

УДК 550.837

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ В РАЙОНЕ ТТИ ИМ. 50-ЛЕТИЯ ИВИС

Логинов В.А.^{1,2}, Самойлова О.М.¹, Улыбышев И.С.^{1,2}, Авдась А.С.^{1,2}

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

²*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга*

Научный руководитель д.г.-м.н. Мороз Ю.Ф.

Рассмотрена методика наблюдений и интерпретации магнитотеллурического зондирования. Показано, что в первом приближении геологическая среда может быть аппроксимирована двумерно-неоднородной моделью. На основании этого, выполнена инверсия кривых АМТЗ и МТЗ с помощью программы численного двумерного моделирования МТ поля (по алгоритму Maskie R.L). В результате инверсии получены несколько геоэлектрических разрезов, характеризующих структуру электропроводности земной коры и верхней мантии до глубины 60 км.

Ключевые слова: Трещинное Толбачинское извержение, магнитотеллурическое зондирование, тензор импеданса, геоэлектрический разрез.

ВВЕДЕНИЕ

На Камчатке в районе Толбачинского дола в период с конца 2012 по 2013 гг. произошло трещинное извержение, которому присвоено имя 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ 50-летия ИВиС). С начала извержения и по сегодняшний день Институт вулканологии и сейсмологии организует полевые работы в этом районе, который имеет интерес для геологов, вулканологов, петрологов, гидрогеологов, геофизиков и многих других. Наибольший интерес представляет изучение глубинного строения района сейсмологическими и электромагнитными методами.

Здесь в 2014 году молодым полевым электромагнитным отрядом в составе пяти человек (начальник отряда Логинов В.А., аспирантка Самойлова О.М., два студента Улыбышев И.С., Авдась А.С. и водитель Толстых О.В.) выполнены электромагнитные исследования методами аудиоманнитотеллурического и магнитотеллурического зондирования. Исследования

проводились с целью выявления аномалий повышенной электропроводности в земной коре, которые могут быть связаны с магматическими очагами. По итогам полевых работ выполнена обработка данных АМТЗ и МТЗ, получен тензор импеданса для каждой точки зондирования, по которым построены кривые частотной зависимости его компонент. В основу интерпретации приняты кривые, полученные в главных направлениях. Они в большинстве случаев ориентированы по простиранию (продольные кривые) и вкрест простирания (поперечные кривые) регионального разлома, к которому приурочены шлаковые конуса. Большое внимание при интерпретации уделено фазовым кривым импеданса, свободным от влияния локальных геоэлектрических неоднородностей. Фазовые кривые содержат дополнительную информацию о глубинной неоднородности. Поэтому на этапе качественного анализа фазовые кривые дали возможность получить представление о распределении электропроводности в зоне глубинного разлома и прорыва С.И. Набоко. По данным качественного анализа МТЗ, формальной интерпретации кривых МТЗ и другой априорной геолого-геофизической информации создана стартовая геоэлектрическая модель, которая в дальнейшем уточнена с помощью программы двумерного численного моделирования (Maskie R.L). В результате ряда пробных расчетов была достигнута удовлетворительная сходимость модельных и экспериментальных кривых и построены геоэлектрические разрезы, на которых нашли отражения аномалии повышенной и пониженной электропроводности, связанные с поступлением магматических расплавов из магматического очага.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований располагается в Толбачинской региональной зоне шлаковых конусов. Южная часть зоны называется Толбачинским долом, где сосредоточено большое количество эруптивных центров в виде много-

численных трещин и шлаковых конусов. Здесь проводилось множество исследований, начиная с 50-х годов XX века и по сегодняшний день.

Так, первые записи о вулкане датируются 1899 годом [13]. Далее следует упомянуть об исследованиях в 40-х – 50-х годах 20 века, включающих в себя бюллетени и отчёты вулканологических станций [3, 4, 5].

Произошедшее в 1975 - 1976 годах извержение (БТТИ) хорошо изучено геолого-геофизическими методами. Результаты исследований опубликованы в обобщающей монографии [2].

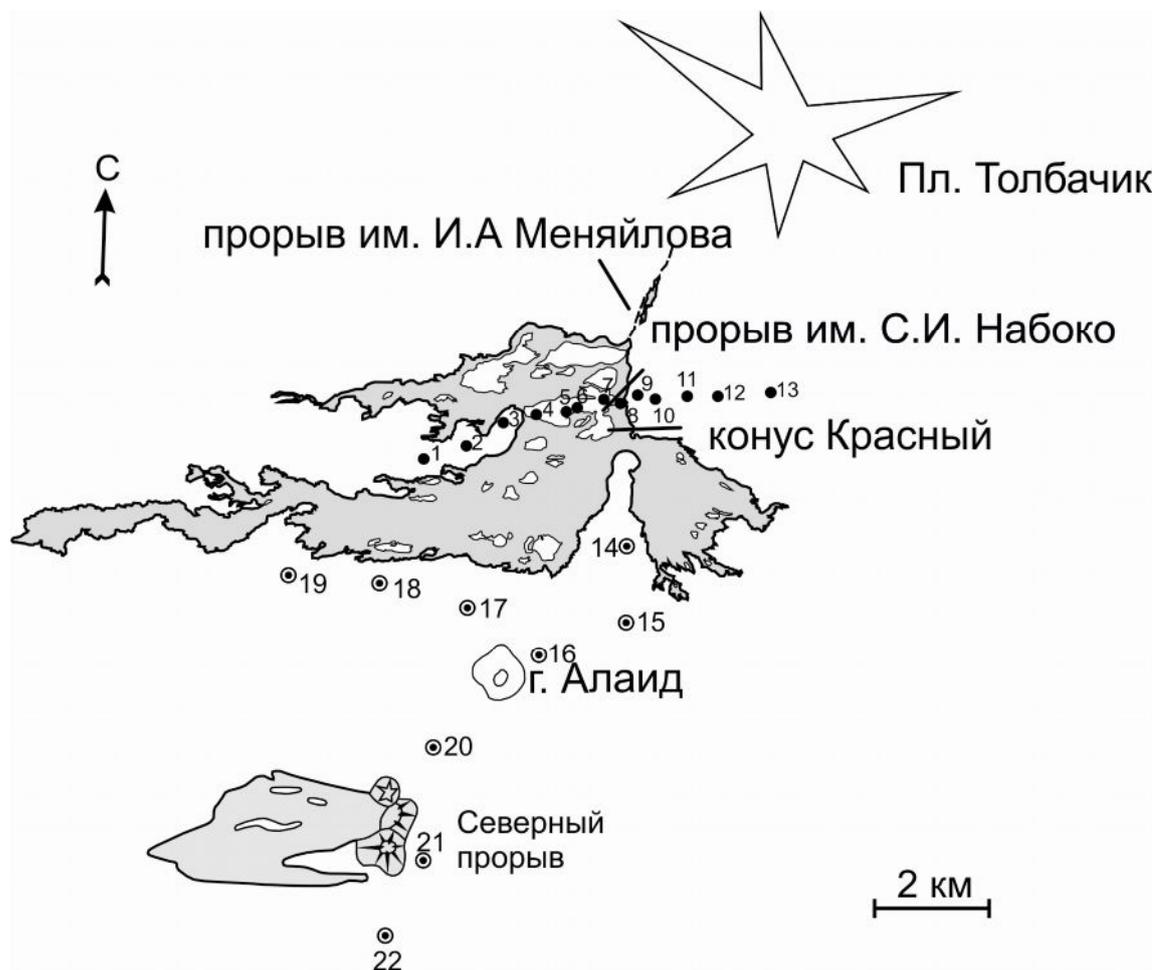


Рис.1. Схема расположения пунктов электромагнитного зондирования. Черные точки пункты АМТЗ с 1 по 13. Кружки с точками пункты МТЗ с 14 по 22.

Последнее трещинное извержение началось 27 ноября 2012 года. Описаны параметры лавовых потоков [8], приведены данные о составе лав и продуктов извержения [6]. Исследованы базальты разного состава, а так же вынесенных продуктов разноглубинной мантии [9]. Определены глубины

палеочагов по составу и магнитным свойствам титаномагнетитов [10]. Изучены минеральные и петрографические особенности алмазосодержащих продуктов извержения 2012-2013 гг. [11]. Изучены геолого-геоморфологические последствия трещинного Толбачинского извержения [12]. Проведен спутниковый мониторинг извержения [7]. Определены физические параметры лавовых потоков по спутниковым данным [14]. Изучен рельеф и дана количественная оценка параметров извержения, в частности при помощи радиолокационной съёмки [15] и многое др.

МЕТОДИКА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Электромагнитные работы выполнялись аппаратурой канадской компании «Phoenix Geophysics Ltd». Площадь, покрытая лавовыми потоками, является недоступной для перемещения геофизической аппаратуры с помощью автомобиля. Поэтому была принята методика переноса аппаратуры вручную в облегченном варианте АМТЗ для изучения верхних частей земной коры до глубин 10 км. Использовалась крестообразная расстановка с регистрацией четырех компонент электромагнитного поля. Район прорыва С.И. Набоко пересечён профилем АМТЗ с шагом от 200 м в центральной части профиля до 1000 м в краевых частях. Диапазон регистрируемых колебаний от 0.0001 до 100 с. Длина приёмных электрических диполей составляла 40 м. Для заземления электродов использовался глинистый солевой раствор, а сами электроды обмазывались в глине, что обеспечило понижение переходных электрических сопротивлений.

За пределами лавовых потоков есть возможность использовать автомобильный транспорт. Вдоль дороги произведены наблюдения МТЗ в расширенном диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 с и более, что позволяет получить более глубинную информацию об электропроводности геологической среды. В этом районе зондирования выполнены с шагом 2 км. Длина приемных диполей составляла ~90 м. Для получения устойчивых

значений импеданса на высоких периодах необходимое время записи составляет более суток.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРОБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МТ ДАННЫХ

В методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) для получения информации об электропроводности геологической среды используется связь (1.1)

$$\mathbf{E}_{\text{гор.}} = [\mathbf{Z}] \mathbf{H}_{\text{гор.}} \quad (1.1)$$

между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности, которая получила название тензора импеданса (1.2).

$$[\mathbf{Z}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Компоненты тензора импеданса Z_{xy} , Z_{yx} являются основными, а компоненты Z_{xx} , Z_{yy} - дополнительными [1].

По итогам полевых работ выполнена обработка данных АМТЗ и МТЗ, получен тензор импеданса для каждой точки зондирования, определены главные направления, по которым построены кривые частотной зависимости его компонент (Рис. 2 и 3).

Тензор импеданса даёт возможность оценить характер и степень геоэлектрической неоднородности среды. Выполнен анализ геоэлектрической среды: рассмотрены полярные диаграммы на разных периодах и построены пространственно-временные разрезы параметров неоднородности N [16] и асимметрии $Skews$ [18].

Для примера приведены пространственно-временные разрезы по профилю пересекающего прорыв им. С.И. Набоко.

Параметр неоднородности (Рис. 4) имеет небольшие значения, только в районе прорыва им. С.И. Набоко (п.п. 6-8) значения увеличиваются до 0.7, что говорит о повышенной геоэлектрической неоднородности в данном районе профиля.

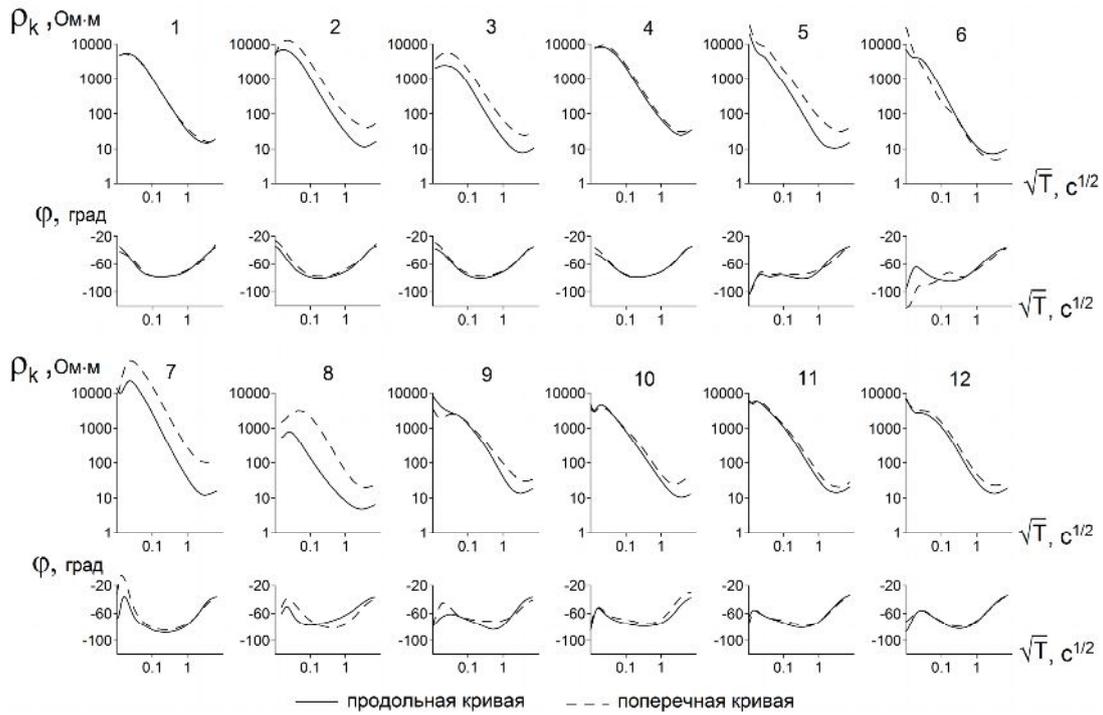


Рис. 2. Амплитудные и фазовые кривые АМТЗ.

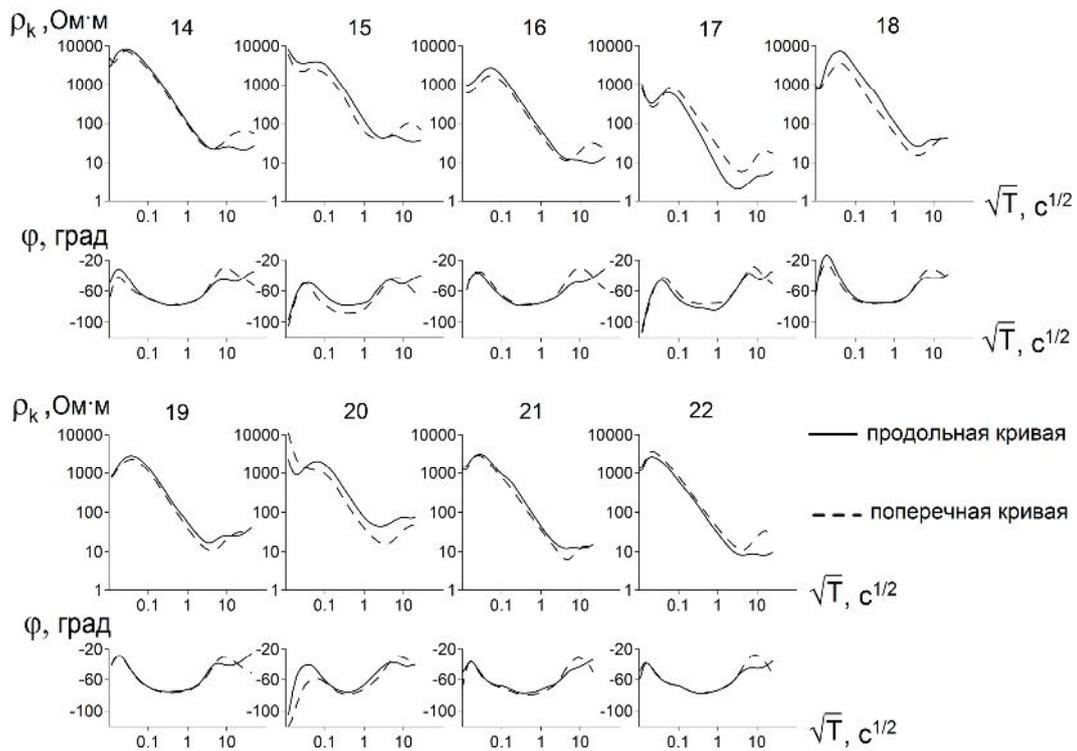


Рис. 3. Амплитудные и фазовые кривые МТЗ.

Также параметр асимметрии *Skews* (Рис. 5) увеличивается в районе прорыва им. С.И. Набоко (п.п. 6-8), что связано с увеличением трехмерных эффектов.

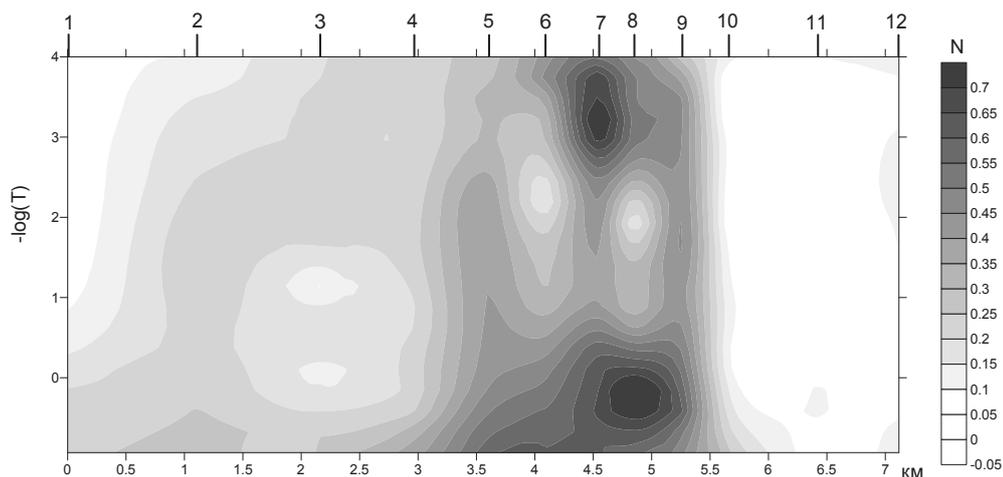


Рис. 4. Пространственно-временной разрез параметра неоднородности по профилю АМТЗ.

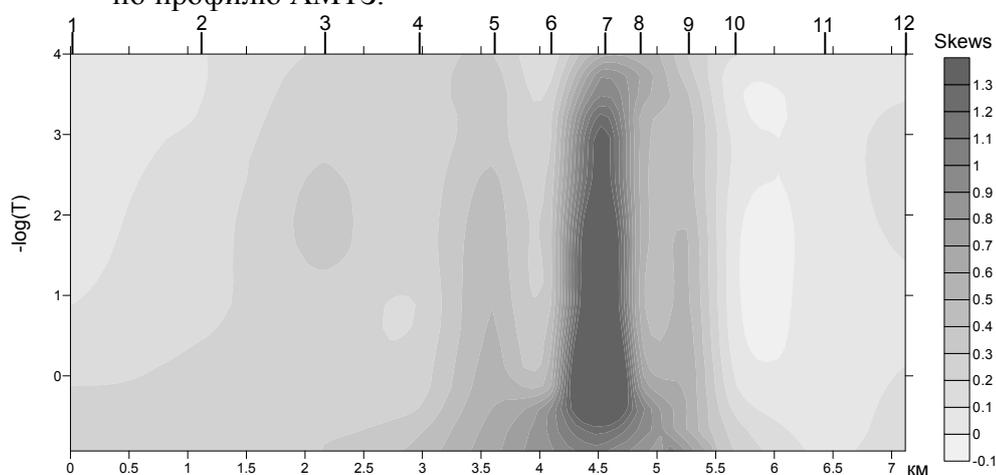


Рис. 5. Пространственно-временной разрез параметра асимметрии по профилю АМТЗ.

Большое внимание при интерпретации уделено фазовым кривым импеданса, свободным от влияния локальных геоэлектрических неоднородностей. Фазовые кривые содержат дополненную информацию о глубинной неоднородности. Поэтому на этапе качественного анализа фазовые кривые дали возможность получить представление о распределении электропроводности в зоне глубинного разлома и прорыва С.И. Набоко.

Выполненный анализ свидетельствует, что на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с влиянием регионального разлома субмеридионального простирания. Это дает нам право выполнить численное двумерное моделирование с помощью программы Макки [17]. По данным качественного анализа МТЗ, формальной интер-

претации кривых МТЗ и другой априорной геолого-геофизической информации, создана модель, которая послужила стартовой моделью для численного двумерного моделирования.

Для интерпретации выбраны продольные кривые, которые обладают повышенной разрешающей способностью к наличию глубинных проводящих зон. Рассмотрим амплитудные и фазовые кривые МТЗ (Рис. 3). На них выражен в левой части максимум, связанный с высокоомными образованиями, представленными вулканогенными породами, включая лавовые потоки. В средней части кривых выражен минимум, отражающий низкоомную осадочно-вулканогенную толщу, перекрывающую верхнемеловой фундамент. Важно отметить, что на продольных кривых МТЗ в низкочастотном диапазоне выражен минимум, свидетельствующий о наличии глубинной проводящей зоны.

Были построены геоэлектрические разрезы по двум профилям. Первый профиль - (п.п. 1 - 12) АМТЗ, пересекающий прорыв С.И. Набоко (Рис. 6),

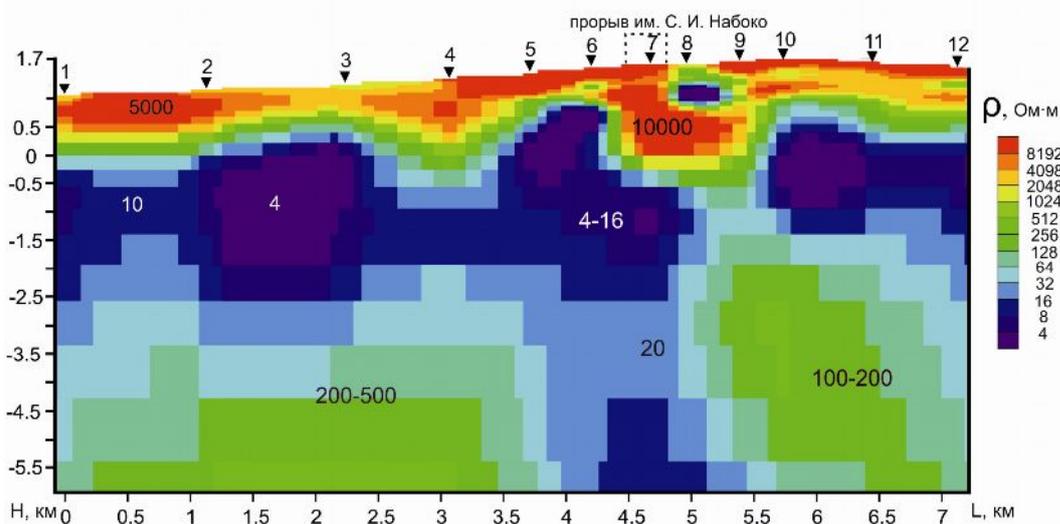


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по профилю АМТЗ.

Второй профиль - (п.п. 19 - 15) МТЗ, проходящий на несколько километров южнее первого (Рис. 7).

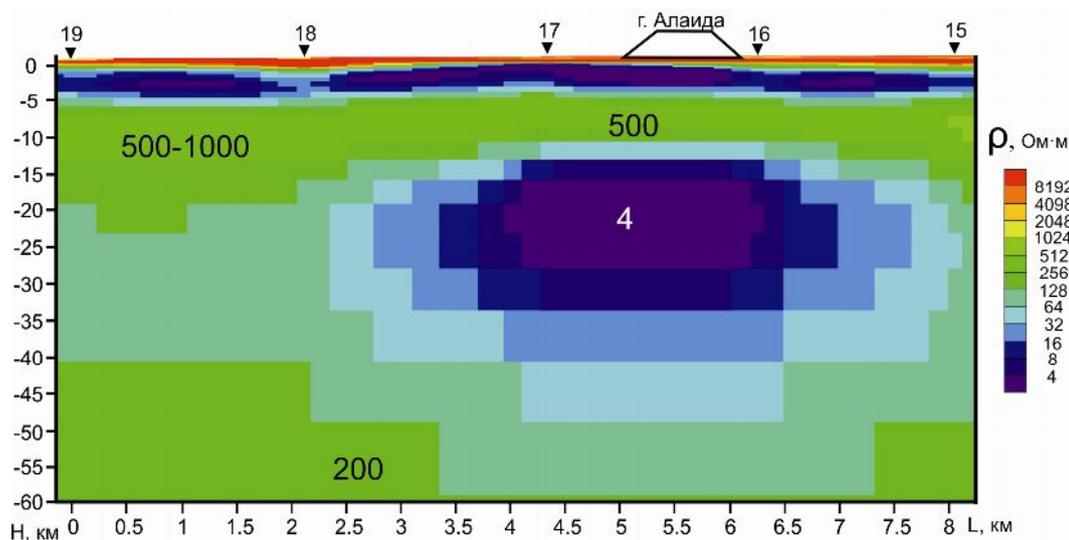


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю МТЗ.

Рассмотрим геоэлектрический разрез, пересекающий прорыв С.И. Набоко (Рис. 6). В верхней части разреза выражен высокоомный слой с электрическим сопротивлением до десяти тысяч Ом·м. Мощность осадочно-вулканогенной толщи варьируется от первых сотен метров до 3 км. Удельное электрическое сопротивление её составляет первые единицы – первые десятки Ом·м. Ниже осадочно-вулканогенной толщи расположен кайнозойский фундамент с удельным электрическим сопротивлением в первые сотни Ом·м.

На разрезе по данным МТЗ на глубине 11 км выделяется аномалия повышенной электропроводности мощностью 25 км и шириной 4.5 км с удельным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом·м. Пониженные электрические сопротивления можно связать с наличием жидкой фазы в виде магматических расплавов.

ВЫВОДЫ

По данным анализа тензора импеданса установлено, что геоэлектрическая среда в первом приближении может быть аппроксимирована двумерно-неоднородной моделью, что дало нам право выполнить численное двумерное моделирование МТ данных по двум профилям. По продольным кривым получены геоэлектрические разрезы, характеризующих электропроводность среды до глубины 60 км. Выделены аномалии повышенной электропроводности, которые могут быть связаны с наличием магматических расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. Научный мир. 2009. С. 677.
2. Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка 1975-1976. Под ред. С.А. Федотова. М.:Наука, 1984. 638 с.
3. Былинкина А.А., Горшков Г.С. Состояние вулканов Ключевской группы во второй половине 1949 г. // Бюл. вулканол. Станций, 1954, № 20. С. 32-37.
4. Влодавец В.И. Ключевская группа вулканов // Труды Камчатской вулканологической станции, 1940, № 1. М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР. С. 2-124.
5. Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. Станций, 1957, № 25. М.: АН СССР. С. 5-95.
6. Волынец А.О., Мельников Д.В., Якушев А.И. (2013) Первые данные о составе продуктов Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (Камчатка) // Доклады Академии наук. 2013, Т. 452, № 3. С. 303-307.
7. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нурдаев А.А. Спутниковый мониторинг Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН В 2012-2013 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014, С. 50-56.
8. Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б., Волынец А.О., Мельников Д.В., Двигало В.Н. Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // Доклады Академии наук. Т. 452, 2013, № 5. С. 562-566.

9. *Еремина Т.С., Хубуная С.А., Колосков А.В., Москалева С.В.* Известково-щелочные и субщелочные базальты и андезибазальты вулканов Ключевской, Харчинский и Плоский Толбачик (ТТИ-50) — вулканические продукты разнотемпературной мантии // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014, С. 69-82.
10. *Зубов А.Г., Ананьев В.В.* О методике определения глубин магматических палеочагов по составу и магнитным свойствам титаномагнетитов // 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. 194-200.
11. *Карпов Г.А., Аникин Л.П., Флеров Г.Б., Чубаров В.М., Дунин-Барковский Р.Л.* Минералого-петрографические особенности алмазосодержащих продуктов Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2014, С. 284-289.
12. *Лукашов А.А.* Геолого-геоморфологические последствия трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 годов (Камчатка) // Материалы XXXIV Пленума Геоморфологической комиссии РАН, Волгоград, 6–9 сентября 2014 г.
13. *Маргаритов В.П.* Камчатка и ее обитатели // Зап. Приамурского отдела Импер. Русск. Геогр. об-ва. Хабаровск, 1899, Т. V (Вып. I). 144 с.
14. *Мельников Д.В., Гирина О.А.* Определение физических параметров лавовых потоков на основе данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Тезисы докладов. Одиннадцатая Всероссийская открытая ежегодная конференция, 11-15 ноября 2013 г., Москва. М.: ИКИ РАН. 2013. С. 309.
15. *Михайлюкова П.Г., Тутубалина О.В., Мельников Д.В., Зеленин Е.А.* Количественная оценка параметров Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН и динамики вулканогенного рельефа на основе данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 11, 2014, № 4. С. 351-359.
16. *Bahr K.* Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. *J. Geophysics.* 1988. № 62. P. 119-127.
17. *Rodi, W., and R.L. Mackie,* 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, *Geophysics*, 66, 174-187.
18. *Swift C.M.* A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, M/T. Cambridge. 1967.

THE MAGNETOTELLURIC SOUNDING TECHNIQUE AND RESULTS
IN THE AREA OF FISSURE TOLBACHIK ERUPTION (FTE) NAMED
AFTER 50 YEARS OF IVS.

^{1,2}*Loginov V.A., ¹Samoylova O.M., ^{1,2}Ulybyshev I.S., ^{1,2}Avdas A.S.*

¹*Institute of Volcanology and seismology FEB RAS*

²*Kamchatka Vitus Bering state university*

The magnetotelluric sounding observation technique and interpretation have been considered. It has been shown that geological medium can be approximated by 2D model in the first approach. On this basis the inversion of AMTS and MTS curves has been carried out using numerical 2D modeling of MT field program (by Mackie R.L. algorithm). As a result we have got several geoelectrical sections which characterize structure of the crust and upper mantle conductivity up to 60 km. Also the estimation of the MT method resolving power has been carried out.

Key words: Fissure Tolbachik eruption, magnetotelluric soundings, impedance tensor, geoelectrical section.