

УДК 550.837

## ИЗУЧЕНИЕ ЮГО-ЗАПАДНОГО СКЛОНА АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА МЕТОДОМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Улыбышев И.С.<sup>1,2</sup>, Логинов В.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,*

<sup>2</sup> *Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга.*

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

В работе приводятся результаты исследования глубинного строения юго-западного склона Авачинского вулкана методом магнитотеллурического зондирования. После обработки результатов наблюдений получены кривые кажущегося сопротивления, по ним построен пространственно-временной разрез среды. На кривых поперечного направления был обнаружен аномальный эффект, для объяснения которого привлечено трёхмерное моделирование. Построенная модель, учитывающая влияние берегового эффекта и Авачинского грабена, не дала удовлетворительного результата, поэтому в модель был дополнительно введён глубинный проводник, объясняющий аномальное поведение кривых кажущегося сопротивления.

*Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, Авачинский вулкан, Авачинский грабен, пространственно-временной разрез, трёхмерное моделирование.*

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение глубинного строения вулканических построек является важной задачей современных геологических наук. Весомый вклад в изучение земных недр вообще и вулканических структур в частности вносит геофизика. К сожалению, очень немногие геофизические методы способны дать достоверную информацию о глубинах в первые километры и десятки километров, на которых предполагается существование зон, связанных с деятельностью вулканов, с их питанием. Наибольшее распространение в изучении указанных глубин получили методы сейсморазведки, которые дают информацию высокого качества, но являются весьма трудоёмкими и дорогостоящими.

Альтернативой или дополнением в деле изучения больших глубин может служить один из методов электроразведки, магнитотеллурическое

зондирование (МТЗ). В прошлом уже неоднократно проводились работы методом МТЗ на вулканах Камчатки, в том числе и на Авачинском вулкане. В 1993 году проведены работы на профиле «Опала-Вахиль» [8], однако, склон Авачинского вулкана был лишь небольшой частью изучаемой территории, и затронут поверхностно - всего три точки этого профиля расположены на юго-западном склоне вулкана (рис.1). В качестве первого шага детального изучения этой вулканической постройки методом МТЗ в 2010 году были проведены, а в 2014 году дополнены работы по профилю «Елизово-2010». Этот профиль, протяжённостью около 15 километров, проходит по Сухой речке и состоит из шестнадцати точек. Результатам этих работ, а также их сравнению с результатами работ 1993 года посвящена эта статья.

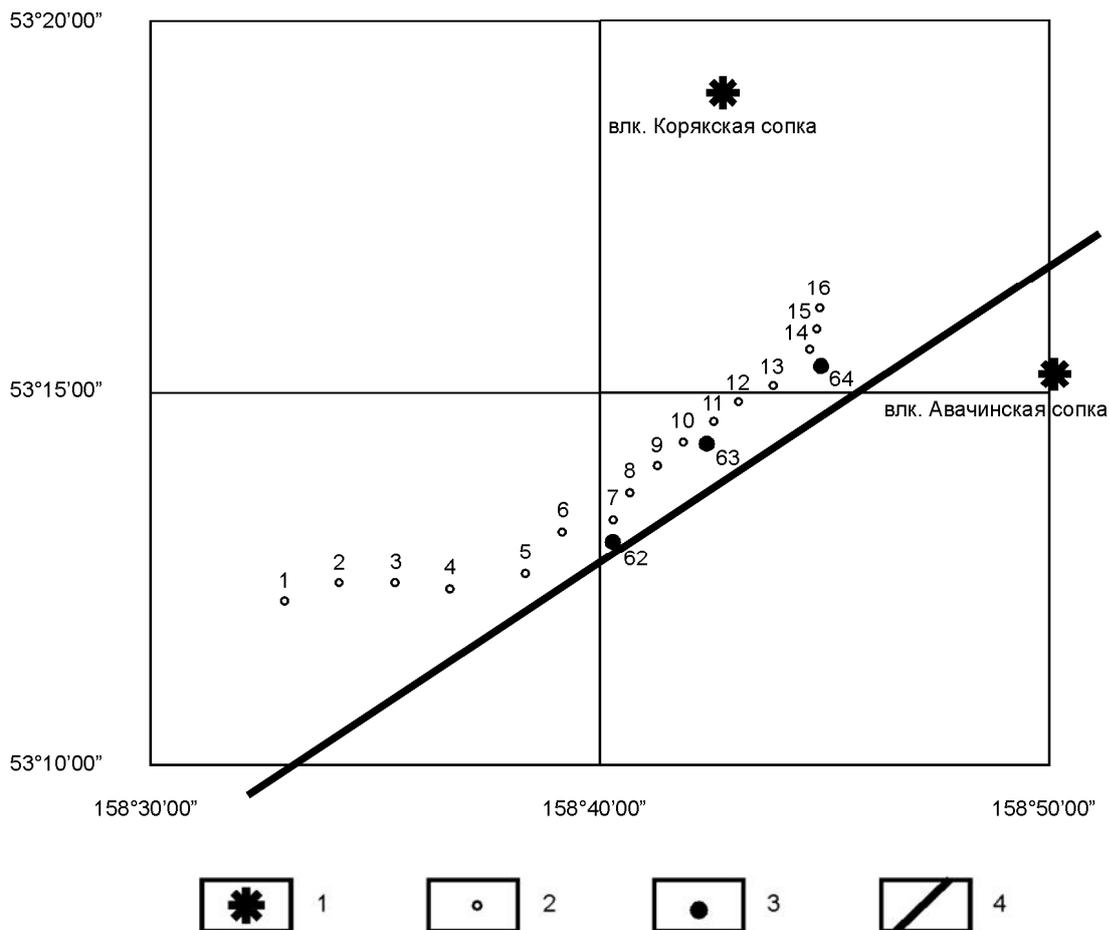


Рис.1. Схема расположения профилей МТЗ: 1 – действующие вулканы; 2 – профиль «Елизово 2010» (2010, 2014); 3 – профиль «Опала-Вахиль» (1993); 4 – линия сейсмического профиля.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические работы проводились на Авачинском вулкане с 60-х годов прошлого века. За это время склоны вулкана были изучены методами гравиразведки [5], магниторазведки [9], сейсморазведки [3], электро-разведки [6, 8]. Кроме того, в окрестностях вулкана находится несколько действующих сейсмостанций и ведётся сейсмический мониторинг, благодаря чему было построено несколько вариантов сейсмического разреза Авачинского вулкана [3, 4]. Один из них представлен ниже (рис.2). На разрезе хорошо выделяются сейсмические границы. Первая граница, между осадочным чехлом и меловым фундаментом, залегает на глубине 1-2 километра, плавно опускается при приближении к вулканической постройке и плохо прослеживается под самим вулканом. Далее идут ещё несколько границ: на глубинах 4-5 километров, 9-12 и 20-25 километров.

На этом разрезе так же выделены четыре аномальные зоны (А, В, С и D), из которых три находятся непосредственно под вулканом, а одна, аномальная зона В, расположена под юго-западным склоном вулкана. Зоны А, С и D традиционно связывают с системой питания вулкана. Первая зона характеризуется повышенным поглощением высокочастотных сейсмических сигналов, вторая - повышенной, а третья - пониженной скоростью продольных волн. Зона В соответствует Авачинскому грабену, который, благодаря своим аномальным свойствам, был выделен в предшествующих работах. Обобщая данные, полученные разными геофизическими методами, можно дать следующие характеристики грабена: его кровля расположена на глубине около двух километров, мощность составляет не менее трёх, а ширина не менее пяти километров; он выделяется по пониженным скоростям сейсмических волн относительно соседних блоков, пониженными плотностью и сопротивлением. Кроме того, в нём происходят активные тектонические процессы. Исследователи расходятся во мнениях: некоторые считают, что данная аномальная зона является глубинным разломом [4], системой разломов [1] или связана с системой питания вулкана [3].

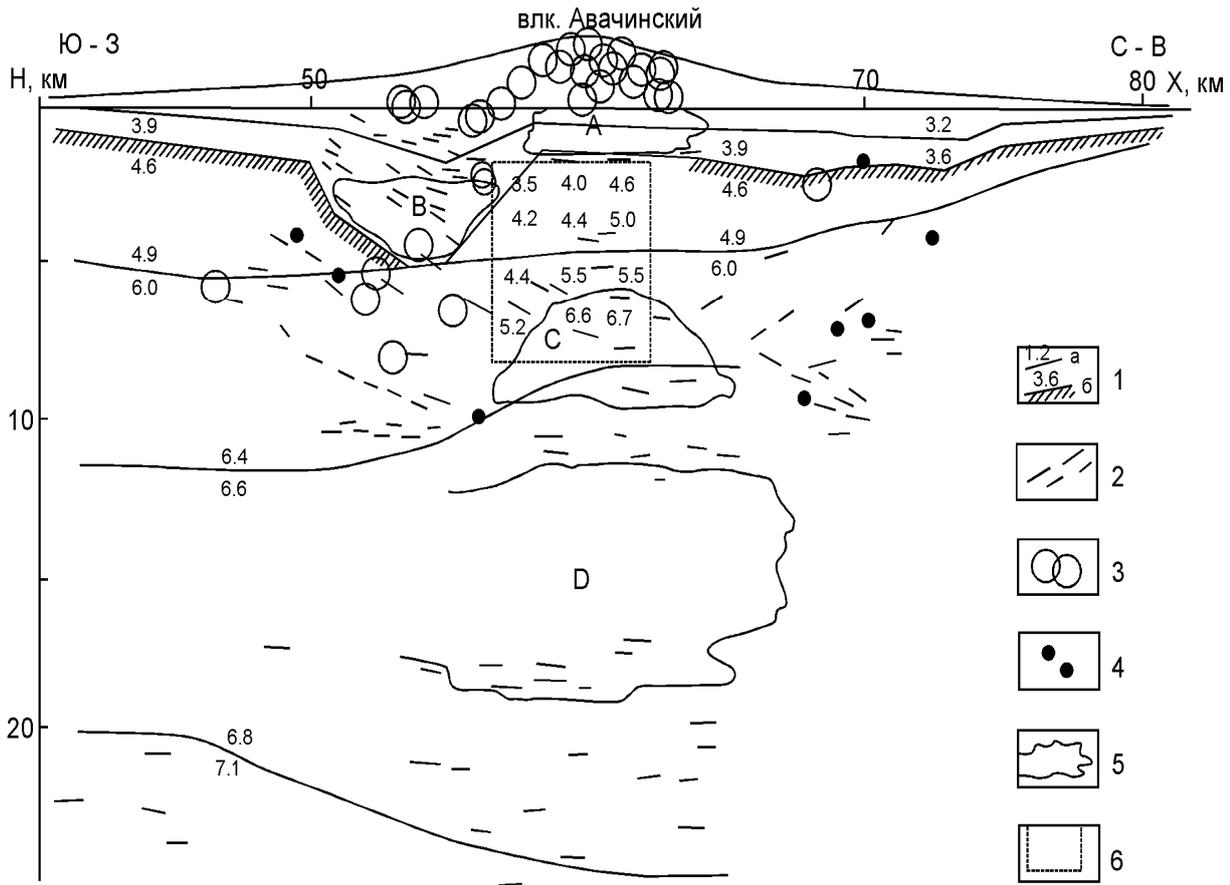


Рис.2. Сейсмический разрез Авачинского вулкана [4]: 1а – изолинии скорости; 1б – поверхность мелового фундамента; 2 – отражающие площадки; 3 – гипоцентры землетрясений; 4 – точки дифракции; 5 – условные контуры аномальных зон; 6 – границы области, в которой рассчитаны значения продольной скорости томографическим методом.

## МЕТОД МТЗ

Магнитотеллурическое зондирование (МТЗ) представляет собой разновидность частотного электромагнитного зондирования, основанную на регистрации колебаний магнитотеллурического поля в широком диапазоне периодов. По наблюдениям, выполняемым в одной точке, определяют величины, характеризующие соотношения между спектрами электрического и магнитного полей. Зависимость этих величин от периода изображают в виде амплитудных и фазовых кривых МТЗ, являющихся частотными характеристиками исследуемого разреза [2].

Амплитудные кривые отражают изменение удельного сопротивления с глубиной. Первый слой исследуемого разреза проявляется в области высоких частот. По мере уменьшения частоты на кривых начинают последо-

вательно отражаться всё более глубокие слои разреза. Сопоставление практических амплитудных кривых с теоретическими в благоприятных условиях позволяет получить отдельную или обобщённую информацию о параметрах геоэлектрического разреза (о мощностях и удельных сопротивлениях отдельных слоёв или суммарной мощности и среднем продольном удельном сопротивлении обобщённых толщ) [2].

Фазовые кривые подобно амплитудным отражают изменение удельного сопротивления с глубиной. Минимумы фазовых кривых отвечают хорошо проводящим слоям, а максимумы – плохо проводящим. Важно отметить, что фазовые кривые практически не содержат новой информации о геоэлектрическом разрезе и могут быть получены из амплитудных путём интегральной трансформации. Однако фазовые кривые улучшают условия выделения информации [2]. При благоприятных условиях, между формами амплитудных и фазовых кривых наблюдается соответствие, называемое дисперсионным соотношением. Нарушение дисперсионного соотношения может говорить о недостоверности полученной информации о геоэлектрическом разрезе.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе работ была использована современная аппаратура канадской фирмы Phoenix Geophysics, в том числе станция MTU-5A, индукционные магнитные датчики и неполяризуемые электроды. Регистрировались две горизонтальных электрических и три магнитных компоненты электромагнитного поля в диапазоне периодов от 0.0001 до 1000 секунд и более. Для проведения измерений, индукционные датчики и электрические линии располагают перпендикулярно – обычно они направлены на географический север и восток. Нами были выбраны азимуты 30 и 120 градусов, что согласуется с простираем основных геологических структур района. Схема расстановки приведена ниже (рис.3).

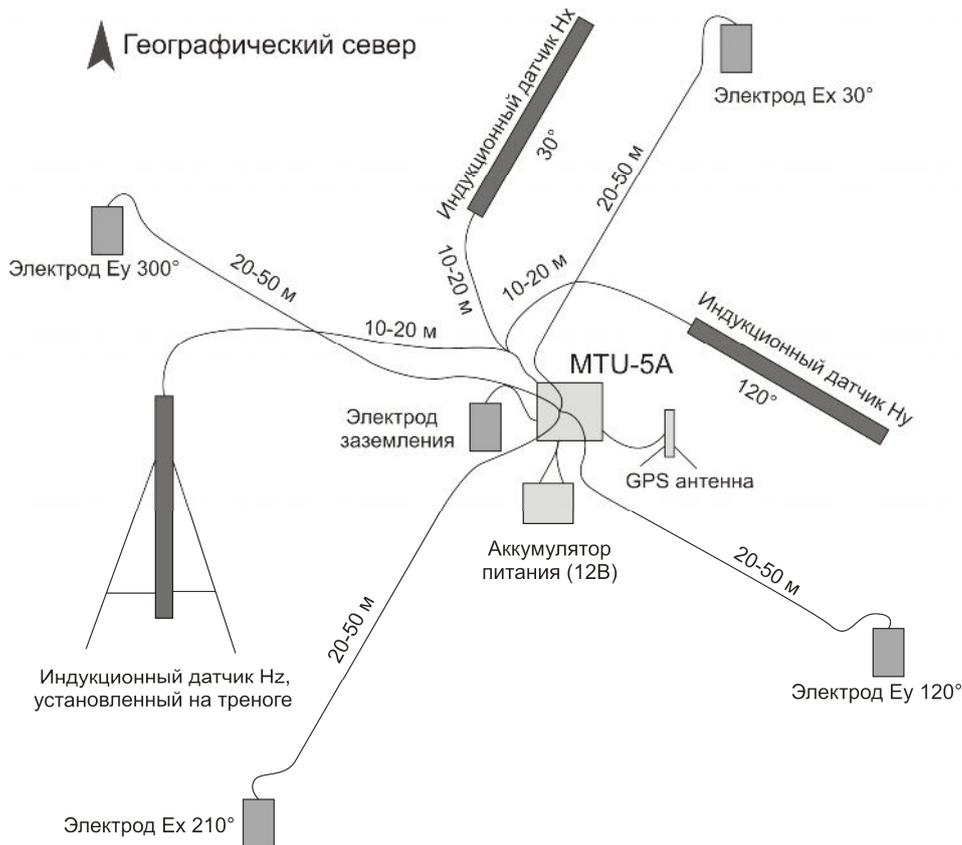


Рис.3. Схема расстановки измерительных линий.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

После обработки данных наблюдений получены амплитудные и фазовые кривые. Как можно видеть, первые шесть кривых на каждом из графиков практически не отличаются друг от друга (рис.4а). Это говорит о том, что разрез в этой части профиля меняется слабо. Далее картина резко меняется (рис.4б). На кривых продольной поляризации ( $u_x$ ), начиная с точки 7, исчезает небольшой максимум на периодах, близких к одной секунде, и далее кривые имеют близкую форму вплоть до конца профиля. Картина на поперечных кривых ( $u_y$ ) сложнее: на точке 7 и далее максимум на кривых в низкочастотной области резко уходит вниз, а ближе к концу профиля, на точке 13 и далее, он вновь поднимается (рис.4в). Получается, что поперечные кривые затрагивают зону очень низких сопротивлений, которая слабо отображается на продольных кривых. Такое поведение объясняется наличием низкоомной зоны, достаточно небольшой по ширине и вытянутой поперёк профиля. Очевидно, эта зона соответствует Авачинскому

грабену. Далее представлены пространственно-временные разрезы по профилю (рис.5). Они дают информацию более наглядно и подтверждают сделанные ранее выводы о наличии вытянутой перпендикулярно к профилю низкоомной зоны.

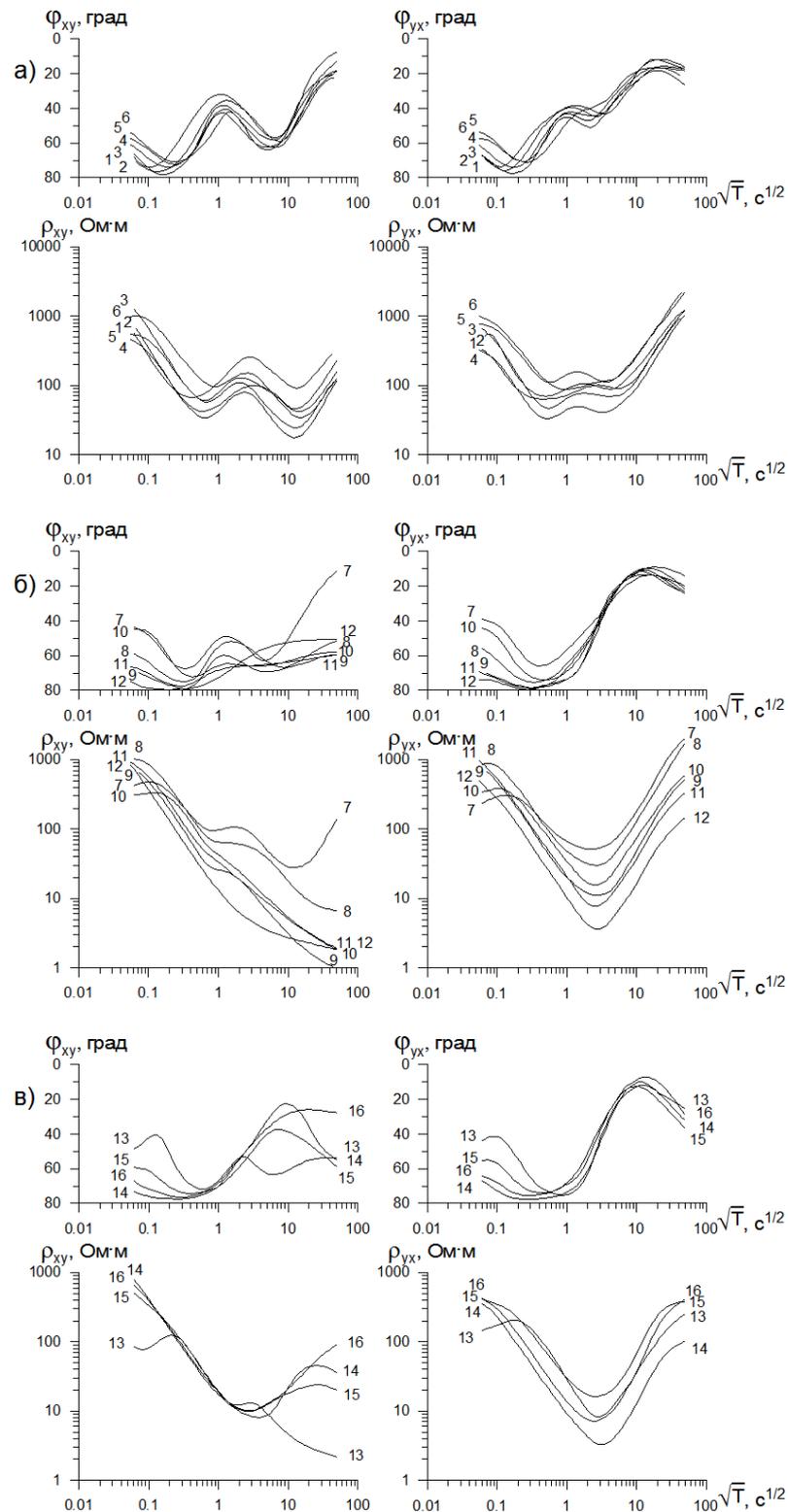


Рис.4. Амплитудные и фазовые кривые МТЗ.

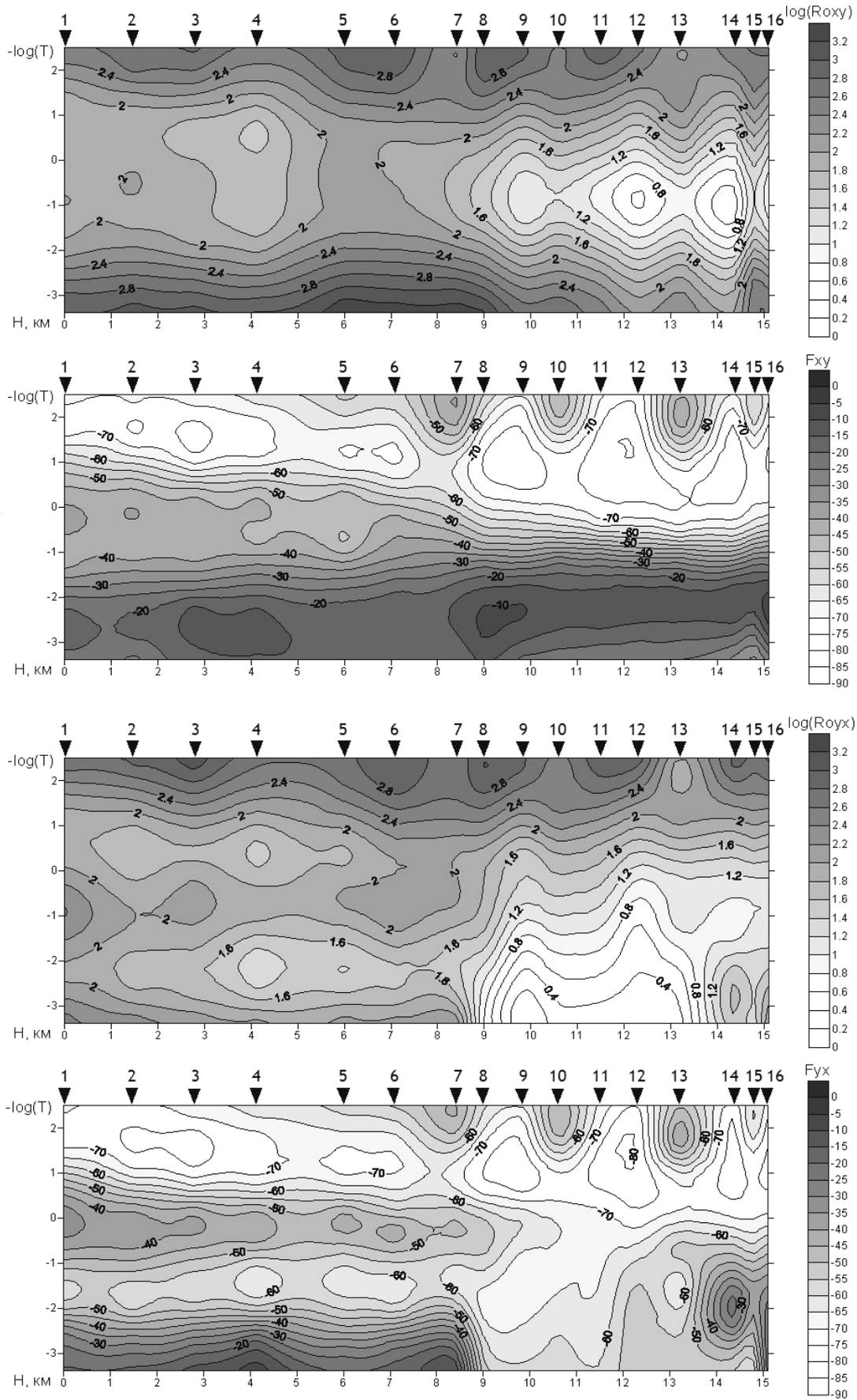


Рис.5. Пространственно-временные разрезы.

## СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ПРЕДЫДУЩИХ РАБОТ

Новый профиль «Елизово 2010» совпадает с небольшой частью профиля «Опала-Вахиль», измерения на котором проводились в 1993 году. Три точки старого профиля находятся достаточно близко к новым для того, чтобы построенные для них кривые можно было сравнить друг с другом (рис.6).

Очень хорошее соответствие наблюдается между кривыми, полученными для точки 63 профиля «Опала-Вахиль» и точки 11 профиля «Елизово-2010». Информация, полученная для двух других точек старого профиля, совпадает с новыми данными лишь частично. Здесь приведено сравнение только амплитудных кривых, потому как для указанных точек профиля «Опала-Вахиль» фазовые кривые отсутствуют. К сожалению, отсутствие фазовых кривых не позволяет судить о достоверности амплитудных.

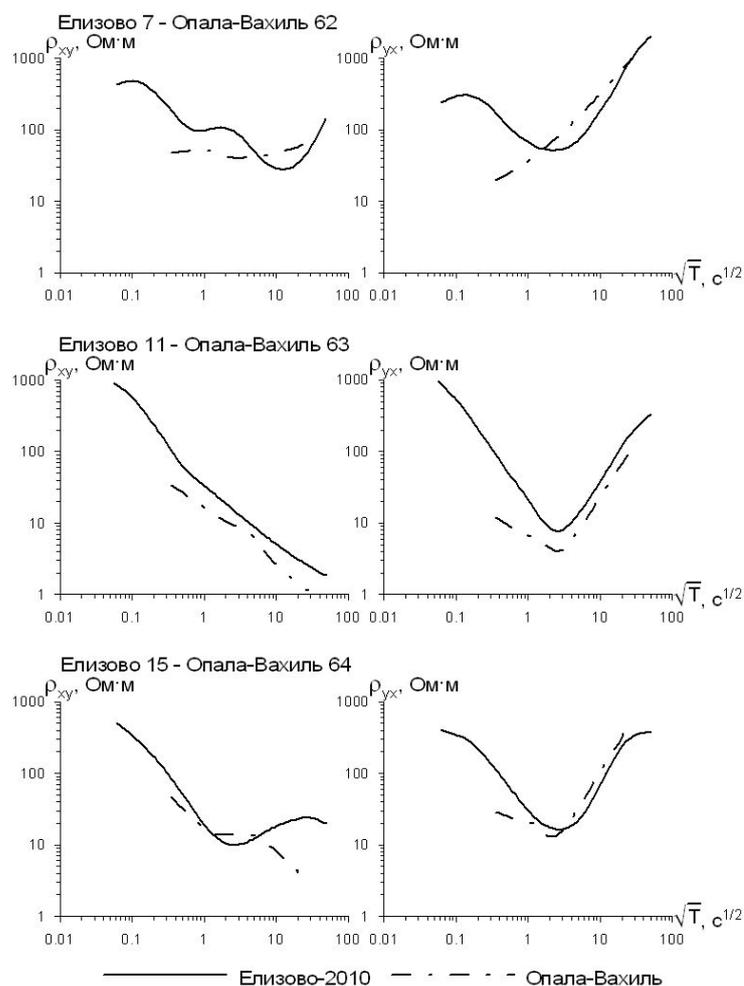


Рис.6. Сравнение кривых МТЗ по профилям «Опала-Вахиль» и «Елизово-2010».

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для исследуемого района по результатам работ 1993 года ранее была построена двумерная геоэлектрическая модель (рис. 7, 8). Мы отметили отличную сходимость экспериментальных и модельных кривых, поэтому результаты двумерного моделирования были учтены нами при трёхмерном моделировании. Также были отмечены следующие недостатки двумерной модели:

- При двумерном моделировании значения сопротивлений изменяются только вдоль профиля, блоки, составляющие разрез, считаются бесконечно вытянутыми поперёк профиля наблюдений, что не соответствует действительности и искажает модельные кривые.

- В ходе двумерного моделирования не учитывался береговой эффект, имеющий значительное влияние на экспериментальные кривые, особенно в условиях близости профиля к береговой линии.

- В ходе моделирования района, совпадающего с районом нашего исследования, авторы опирались на скудные данные предыдущих работ, как уже было упомянуто выше.

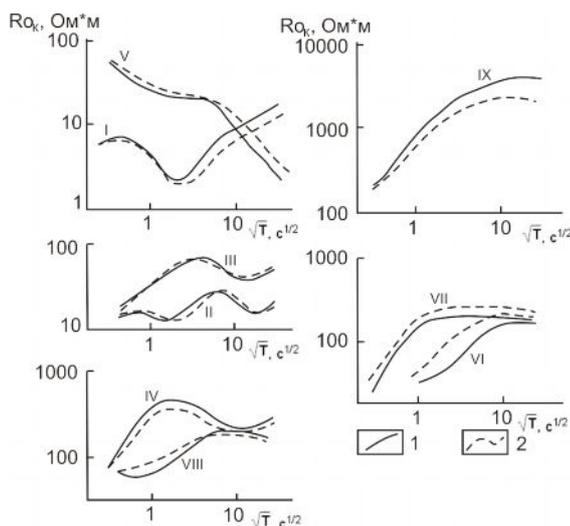


Рис.7. Сравнение кривых при двумерном моделировании [8]: 1 – экспериментальные кривые; 2 – модельные кривые.

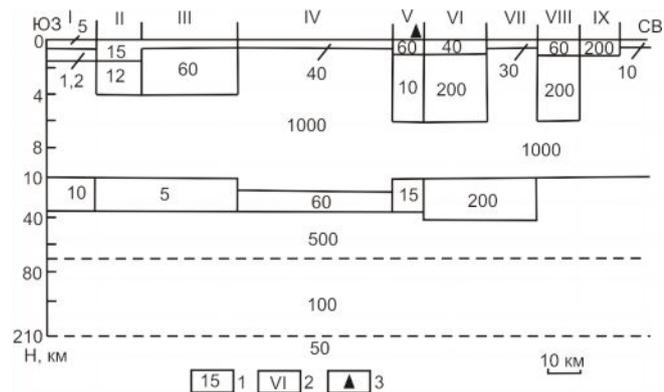


Рис.8. Схема двумерной модели [8]: 1 – удельное электрическое сопротивление ( $\text{Ohm}\cdot\text{m}$ ); 2 – зоны; 3 – район современного вулканизма

Ниже приводится процесс и результаты трёхмерного моделирования. Стоит отметить, что в данной статье приведены не все пробные модели, которых было построено более десятка, а лишь значительные шаги, указавшие нам дальнейшие пути исследования. Для трёхмерного моделирования была использована программа *Maskie* [10].

Для начала была построена самая простая модель. В уже существующую модель земной коры и верхней мантии Камчатки [7] был добавлен грабен мощностью 5 километров с пониженным сопротивлением (5 Ом·м) (рис.9а). Полученный эффект сильно отличался от того, который был обнаружен в ходе исследований.

В следующей модели для увеличения влияния грабена на продольную к нему кривую было понижено сопротивление в грабене до 3 Ом·м и повышено до 100 Ом·м сопротивление вмещающих пород, а сам грабен был погружён под осадочный чехол на полтора километра (рис.9б). Однако и эта модель была далека от истины.

Стало понятно, что влияния грабена и берегового эффекта недостаточно для того, чтобы получить кривые, форма которых схожа с полученными в результате наблюдений. Поэтому в следующую модель был добавлен глубинный проводник (рис.9в).

Из-за того, что грабен и глубинный проводник были разделены зоной повышенного сопротивления (1000 Ом·м), второй минимум на продольной к грабену кривой был выражен неярко, и форма кривой не соблюдалась. Дабы сделать этот минимум более выраженным, между грабеном и проводником была добавлена проводимая зона, с сопротивлением выше, чем в грабене или в проводнике, но значительно ниже, чем в окружающих породах (рис.9г). Полученная в результате модель даёт кривые, форма которых схожа с формой экспериментальных кривых, и может считаться удовлетворительной, но ни в коем случае не претендует на роль окончательного варианта и требует доработки в будущем.

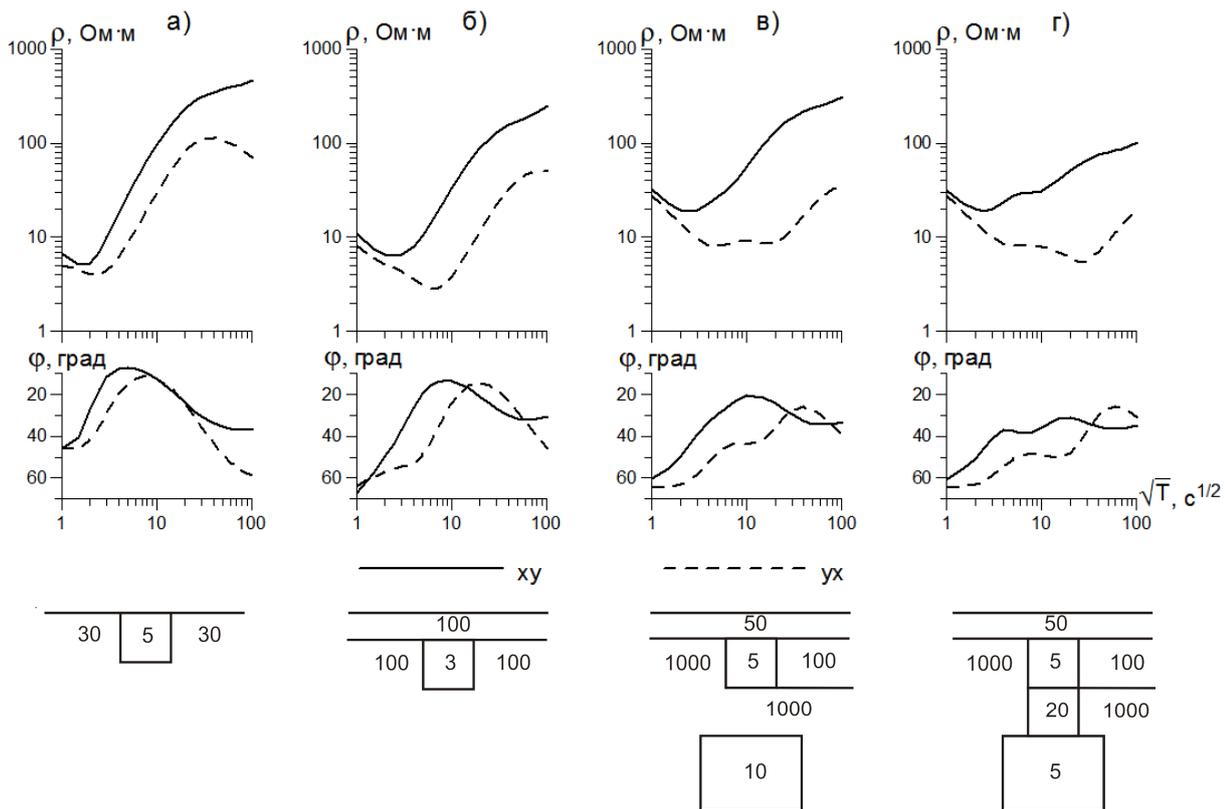


Рис. 9. Трёхмерные модели и модельные кривые: xy - продольные кривые; yx - поперечные кривые. Цифрами на моделях обозначены сопротивления, Ом·м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обработки измерений отчётливо выделена зона аномально низкого сопротивления, соответствующая Авачинскому грабену. Построено несколько трёхмерных моделей среды, основанных на ранее построенной двумерной модели, и учитывающих влияние берегового эффекта. По результатам моделирования достигнуто удовлетворительное соответствие форм экспериментальных и модельных кривых.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Геранин К.О.* Скоростные неоднородности под юго-западным сектором Авачинского вулкана // Природная среда Камчатки // Материалы XIII региональной молодёжной научной конференции «Природная среда Камчатки» 15 апреля 2014 г. Петропавловск-Камчатский: Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН. 2014. С. 89-98.
2. *Бердичевский М.Н.* Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра. 1968. 254 с.
3. *Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич С.А., Пийп В.Б.* Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным МПВ-ГСЗ // Физика Земли. 1990. №3. С. 73-82.
4. *Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л.* О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. №3. С. 57-62.
5. *Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81-94.
6. *Лементуева Л.А., Соболев Г.А.* Естественные электрические поля в районе вулкана Авача на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1986. №3. С. 101-107.
7. *Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Численное трёхмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. №2. С. 64-73.
8. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лоцинская Т.А.* Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Физика Земли. 1996. №11. С. 49-57.
9. *Рындин Э.А., Чирков А.М., Штейнберг Г.С.* Магнитная съёмка на Авачинском вулкане // Бюллетень вулканологических станций. 1964. №38. С. 33-38.
10. *Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. №29. P. 923-935.

STUDY OF THE SOUTH-WESTERN SLOPE OF THE VOLCANO  
AVACHA BY MAGNETOTELLURIC SOUNDING

*Ulybyshev I.S., Loginov V.A.*

This work presents results of the south-western slope of the volcano Avacha deep structure studying by magnetotelluric sounding. Performed treatment of observations gave us curves of apparent resistivity, which were used to creation of dimensional-temporal sectional drawing. Anomalous effect was detected on curves of cross direction, and three-dimensional modeling was used for its explanation. For the reason that the model, built in view of the influence of Avacha graben and coastal effect, didn't give satisfactory results, we built another model with additional deep conductor, which could explain the anomalous behavior of apparent resistivity curves.

*Key words: magnetotelluric sounding, Avacha volcano, Avacha graben, dimensional-temporal sectional drawing, three-dimensional modeling.*