

УДК 550.837

## ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ БОЛЬШЕ-БАННОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА КАМЧАТКЕ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

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

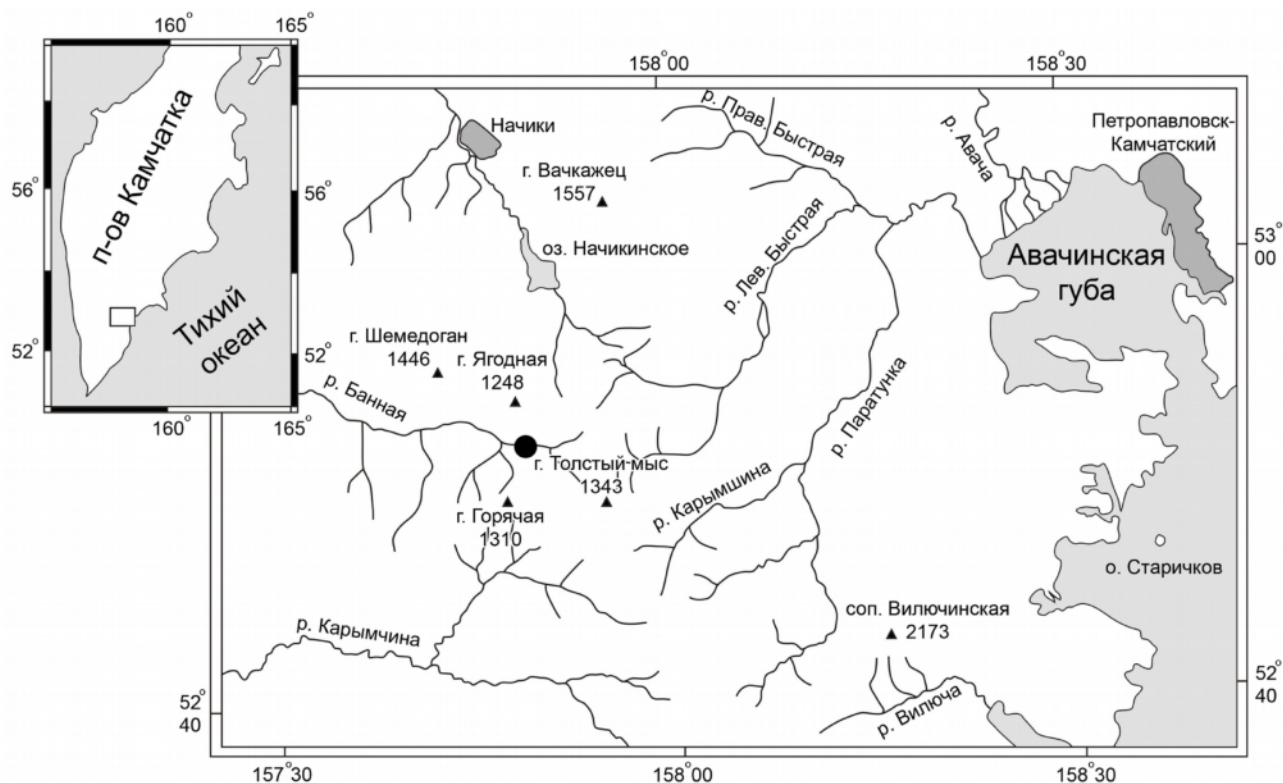
<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: morozyf@kscnet.ru*

<sup>3</sup>*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,  
г. Петропавловск-Камчатский*

Приводятся результаты магнитотеллурического зондирования района выхода Больше-Банной гидротермальной системы. По данным анализа магнитотеллурических параметров и геолого-геофизической информации геoeлектрическая модель района принята в виде двумерно-неоднородной. Рассмотрены псевдорезрезы кажущегося электрического сопротивления и фаз импеданса и определены основные особенности в изменении электропроводности геологической среды. Инверсия кривых МТЗ выполнена с помощью программы двумерного численного моделирования магнитотеллурического поля. Глубинная часть полученной геoeлектрической модели содержит субвертикальную аномалию повышенной электропроводности на глубинах 4-8 км, которая отражает наличие глубинного разлома. Природа этой аномалии связывается с наличием гидротермальных растворов.

### **Введение**

Камчатка характеризуется высокой гидротермальной активностью. Гидротермальные системы представляют повышенный интерес для использования глубинного тепла земли с целью получения электрической энергии. Геотермальные электростанции сооружены в районах Мутновской и Паужетской гидротермальных систем. Имеется ряд других гидротермальных систем, изученных геологическими методами, бурением и малоглубинной геофизикой. Однако из-за ограниченной глубинной информации трудно судить о перспективах гидротермальных систем для длительного их использования с целью получения гидротермальной энергии. Таким районом является Больше-Банная гидротермальная система, расположенная на расстоянии около 70 километров от г. Петропавловска-Камчатского (рис.1). Здесь в 1961-1969 г.г. Камчатским геологическим управлением выполнен большой объём геолого-геофизических исследований с целью изучения и разведки месторождения парогидротерм. Из-за отсутствия сведений о глубинном строении месторождения трудно судить о его природе и перспективах для длительного использования с целью получения электроэнергии. Поэтому, в 2015 году Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН выполнены глубинные исследования месторождения методом магнитотеллурического зондирования. Они позволили получить информацию о строении месторождения до глубин около 8 километров. Методике и результатам изучения глубинной электропроводности месторождения посвящена настоящая статья.

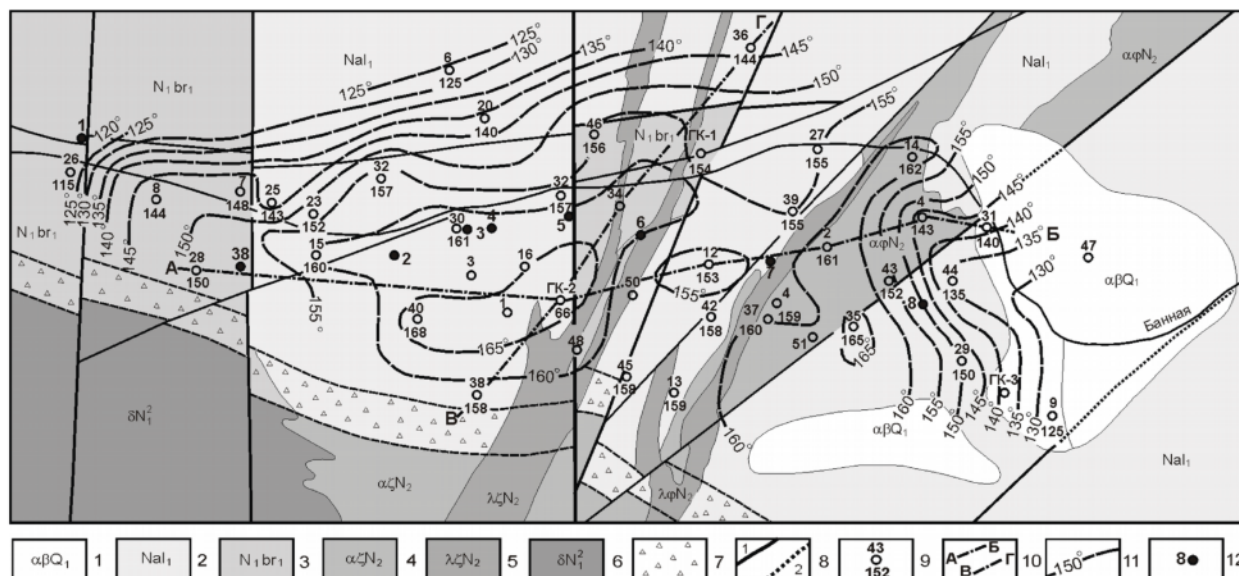


**Рис.1.** Расположение района Больше-Баннх термальных источников на Камчатке (отмечено чёрным кругом) [7].

### Геолого-геофизическая характеристика района

Сведения о геологическом строении района приводятся по данным публикаций и отчётов [3-7, 9, 11]. Он расположен в юго-западной части Начикинского прогиба, в области сочленения его со Срединным камчатским массивом. Эта область характеризуется широким развитием крупных тектонических нарушений.

В районе гидротермальных источников распространены породы палеогенового, неогенового и четвертичного возраста (рис.2). Здесь выделяются сверху вниз образования паратунской свиты ( $N_{1pr}$ ), берёзовской свиты ( $N_{1br}$ ) и алнейской серии ( $N_{al}$ ). Породы паратунской свиты представлены туфогенными песчаниками, алевролитами, туффитами. Они перекрыты лавами среднего состава берёзовской свиты - дельзодацитами и их туфами. Выше несогласно залегают образования алнейской серии - липариты и их туфы. Местами отмечаются базальтовые покровы древнечетвертичного и четвертичного возраста. Эффузивно-пирокластические образования андезит-дацитового состава миоценового возраста являются водовмещающими для парогидротерм. Эти образования прорваны интрузиями диоритов, а также многочисленными дайками и субвулканическими телами липаритов, дацитов, андезитов, которые играют экранирующую роль для потока перегретых вод.



**Рис.2.** Схематизированная геолого-геотермическая карта Больше-Банного месторождения перегретых вод [6]: 1 – четвертичные базальты и андезито-базальты; 2 – алнейская серия, нижняя пачка; 3 – берёзовская свита, нижняя пачка; 4 – плиоценовые субвулканические андезито-дациты и андезиты; 5 – плиоценовые субвулканические липарито-дациты и дациты; 6 – позднемиоценовые диориты Мало-Банного интрузивного массива; 7 – брекчии южного сброса; 8 – разрывные нарушения, установленные (1) и проходящие под четвертичными отложениями (2); 9 – скважины: сверху – номер, внизу – температура в градусах Цельсия на абсолютной отметке 200 метров; 10 – линии геотермических разрезов; 11 – геоизотермы; 12 – точки МТЗ.

Район исследований характеризуется дизъюнктивной тектоникой. Здесь широко развита сеть разломов субширотного и северо-восточного простирания, определившая блоковое строение. Падение разломов преимущественно крутое, амплитуды смещения от 50-100 до 250-400 метров. Перегретые воды имеют трещинно-жильный характер. Большинство водопритоков, вскрытых скважинами, приурочены к трещинам, оперяющим тектонические нарушения и к зонам контактов рвущих тел с вмещающими породами. Породы, слагающие разрез до изученных глубин, практически водонепроницаемы (пористость меняется от 0,0001 до 0,004 дарси, пористость насыщения от 2 до 9-18 %). Наименьшая глубина вскрытия водопритоков (от 20 до 200 метров) характерна для наиболее приподнятого центрального блока (скважины 12, 16, 32, ГК-2 и др.). В опущенных восточных блоках (скважины 21, 31, 33, 35 и др.) водопритоки приурочены к глубинам от 250-450 до 600-700 метров. Особенности циркуляции перегретых вод определяют характер распределения температур по глубине и латерали. Максимальные температуры (162-171°) свойственны для центрального (скважины 12, 30, 34, ГК-2 и др.) и восточного (скважины 2, 14, 35, 51 и др.) участков месторождения.

Поисково-разведочными работами наиболее детально изучен район выхода парогидротерм Больше-Банной системы. Здесь, наряду с детальными геологическими и малоглубинными геофизическими исследованиями, пробурены десятки скважин глубиной в первые сотни

метров и одна скважина глубиной 1015 метров. По этим данным получено представление о строении гидротермальной системы до глубины 400-500 метров.

Гидрогеологические разрезы свидетельствуют о погружении геоизотерм в южном и восточном направлениях, что отражает направление движения перегретых вод к очагу разгрузки с юга и юго-востока. Минерализация вод, вскрытых скважинами, меняется по потоку в пределах от 0,8 до 1,5 г/л. По гидрогеологическим данным предполагается, что Больше-Банная и Карымчинские термы могут быть связаны с единой термоаномалией в недрах вулканического сооружения. Формирование гидротермальных систем в районе этого сооружения, возможно, являются следствием внедрения глубинного флюида в водонапорные системы конкретных геологических структур [1, 10, 12].

Информацию о физических свойствах пород на исследуемой территории дают данные геофизических исследований. По данным ВЭЗ [3] верхняя часть геоэлектрического разреза примерно до глубин в первые десятки метров характеризуется сопротивлениями до сотен – первых тысяч Ом·м. Ниже залегает низкоомный горизонт сопротивлением в единицы – первые десятки Ом·м. Мощность этого слоя первые сотни метров. Этот слой связывается с насыщенностью пород минерализованными растворами. В средней части площади низкоомные аномалии приурочены к выходам термальных источников. В основании разреза залегает толща, сопротивление которой возрастает с глубиной до сотни Ом·м.

Представление об электропроводности земной коры и верхней мантии дают результаты МТЗ по региональному профилю, пересекающему район исследования [8]. Больше-Банная гидротермальная система приурочена к крупному блоку литосферы, в котором обобщённый геоэлектрический разрез представляется в следующем виде. В верхней части разреза выделяется слой с удельным электрическим сопротивлением около 15 Ом·м мощностью примерно 0,5 км. Ниже располагается слой с удельным электрическим сопротивлением 60 Ом·м, мощностью до 3,5 км. Он подстилается породами кристаллического фундамента с сопротивлением 1000 Ом·м. В земной коре на глубинах 10-35 км выражен слой пониженного электрического сопротивления в первые единицы Ом·м. Природа слоя связывается с наличием жидких флюидов (высокоминерализованных гидротермальных растворов).

### **Методика работ**

Магнитотеллурические зондирования выполнены по профилю протяженностью 1,5 км с шагом 100-500 м. Наблюдения магнитотеллурического поля осуществлялась в диапазоне периодов 0.0001-100 с при помощи станции MTU-5A производства канадской фирмы «Phoenix Geophysics Ltd». Для регистрации электрического поля использовалась четырёхэлектродная крестообразная электрическая измерительная установка, заземленная слабополяризующимися электродами. Длина электрических линий – 50 метров, азимут линий – 0° и 90°. Магнитные датчики также ориентировались по азимутам 0° и 90°. Для подавления влияния ветровых помех и микросейсм электроды размещались в ямы глубиной около 30 см и присыпались

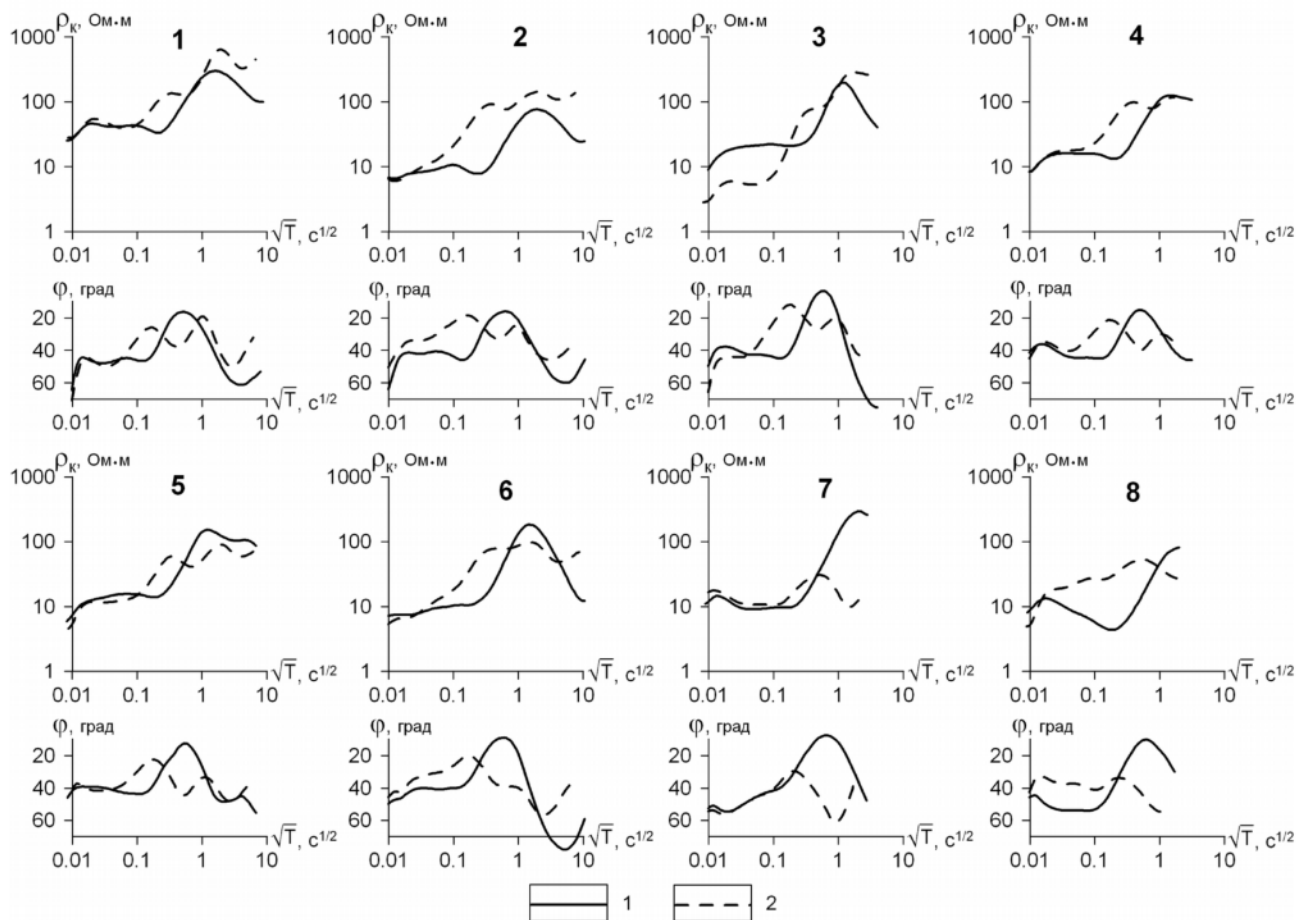
землей, а магнитные датчики устанавливались с использованием треноги, так же присыпанной землёй.

### **Методика обработки и анализа магнитотеллурических данных**

Анализ характера и степени геоэлектрической неоднородности среды выполнен с помощью полярных диаграмм импедансов [2], параметра неоднородности [13] и параметра асимметрии [15]. Параметр неоднородности на коротких периодах имеет значения первые десятые доли, что характеризует разрез как близкий к квазиоднородному. Полярные диаграммы на периодах 0,0001 - 0,01 с имеют форму, близкую к кругу, дополнительные импедансы на порядки меньше основных. На длинных периодах параметр неоднородности возрастает, что связано с влиянием крупных структур. Параметр асимметрии и полярные диаграммы импедансов свидетельствуют, что на длинных периодах вариации геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в виде двумерных, что обусловлено вытянутостью основных структурных зон в северо-восточном направлении.

В основу интерпретации положены кривые, полученные в главных направлениях. Они в большинстве случаев ориентированы по простиранию и вкрест простирания основных структурных зон. В дальнейшем эти кривые будем называть продольными и поперечными. Анализ амплитудных и фазовых кривых свидетельствует о существовании дисперсионных соотношений между ними. Это даёт возможность использовать их для совместной интерпретации.

Рассмотрим полученные продольные и поперечные кривые МТЗ (рис.3). Как мы уже отмечали, кривые МТЗ получены на пунктах, расстояние между которыми составляет первые сотни метров. На таком небольшом участке кривые МТЗ в низкочастотной области по своей форме должны быть близки, т.е. должны содержать подобное распределение глубинной электропроводности. Это в большей мере свойственно продольным кривым, обладающим повышенной разрешающей способностью к наличию глубинных проводящих зон. На продольных кривых выражен верхний относительно проводящий слой сопротивлением в единицы-первые десятки Ом·м. Максимум на продольных кривых в диапазоне периодов от половины секунды до первых секунд связывается с высокоомной толщей пород кристаллического фундамента. На продольных амплитудных и фазовых кривых в низкочастотной области (на периодах 10-100 с) проявляются нисходящие ветви или минимумы, которые могут быть обусловлены проводящей зоной в кристаллическом фундаменте. Поперечные кривые в низкочастотной области имеют более сложный вид. Они в меньшей мере согласуются по форме на протяжении профиля. Характерно, что в высокочастотном диапазоне они согласуются с данными вертикального электрического зондирования, отражающими верхнюю часть геоэлектрического разреза. Известно, что поперечные кривые в большей мере подвержены влиянию высокоомных экранов в виде магматических тел и глубинных разломов северо-восточного простирания. Влияние разломов выражено в расхождении продольной и поперечной кривой. Данный эффект проявляется на большинстве кривых в диапазоне периодов 0,001-1 с. Он отражает на-



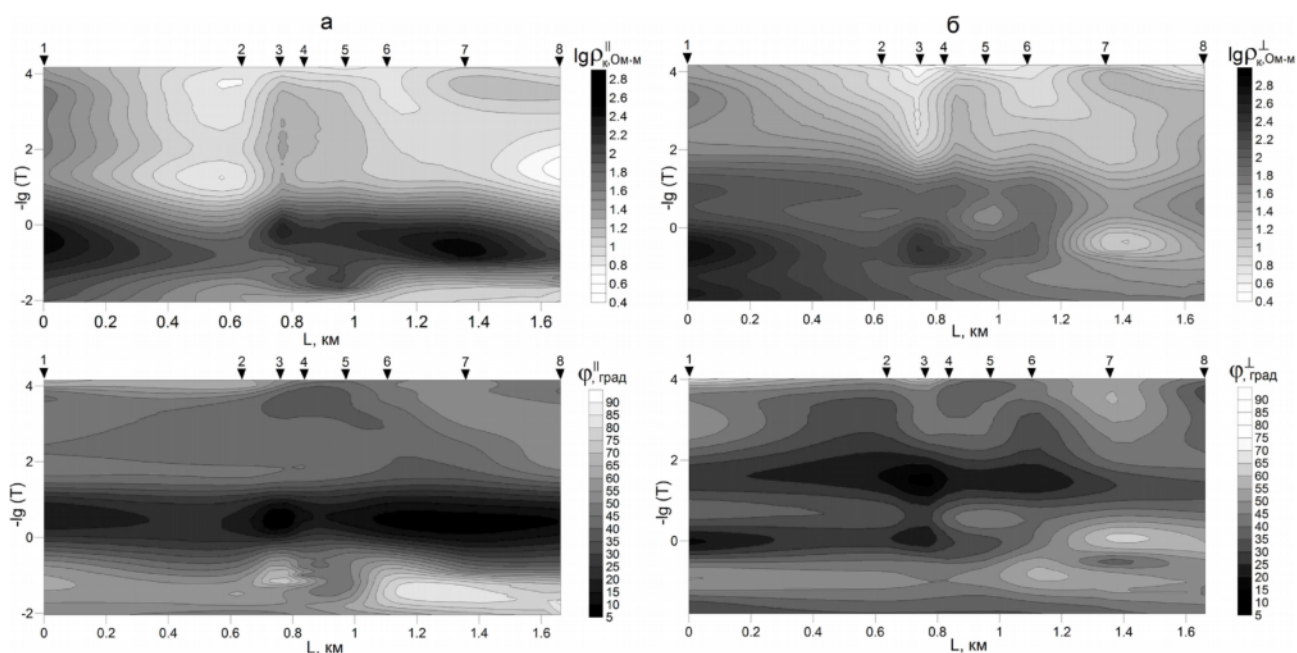
**Рис.3.** Продольные (1) и поперечные (2) кривые кажущегося электрического сопротивления и фаз импеданса.

личие разрывных нарушений на глубинах до 1 км, что установлено по скважинам и другим геолого-геофизическим данным.

### Интерпретация результатов МТЗ

Качественную информацию об изменении электропроводности по профилю и с глубиной дают псевдоразрезы кажущегося сопротивления и фазы импеданса в зависимости от периода вариации (рис. 4). На псевдоразрезах кажущегося сопротивления в большой мере выражено влияние геоэлектрических неоднородностей по сравнению с псевдоразрезами фаз импеданса, которые слабо реагируют на локальные геоэлектрические неоднородности. Следует также отметить, что глубинные проводящие зоны на псевдоразрезах фазы импеданса проявляются на более ранних периодах и они выражены более заметно, чем на псевдоразрезах кажущегося электрического сопротивления.

На псевдоразрезах кажущегося продольного сопротивления (рис.4, а) хорошо выражена зона пониженного электрического сопротивления (МТЗ № 2-5 ( $T = 0,001$  с) - МТЗ № 8 ( $T = 0,01$  с)). Она также проявляется на псевдоразрезе фазы импеданса. На низких частотах ( $T = 1-10$  с) фиксируется зона повышенного электрического сопротивления и пониженных значений



**Рис.4.** Продольные (а) и поперечные (б) псевдорезы кажущихся удельных электрических сопротивлений и фаз импеданса.

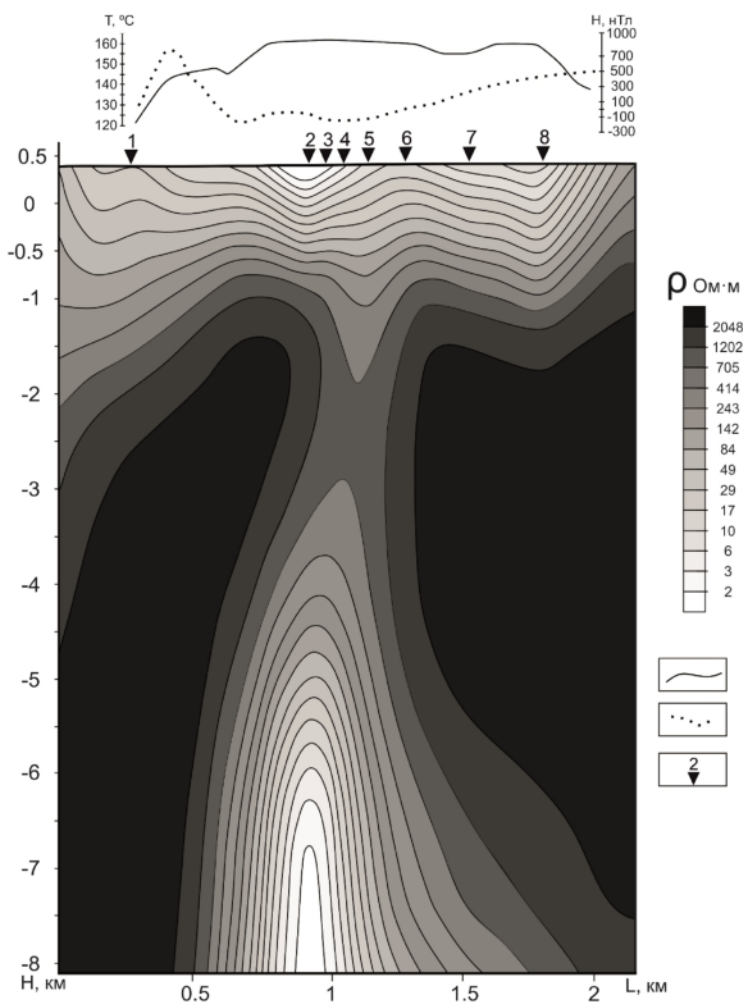
фазы импеданса. В основании псевдореза фаз импеданса хорошо выражена зона повышенных значений фаз, связанная с повышенной электропроводностью.

Псевдорезы поперечного кажущегося электрического сопротивления и фазы импеданса (рис.4, б) свидетельствуют о наличии геоэлектрических неоднородностей как на высоких, так и низких частотах. В верхней части псевдореза кажущихся сопротивлений выделяется аномальная зона пониженных электрических сопротивлений (МТЗ № 2-7), связываемая с наличием трещиноватых пород, насыщенных минерализованными растворами. Это подтверждается данными ВЭЗ и глубокого бурения. На низких частотах также выделяются зоны повышенного и пониженного электрических сопротивлений, которые имеют более сложный вид из-за влияния разломов в верхних частях осадочно-вулканогенной толщи.

### Результаты исследований

Инверсия кривых МТЗ выполнена по программе *Maskie* [14]. Стартовая геоэлектрическая модель по профилю задана по данным формальной интерпретации кривых МТЗ. Геоэлектрические параметры верхних частей осадочно-вулканогенного чехла получены по данным бурения и ВЭЗ. Решение обратной задачи сводилось к минимизации расхождения между экспериментальными и модельными кривыми МТЗ. В результате расчётов среднеквадратичная ошибка между модельными и экспериментальными кривыми не превышает 5 %.

Рассмотрим результаты моделирования, приведённые на рис. 5. Основным элементом модели является глубинная проводящая зона в земной коре, которая поднимается с глубины 8 км до глубины примерно 5 км в районе МТЗ № 2-5. Удельное электрическое сопротивление зоны составляет около 5-10 Ом-м. По данным региональных исследований в рассматриваемой



**Рис.5.** Глубинная геоэлектрическая модель Больше-Банной гидротермальной системы: 1 – график температуры на абсолютной отметке 200 м [6]; 2 – график напряжённости магнитного поля [9]; 3 – пункт наблюдения МТЗ и его номер.

мом районе выделяется коровый проводящий слой на глубинах 10-35 км. Он связывается с наличием жидких флюидов - гидротермальных растворов, насыщающих слой с повышенной пористостью пород. Предполагается, что выявленная субвертикальная проводящая зона в районе Больше-Банной гидротермальной системы связана с региональным слоем повышенной электропроводности в земной коре. По данным бурения в районе Больше-Банного гидротермального месторождения развита широкая сеть тектонических нарушений, которые могут проникать до глубин в первые километры. Они создают повышенную проницаемость геологической среды для проникновения гидротермальных растворов из субвертикальной проводящей зоны, представляющей собой канал, по которому гидротермальные растворы поднимаются в верхние части земной коры и по трещинным зонам проникают на поверхность в виде гидротермальных источников.

### Выводы

По данным анализа магнитотеллурических параметров геоэлектрическая модель района исследований может быть принята в виде двумерно-неоднородной. В основу интерпретации положены кривые МТЗ по главным направлениям, отвечающим простиранию и вкрест про-



стирания основных структурных зон. Продольные кривые МТЗ в лучшей мере отражают наличие глубинных проводящих зон. Поперечные кривые в большей мере характеризуют геоэлектрические неоднородности верхней части разреза.

Инверсия кривых МТЗ выполнена в рамках двумерно-неоднородной модели с одновременным использованием продольных и поперечных кривых кажущегося сопротивления. Полученная геоэлектрическая модель характеризует основные особенности в распределении электропроводности пород до глубины примерно 8 километров. В верхней части разреза удельное электрическое сопротивление меняется от первых единиц до первых десятков Ом·м. Оно в основном зависит от минерализации вод и степени насыщенности ими трещин в породах. Низкие значения удельного электрического сопротивления отмечаются в районе выхода гидротермальных источников, где минерализация гидротерм составляет 0,8-1,5 г/л.

В нижней части разреза выявлена субвертикальная аномалия повышенной электропроводности на глубинах от 5 до 8 км. Удельное электрическое сопротивление пород аномалии составляет первые десятки-единицы Ом·м. За пределами аномалии оно возрастает до первых тысяч Ом·м. Ширина аномалии в верхней части составляет первые сотни метров. С глубиной она возрастает примерно до 1 км.

Аномалия повышенной электропроводности, по-видимому, отражает зону повышенной трещиноватости пород, связанную с глубинным разломом. Повышенная электропроводность зоны обусловлена наличием гидротермальных растворов, они проникают по зонам повышенной проницаемости в вышележащую вулканогенную толщу и местами по трещинам выходят на поверхность в виде термальных источников. Предполагается, что выявленная аномалия имеет связь со слоем повышенной электропроводности на глубинах 10-35 км, выделенным по результатам региональных МТЗ.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ №№ 16-35-00088 и 16-05-00059, а также по проекту ДВО РАН № 15-1-2-008.

#### Список литературы

1. *Аверьев В.В.* Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью. Современный вулканизм. М.: Наука, 1966. С. 118-128.
2. *Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. Научный мир. 2009. 677 с.
3. *Коваленко В.Я., Зальцманович И.И.* Промежуточный отчет о результатах буровых и геофизических работ на Больше-Банном месторождении термальных вод в 1962 году. П-К., 1963. 104 с.
4. *Кононов В.И., Поляк Б.Г.* Большие Банные источники на Камчатке. Гидрогеотермические условия верхних частей земной коры. М.: Наука, 1964. С. 52-71.
5. *Краевой Ю.А., Коваленко В.Я., Евтухов А.Д.* Больше-Банная гидротермальная система на Камчатке. Вулканизм и глубины земли. М.: Наука, 1971. С. 246-253.

6. Краевой Ю.А., Охаткин В.Г., Серезников А.И. Результаты гидрогеологических и геотермических исследований Большебанной и Карымчинской гидротермальных систем. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 179-211.
7. Леонов В.Л., Rogozin A.H., Соболевская О.В. Результаты термометрической съёмки Больше-Баннх термальных источников // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. П-К.: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 197-206.
8. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лоцинская Т.А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Физика Земли. 1996. №11. С. 49-57.
9. Соловьёв В.К. Отчёт о работах Больше-Банного геофизического отряда за 1965 год. П-К., 1966. 60 с.
10. Уайт Д.Е. Термальные воды вулканического происхождения. Геохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир, 1965. С. 78-100.
11. Шеймович В.С., Патока М.Г. Геологическое строение зон активного кайнозойского вулканизма. М.: Недра, 1989. 207 с.
12. Эллис А., Уилсон С. Геохимия ионов щелочных металлов в гидротермальной системе Вайракей. Геохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир, 1965. С. 108- 127.
13. Bahr K. Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion. J. Geophysics. 1988. № 62. P. 119 - 127.
14. Rodi, W., R. L. Mackie, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion // Geophysics. 2001. Vol. 66. P. 174-187.
15. Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, M/T. Cambridge. 1967.