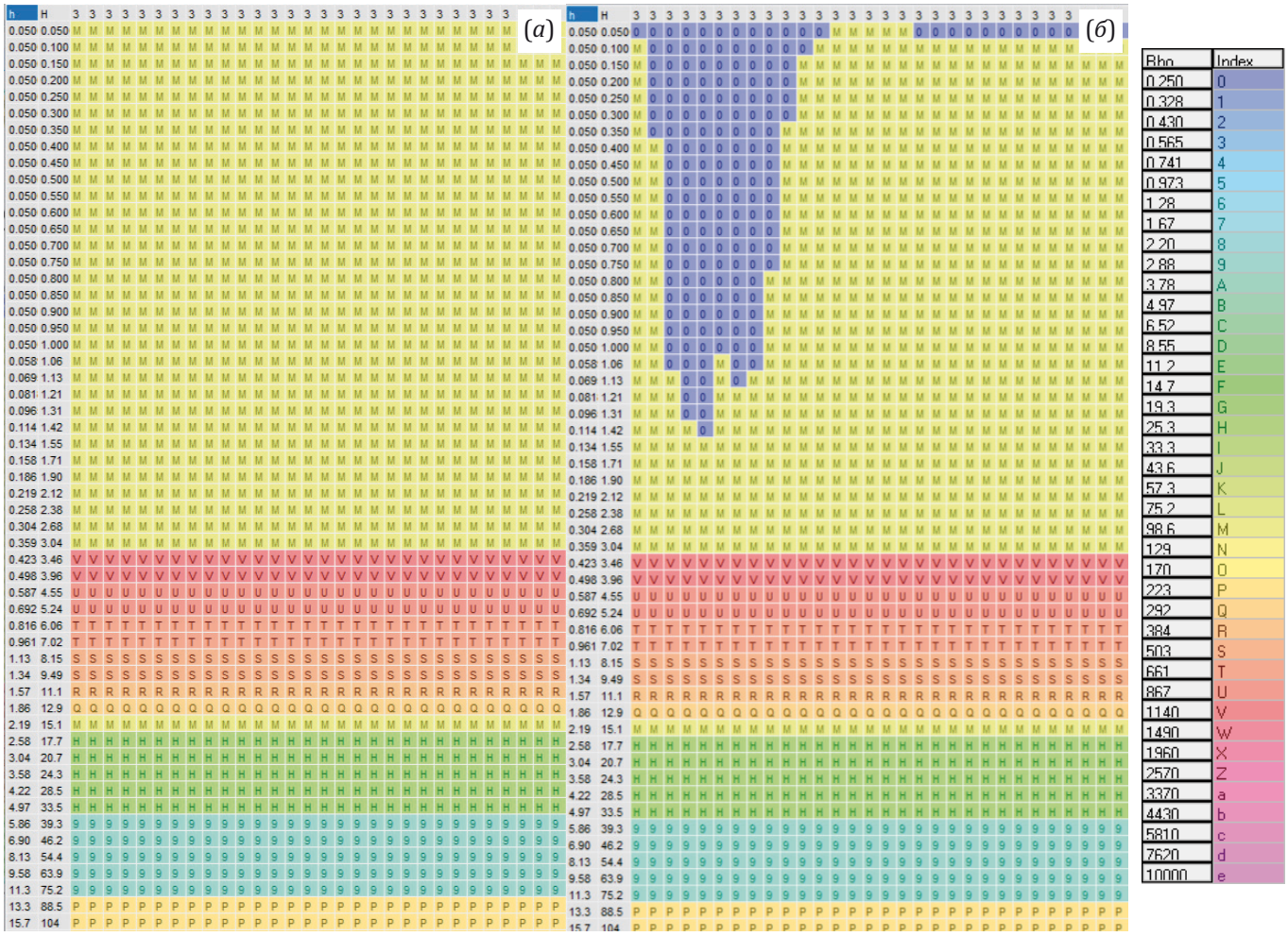


Рис. 4. Двумерные геоэлектрические модели. (*а*) – модель без учета морей и океанов; (*б*) – модель с учетом морской акватории вокруг о. Кунашир.

Fig. 4. Two-dimensional geoelectrical models. (*a*) – model without considering seas and oceans; (*б*) – model considering the marine environment surrounding the Kunashir Island.

на глубине 40–70 км и имеет сопротивление 2.25 Ом·м. Информация о глубинах Тихого океана и Охотского моря взята из [GEBCO, 2024].

На рис. 5 приведены результаты двумерного моделирования кривых кажущегося сопротивления с учетом батиметрической карты района исследования. Для пробной модели без влияния морей и океанов (рис. 5, а) характерно совпадение компонент импеданса и более высокая амплитуда кажущегося сопротивления, в то время как модель о. Кунашир с береговой линией (рис. 5, б) демонстрирует выраженную анизотропию отклика и снижение значений H-поляризации во всем диапазоне периодов, особенно заметное в интервале 1–30 с. Это отражает перераспределение токов за счет высокой проводимости морской воды и формирование берегового эффекта, изменяющих форму и уровень кривых. Учет таких искажений при интерпретации реальных данных, полученных на острове, обязателен, так как пренебрежение ими может привести к существенным ошибкам в оценке сопротивления глубинных горизонтов и неверной глубинной привязке аномалий.

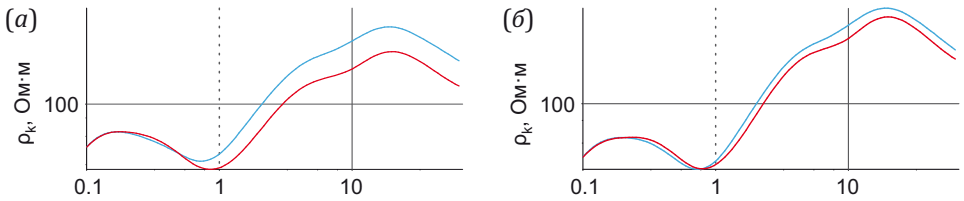


Рис. 5. Кривые кажущегося сопротивления.
(*а*) – кривые без влияния морей и океанов, (*б*) – кривые с учетом влияния морей и океанов. Синий цвет – кривые E-поляризации, красный – H-поляризации.

Fig. 5. Apparent resistivity curves.
(*а*) – curves without the influence of seas and oceans; (*б*) – curves considering the surrounding marine environment. Blue lines represent E-polarization curves, red lines correspond to H-polarization.

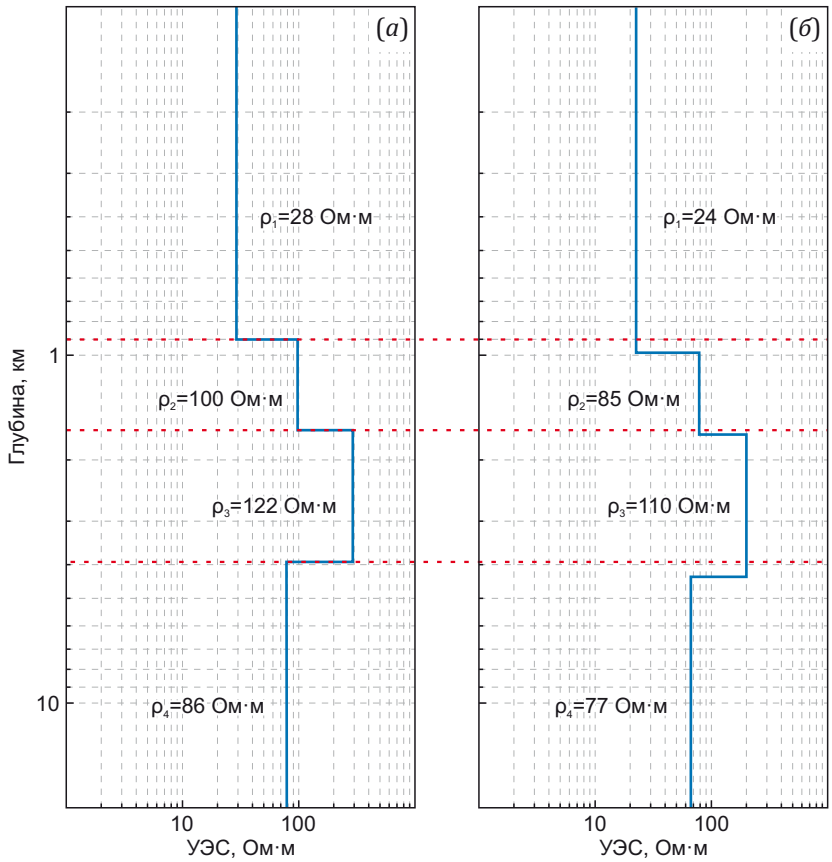


Рис. 6. Одномерные модели удельного электрического сопротивления (УЭС), полученные по эффективным кривым для синтетических данных. (*а*) – модель без влияния морей и океанов; (*б*) – модель о. Кунашир с учетом морей и океанов.

Fig. 6. One-dimensional resistivity models derived from effective curves for synthetic data. (*а*) – model without the influence of seas and oceans; (*б*) – model of Kunashir Island considering the surrounding marine environment.

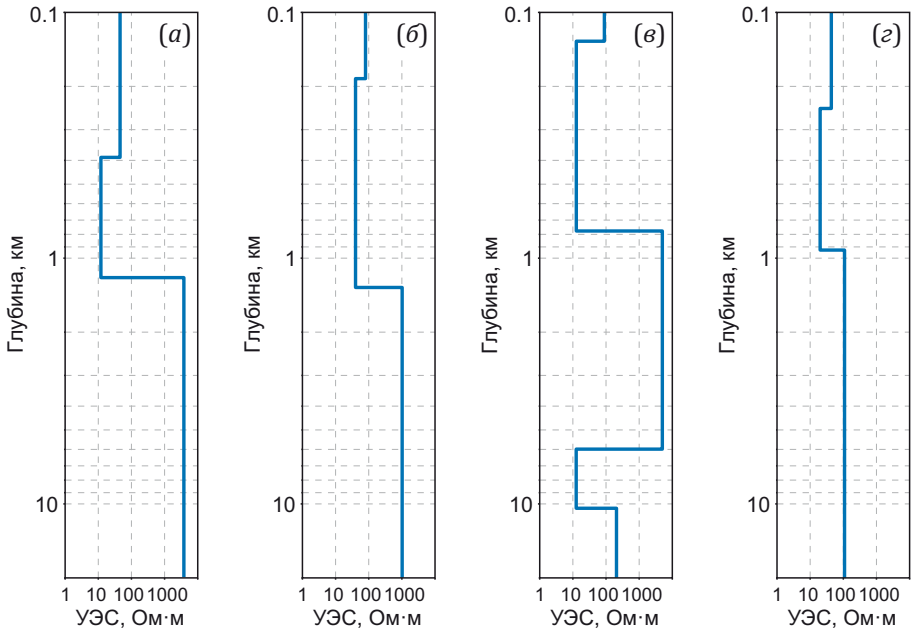


Рис. 7. Одномерные геоэлектрические модели.
Fig. 7. One-dimensional geoelectrical models.

Для количественной оценки влияния берегового эффекта была выполнена одномерная инверсия синтетических данных, рассчитанных для обеих моделей – с учетом и без учета морской воды. Инверсия проводилась по эффективным кривым кажущегося сопротивления и фазы, полученным путем усреднения откликов TE- и TM-поляризаций. На рис. 6 представлены результаты 1D-инверсии для обеих моделей.

Сравнение результатов для двух моделей показало, что присутствие морской воды приводит к занижению значений кажущегося сопротивления и смещению границ проводящих слоев вглубь, особенно в диапазоне периодов 1–30 с. Относительная погрешность определения глубины кровли и УЭС составляет порядка 5–10 %. С учетом выявленного влияния берегового эффекта одномерная инверсия является допустимым вариантом для первичной интерпретации данных.

Для дальнейшей интерпретации наблюденных данных была выполнена одномерная инверсия кривых кажущегося сопротивления. Для получения первичной модели инверсия проводилась в программе LineInterMt по эффективным кривым. Инверсия выполнялась методом подбора до достижения погрешности в 5 %. В результате инверсии получены одномерные геоэлектрические модели (рис. 7).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами был оцифрован геологический разрез [State Geological Map..., 2002] и графики гравитационного и магнитного полей, что позволило провести их сопоставление с построенными геоэлектрическими моделями. По особенностям распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) на геоэлектрических моделях 2 и 3 (рис. 7), наиболее близких к геологическому разрезу И2–И3, выделяется три слоя. Верхняя часть разреза, вероятно представленная лавой и туфами андезибазальтов, андезитов и базальтов, характеризуется средними значениями УЭС 50–80 Ом·м. Общая мощность этого слоя изменяется с севера на юго-запад от 200 до 450 м. Второй слой, предположительно сложенный песчаниками и гравелитами, имеет УЭС от 10 до 25 Ом·м и мощность от 700 до 1000 м. Третий слой, вероятно соответствующий интрузивному массиву, характеризуется УЭС порядка ~1000 Ом·м, с кровлей, залегающей на глубинах от 900 до 1300 м.

Исходные данные позволяли лишь ориентировочно определить геометрию интрузивного тела. В ходе настоящей работы предполагаемая форма массива была уточнена и приведена к более согласованной интерпретации на основе сопоставления геоэлектрической модели с геологическими и геофизическими материалами (рис. 8). Данная структура находит отражение и в наблюдаемых аномалиях магнитного поля.

Для более детального анализа глубинного строения нами также выполнено сопоставление геоэлектрической модели № 3, построенной в районе вулкана Менделеева, с результатами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) и методом обменных волн землетрясений (МОВЗ) [Zlobin et al., 2014] (рис. 9), что выявило хорошую согласованность между различными геофизическими данными относительно строения земной коры в исследуемом районе.

На основании комплексного анализа данных были выделены пять основных геоэлектрических слоев:

– первый слой приурочен к верхней части приповерхностной зоны, характеризуется мощностью порядка

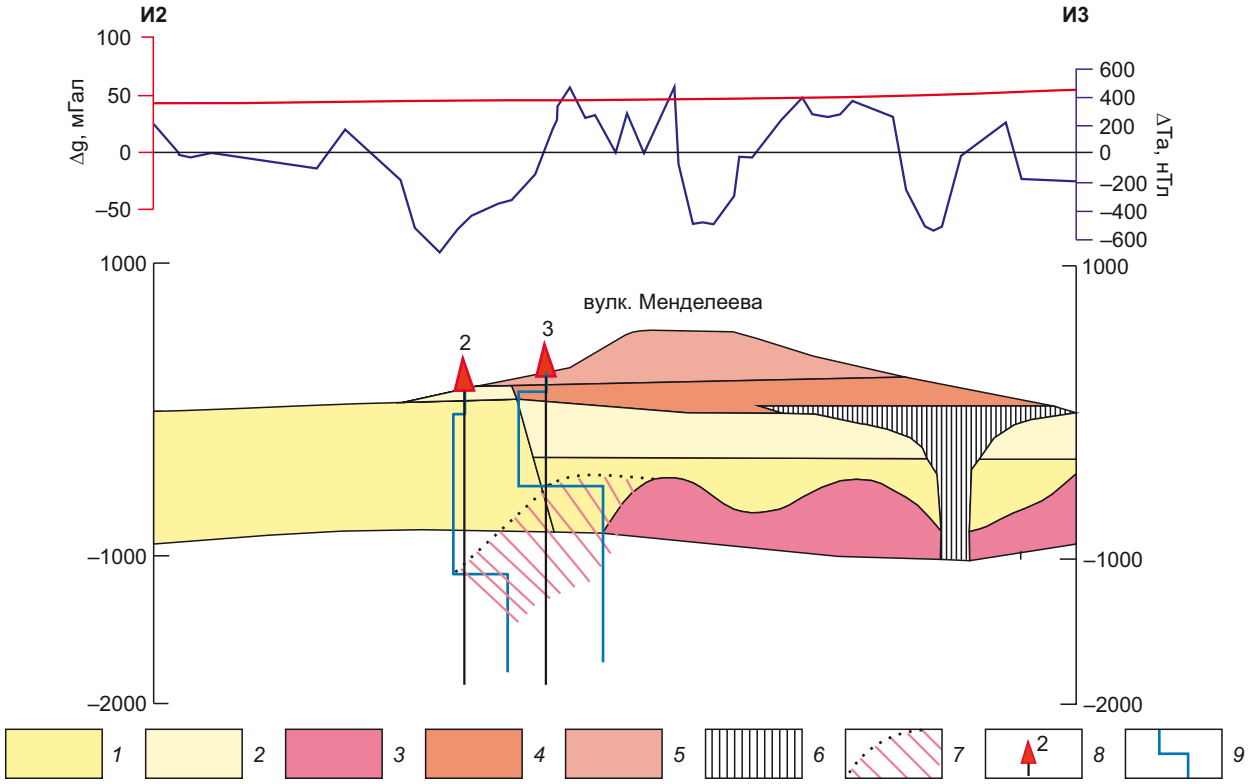


Рис. 8. Геологический разрез по линии И2–И3 [State Geological Map..., 2002] с вынесенными моделями 2 и 3.
1 – рыбаковская свита; *2* – фрегатская толща; *3* – интрузивный массив, построенный по данным сейсморазведки (МОВ ОГТ); *4* – головнинская свита; *5* – нерасчлененные образования богатырской толщи; *6* – экструзии и жерловые образования дацитов; *7* – интрузивный массив, интерпретированный по данным МТЗ; *8* – пункт наблюдения МТЗ; *9* – геоэлектрическая модель.

Fig. 8. Geological cross-section along И2–И3 line [State Geological Map..., 2002] with brought-in models 2 and 3.
1 – Rybakov formation; *2* – Fregat formation; *3* – intrusive massif idenfified from seismic data (CDP reflection); *4* – Golovnin formation; *5* – undissected deposits of the Bogatyr formation; *6* – dacitic extrusions and vent structures; *7* – intrusive massif interpreted from MTS; *8* – magnetotelluric sounding (MTS) station; *9* – geoelectrical model.

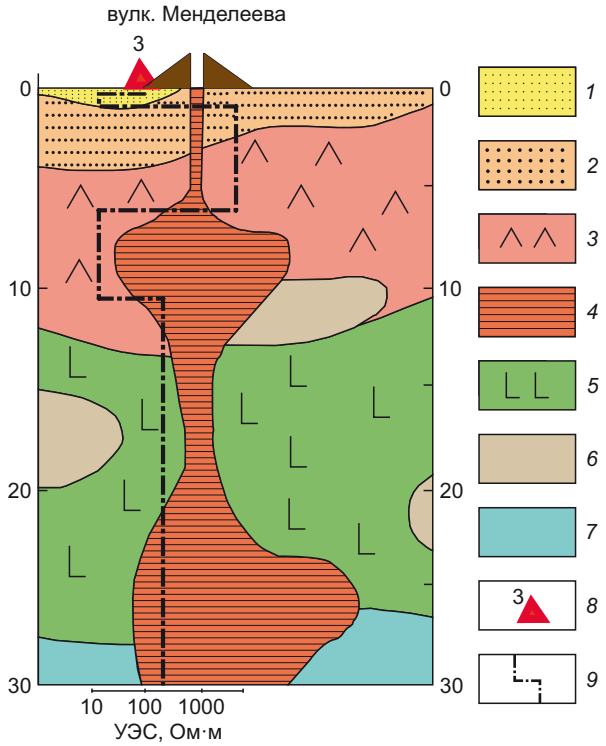


Рис. 9. Фрагмент продольного глубинного разреза по данным МОВЗ и ГСЗ через о. Кунашир [Zlobin et al., 2014] с предложенной одномерной геоэлектрической моделью 3.
1 – верхнемиоцен-четвертичный комплекс; *2* – верхнеолигоцен-миоценовый комплекс; *3* – геосинклинальный комплекс верхнего мела и палеогена, предположительно, по интерпретации [Zlobin et al., 2014]; *4* – расслоенные магматические очаги; *5* – палеозойское основание; *6* – дифференцированные интрузивные тела базальтов – более ранние порции базальтовых магм; *7* – базальтовый слой; *8* – пункт наблюдения МТЗ; *9* – геоэлектрическая модель.

Fig. 9. A fragment of longitudinal depth section across the Kunashir Island [Zlobin et al., 2014] based on the CDP and DSS data with the proposed one-dimensional geoelectric model 3.
1 – Upper Miocene – Quaternary complex; *2* – Upper Oligocene – Miocene complex; *3* – supposedly Upper Cretaceous – Paleogene geosynclinal complex (after [Zlobin et al., 2014]); *4* – stratified magmatic chambers; *5* – Paleozoic basement; *6* – differentiated basalt intrusive bodies representing earlier portions of basaltic magma; *7* – basalt layer; *8* – magnetotelluric sounding (MTS) station; *9* – geoelectrical model.

150 м и удельным сопротивлением около 80 Ом·м. Эти параметры соответствуют слабоконсолидированным вулканогенно-осадочным породам;

– второй слой ассоциируется с четвертичным комплексом, обладает мощностью около 600 м и пониженным удельным сопротивлением порядка 15 Ом·м, что, вероятно, связано с высокой степенью водонасыщенности и рыхлостью пород;

– третий слой объединяет отложения верхнего олигоцена – миоцена и верхнего мела – палеогена, с суммарной мощностью до 6 км и высоким удельным сопротивлением около 1000 Ом·м, что указывает на преобладание плотных, слаботрещиноватых пород;

– четвертый слой интерпретируется как область гидротермальной или магматической активности либо остаточного магматического очага. Он характеризуется мощностью около 5.5 км и удельным сопротивлением порядка 15 Ом·м, что может свидетельствовать о высокой трещиноватости пород, насыщенности флюидной фазой или присутствии частично расплавленного материала;

– пятый слой залегает на глубине около 10.5 км и представлен базальтовыми образованиями с удельным сопротивлением порядка 200 Ом·м, что соответствует плотным магматическим породам, характерным для нижней части земной коры в данном регионе.

Выявленная структура демонстрирует высокую степень соответствия между электромагнитными и сейсмическими данными, что подтверждает достоверность построенной геоэлектрической модели. Совпадение ключевых стратиграфических границ и особенностей геофизических характеристик позволяет утверждать, что предложенная модель адекватно отражает реальное строение земной коры в районе вулкана Менделеева.

5. ДИСКУССИЯ

Результаты МТЗ на западном склоне вулкана Менделеева демонстрируют сложное строение глубинных слоев о. Кунашир, включая зоны с повышенной проводимостью, которые могут указывать на активные гидротермальные и магматические процессы. Однако высокая степень неопределенности, связанная с ограничениями метода МТЗ, требует применения дополнительных методов или более густой сети наблюдения для получения более точной интерпретации.

Для дальнейшего изучения вулкана Менделеева необходимо применение более густой сети наблюдения. Это позволит учесть смещение кривых МТЗ по уровню при помощи полинома, а также устранить двумерные и трехмерные эффекты, связанные с влиянием морей и океанов.

Дополнительным инструментом для повышения точности интерпретации может служить метод мЗСБ. Данный метод эффективен как для устранения смещения уровня МТ кривых, вызванного статическим эффектом, так и для детального изучения верхней части геоэлектрического разреза. Благодаря высокой чувствительности к структурам верхних слоев, мЗСБ способствует улучшению согласования геоэлектрической модели с данными по верхней части разреза. Это особенно актуально при интерпретации данных в районах со сложной стратиграфией и выраженной неоднородностью поверхностных отложений. Совместное использование мЗСБ с МТЗ способствует улучшению качества инверсии и повышает надежность получаемых геоэлектрических моделей.

Комплексирование МТЗ с методами пассивной сейсмики представляется перспективным направлением для дальнейших исследований [Moroz, Samoilova, 2013]. Совместная инверсия магнитотеллурических и сейсмических данных позволит значительно уменьшить неопределенность в геоэлектрических моделях и уточнить глубинное строение исследуемой зоны. Использование данных о структуре, полученной по данным пассивной сейсморазведки, дополнительно к электромагнитным характеристикам, позволит повысить точность интерпретации зон аномальной проводимости и глубинных магматических очагов.

В 2024–2025 гг. на территории острова функционировала сейсмическая сеть, включавшая 21 сейсмоприемник, демонтаж выполнен в июне 2025 г. Полученные данные планируется использовать для комплексирования с результатами МТЗ с целью уточнения глубинного строения.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения МТЗ на восточном склоне вулкана Менделеева был построен глубинный геоэлектрический разрез земной коры о. Кунашир. Сопоставление полученных данных с результатами других геофизических исследований позволило уточнить строение глубинных слоев и выявить зоны повышенной проводимости, которые интерпретируются как области активных гидротермальных или магматических процессов. Проведенное исследование показало высокую эффективность метода МТЗ для изучения геоэлектрического строения сложных вулканических систем. В перспективе для повышения точности интерпретации рекомендуется увеличение плотности сети наблюдений, применение методов, мЗСБ, а также комплексирование электромагнитных данных с результатами пассивной сейсморазведки.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность В.А. Тупицыну за содействие в обработке материалов и методическую поддержку.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Avdeiko G.P., Antonov A.Yu., Volynets O.N., Bondarenko V.I., Rashidov V.A., Gladkov N.G., Tsvetkov A.A., Markov I.A., Palueva A.A., 1992. Subaqueous Volcanism and Zonality of the Kuril Island Arc. Nauka, Moscow, 528 p. (in Russian) [Авдейко Г.П., Антонов А.Ю., Волынец О.Н., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Гладков Н.Г., Цветков А.А., Марков И.А., Палуева А.А. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 1992. 528 с.].

Avdeiko G.P., Popruzhenko S.V., Palueva A.A., 2002. The Tectonic Evolution and Volcano-Tectonic Zonation of the Kuril-Kamchatka Island-Arc System. Geotectonics 36 (4), 312–327.

Bailey J.C., 1996. Role of Subducted Sediments in the Genesis of Kuril-Kamchatka Island Arc Basalts: Sr Isotopic and Elemental Evidence. Geochemical Journal 30, 289–321. https://doi.org/10.2343/geochemj.30.289.

Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I., 2004. Inverse Problems of Magnetotellurics: A Modern Formulation. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 40 (4), 276–292.

Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I., 2009. Models and Methods of Magnetotellurics. Nauchny Mir, Moscow, 680 p. (in Russian) [Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.].

Berdichevsky M.N., Logunovich R.F., 2005. Magnetotelluric Polar Diagrams. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 41 (10), 832–843.

De Grave J., Zhimulev F.I., Glorie S., Kuznetsov G.V., Evans N., Vanhaecke F., McInnes B., 2016. Late Palaeogene Emplacement and Late Neogene–Quaternary Exhumation of the Kuril Island-Arc Root (Kunashir Island) Constrained by Multi-Method Thermochronometry. Geoscience Frontiers 7 (2), 211–220. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.05.002.

GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024, 2024. The GEBCO_2024 Grid – a Continuous Terrain Model of the Global Oceans and Land. NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC. https://doi.org/10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f.

Gollerbakh A.E., 1971. Report on Geophysical Survey at the Goryachij Plyazh Steam Hydrothermal Deposit (Kunashir Island). Sakhalin GS, 69 p. (in Russian) [Голлербах А.Э. Отчет о геофизических работах, проведенных на месторождении парогидротерм «Горячий Пляж» (о. Кунашир). Сахалинское ГУ, 1971. 69 с.].

Gorshkov G.S., 1967. Volcanism of the Kuril Island Arc. Nauka, Moscow, 288 p. (in Russian) [Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 288 с.].

Ishikawa T., Tera F., 1997. Source, Composition and Distribution of the Fluid in the Kuril Mantle Wedge: Constrain from Across-Arc Variations of B/Nb and B Isotopes. Earth and Planetary Science Letters 152 (1–4), 123–138. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00144-1.

Martynov Yu.A., Khanchuk A.I., Kimura J.-I., Rybin A.V., Martynov A.Yu., 2010. Geochemistry and Petrogenesis of Volcanic Rocks in the Kuril Island Arc. Petrology 18 (5), 489–513. https://doi.org/10.1134/S0869591110050048.

Moroz Yu.F., Samoilova O.M., 2013. The Deep Structure of the Southern Kamchatka Volcanic Zone from Geophysical Data. Journal of Volcanology and Seismology 7 (2), 99–111. https://doi.org/10.1134/S074204631302005X.

Nakagawa M., Ishizuka Y., Kudo T., Yoshimoto M., Hirose W., Ishizaki Y., Gouchi N., Katsui Y., Solovyow A.W. et al., 2002. Tyatya Volcano, Southwestern Kuril Arc: Recent Eruptive Activity Inferred from Widespread Tephra. The Island Arc 11 (4), 236–254. https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.2002.00368.x.

Rodnikov A.G., Zabarinskaya L.P., Piip V.B., Rashidov V.A., Sergeyeva N.A., Filatova N.I., 2005. The Okhotsk Sea Geotraverse. Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences 5, 45–58 (in Russian) [Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И. Геотраверс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2005. № 5. С. 45–58].

Rybin A.V., Danchenko V.Ya., 1994. Intrusive Rocks of the Great Kuril Ridge: Petrography and Petrogenesis. IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, 58 p. (in Russian) [Рыбин А.В., Данченко В.Я. Интрузивные породы Большой Курильской гряды: петрография и петрогенезис. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1994. 58 с.].

Sergeev K.F., 1976. Tectonics of the Kuril Island System. Nauka, Moscow, 240 p. (in Russian) [Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2002. Kuril Series. Scale of 1:200000. Sheets K-55-II, L-55-XXXII. VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Курильская. Масштаб 1:200000. Листы K-55-II, L-55-XXXII. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002].

Sternberg B.K., Washburne J.C., Pellerin L., 1988. Correction for the Static Shift in Magnetotellurics Using Transient Electromagnetic Soundings. Geophysics 53 (11), 1459–1468. https://doi.org/10.1190/1.1442426.

Syracuse E.M., Abers G.A., 2006. Global Compilation of Variations in Slab Depth Beneath Arc Volcanoes and Implications. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 7 (5), Q05017. https://doi.org/10.1029/2005GC001045.

Syvorotkin V.L., Rusinova S.V., 1989. Are There Any Lava Plateaus on the Kunashir Island? Russian Journal of Pacific Geology 4, 103–108 (in Russian) [Сывороткин В.Л., Русинова С.В. Есть ли лавовые плато на о. Кунашир? // Тихоокеанская геология. 1989. № 4. С. 103–108].

Vanyan L.L., Shilovsky P.P., 1983. Deep Electrical Conductivity of the Oceans and Continents. Nedra, Moscow, 88 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л., Шиловский П.П. Глубинная электропроводность океанов и континентов. М.: Недра, 1983. 88 с.].

Vergunov G.P., 1961. On Intrusive Rocks of Southern Kuril Islands (Shikotan, Kunashir, Urup). Russian Geology and Geophysics 2 (5), 77–80 (in Russian) [Вергунов Г.П. Об интрузивных породах южных Курильских островов (Шикотан, Кунашир и Уруп) // Геология и геофизика. 1961. Т. 2. № 5. С. 77–80].

Zlobin T.K., 1987. Crustal and Upper Mantle Structure in the Kuril Island Arc (from the Seismic Data). FESC AS USSR, Vladivostok, 150 p. (in Russian) [Злобин Т.К. Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги (по сейсмическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 150 с.].

Zlobin T.K., Polets A.Yu., Penkovaya O.V., 2014. Deep Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle of Active Volcanoes on Kuril Islands and Earthquake Foci. Space and Time 3 (17), 220–230 (in Russian) [Злобин Т.К., Полец А.Ю., Пеньковая О.В. Глубинное строение литосферы под действующими вулканами Курильских островов и очаги землетрясений // Пространство и время. 2014. № 3 (17). С. 220–230].