

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА МИКРОСЕЙСЧЕСКОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ НА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ НА ПРИМЕРЕ  
НИЖНЕ-КОШЕЛЕВКОЙ ТЕРМОАНОМАЛИИ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА).

*Абкадыров И.Ф.<sup>1</sup>, Горбатилов А.В.<sup>2</sup>, Степанова М.Ю.<sup>2</sup>, Букатов Ю.Ю.<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

Проведены геофизические исследования на Нижне-Кошелёвской термоаномалии методом микросейсмического зондирования. Метод основывается на анализе пространственного распределения амплитуд вертикальной составляющей микросейсмического поля для всех частот спектра при условии, что вертикальная компонента поля определяется вкладом фундаментальных мод волн Рэлея. В результате эксперимента термоаномалия выделилась в виде низкоскоростной чашеобразной области с небольшой глубиной (до 200-300 м) с узким корнем, уходящим на глубину 1000 м. На геологическом разрезе, проходящем через термоаномалию с севера на юг, имеются разломы по краям аномалии. Эти разломы проявляются и на соответствующих микросейсмических разрезах.

*Ключевые слова:* волна Рэлея, микросейсмическое зондирование, микросейсмические, термоаномалия, геофизические исследования, Кошелёвский вулканический массив.

### **Введение**

В августе 2008 года были начаты и продолжены в 2009 году геофизические исследования на Нижне-Кошелёвской термоаномалии методом микросейсмического зондирования. Метод базируется на пространственно-частотном анализе интенсивности фонового естественного микросейсмического поля. В методе в качестве зондирующего сигнала используется естественное поле микросейсмических волн, преимущественно представленных поверхностными волнами рэлеевского типа. Метод реализуется в предположении, что основной вклад в вертикальную компоненту микросейсмического поля осуществляется за счет фундаментальных мод рэлеевских поверхностных волн различных частот. Целью настоящих исследований являлось изучение глубинного строения в районе термоаномалии, отработка методики и применимости метода на геотермальных полях. Основной задачей проводимых исследований являлось изучение возможностей метода при исследовании геотермальных систем. Причинами выбора

именно такого метода исследований являлось минимальное количество затрат при проведении работ, а также минимальное воздействие на окружающую среду, что немаловажно при проведении работ на охраняемых территориях.

### **Краткая геологическая характеристика района работ**

Нижне-Кошелевская термоаномалия приурочена к действующему вулкану Кошелевский (Южная Камчатка) и расположена на его западном склоне. Кошелевский вулканический массив сформирован в пределах Паужетско-Камбально-Кошелевского геотермального района (рис. 1).

Данный район относится к южному сегменту Восточно-Камчатского вулканического пояса [8]. Геологическое строение района характеризуется структурами и породами островодужного комплекса. Нижний структурный ярус представлен вулканогенными и осадочными образованиями олигоцен-среднемиоценового возраста, вмещающими интрузивные тела от основного до кислого состава. Средний ярус образован осадочно-вулканогенными толщами среднего миоцена-плиоцена, верхний ярус - четвертичный этап развития островной дуги и сложен вулканическими породами плейстоцен-голоценового возраста. Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район непосредственно приурочен к выделенной ранее субкольцевой тектоно-магматической структуре, представляющей собой пологий аккумулятивно-тектонический свод размерами более 35 x 50 км, в центре которого расположена вулкано-тектоническая депрессия четвертичного возраста размером 20 x 25 км [6].

Нижнее-Кошелевские парогидротермы расположены на высоте 750 – 800 м над уровнем моря. Термопроявления располагаются на дне и на северном пологом склоне оврага ручья Гремучего, растянувшегося в широтном направлении, и сосредоточены в геоморфологической структуре размером 250 x 500 м. Наиболее характерной формой термопроявлений явля-

ются большие кипящие водоемы, мелкие кипящие воронки, грязевые котлы, паровые струи. Естественный вынос тепла на Нижне-Кошелевском участке составляет 25000 ккал/с [1].

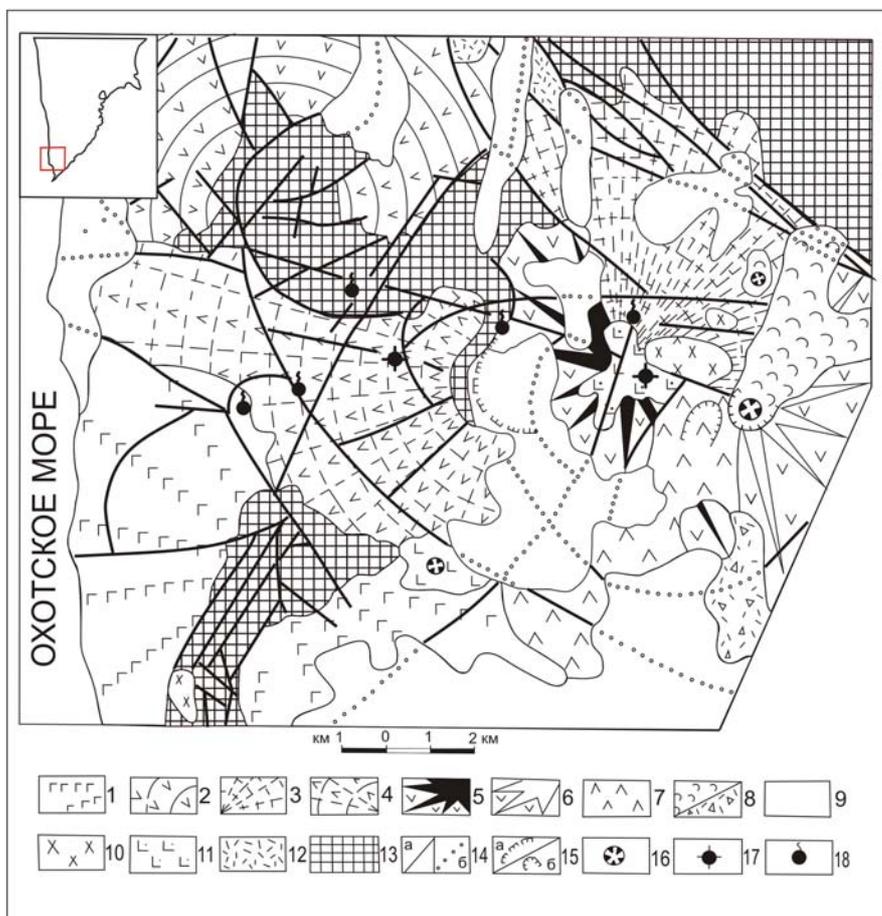


Рис.1 Схематическая карта геологического строения и термопроявлений Кошелевского вулканического массива по данным [1].

1, 2 – эффузивные и пирокластические образования нижнечетвертичных вулканов: 1 – вулкан Дед и Баба ( $\alpha\beta QI$ ); 2 – вулкан Третья Речка ( $\alpha\beta QII$ ); 3-8 – эффузивные и пирокластические образования Кошелевского вулканического массива: 3 – вулкан Древний ( $\alpha QII$ ); 4 – вулкан Западный ( $\alpha QIII$ ); 5 – вулкан 1545 (Валентин) ( $\alpha Q2III$ ); 6 – вулкан Восточный ( $\beta QIII-IV$ ); 7 – вулкан Центральный ( $\alpha\beta QIII-IV$ ); 8 – образования Активного кратера: а) лавовые потоки ( $\beta QIV$ ), б) отложения направленного взрыва ( $QIV$ ); 9 – рыхлые отложения различного генезиса ( $QII-QIV$ ); 10 – экструзии голоценового возраста: а) андезитов-дацитов и дацитов ( $\alpha\gamma QIV$ ), б) базальтов ( $\beta QIV$ ); 12 – субвулканические интрузии долеритов ( $\beta QIII-IV$ ); 13 – дочетвертичные эффузивы ( $\alpha N1-N2$ ); 14 – разрывные нарушения: а) прослеженные и расшифрованные по аэрофотоснимкам, б) под рыхлыми отложениями; 15 – а) кальдеры; б) эродированные кратеры и воронки взрывов; 16 – кратеры эффузивных и шлаковых конусов; 17 – термальные поля (парогидротерм); 18 – термальные источники

## Метод микросейсмического зондирования

Результаты большого количества экспериментов и численное моделирование показывают, что в общем случае неоднородности земной коры искажают спектр низкочастотного микросейсмического поля в своей окрестности, а именно, на поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды определенной частоты  $f$  уменьшаются, а над низкоскоростными неоднородностями возрастают. Частота  $f$  связана с глубиной залегания неоднородности  $H$  и скоростью фундаментальной моды волны Рэлея  $V_R(f)$  соотношением  $H = K * V_R(f) / f$ , где  $K$  - числовой коэффициент, близкий к 0,5. Это происходит потому, что зона максимальных сдвиговых напряжений в фундаментальной моде рэлеевской волны, а значит и зона чувствительности по отношению к включениям расположена на глубине порядка  $0,3\lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны Рэлея. Метод реализуется в обоснованном допущении, что вертикальная компонента микросейсмического поля определяется преимущественным вкладом фундаментальных мод Рэлея.

Вопрос о точности восстановления скоростных неоднородностей среды и разрешающей способности метода решался на основе численного моделирования и экспериментальных оценок. Было показано, что при освещении крупных неоднородностей микросейсмическими волнами со всех сторон положение вертикальных и горизонтальных границ при отсутствии ошибок измерений может быть восстановлено точно. Размеры неоднородностей должны превышать длину волны в 1,5 и более раз.

Положение по горизонтали и глубине «центров тяжести» малых неоднородностей (с размерами меньше зоны Френеля соответствующей волны) также может быть восстановлено точно, независимо от соотношения «размер-длина волны». Однако форма включений в этом случае представляется обобщенным облаком с размерами зоны Френеля. Две малые неоднородности с расстоянием между ними менее зоны Френеля представляются

единым объектом с общим центром тяжести. Экспериментальные измерения для крупных объектов показали, что точность метода по восстановлению вертикальных границ оценивается величиной  $\sim 10\%$  от длины зондирующей волны, или соответственно  $\sim 20\%$  от глубины залегания неоднородности. Для горизонтальных границ точность также оценивается как  $\sim 20\%$  от глубины залегания.

### **Методика проведения работ**

Исследования можно разделить на два этапа. В 2008 году работы на данном объекте носили опытно-методический характер. Для этого на исследуемой площади была разбита сеть из девяти параллельных друг другу профилей с шагом 250 м, ориентированных с севера на юг, протяженностью 1,5 км. Каждый профиль содержал 7-8 точек измерений с шагом 250 м. Таким образом, была образована сеть наблюдений ( $> 60$  точек), площадью  $1,5 \times 2$  км, в пределах которой находилась термоаномалия. В 2009 году, учитывая опыт и результаты предыдущего года, для получения более детальной картины строения была проведена регистрация микросейсм по двум ортогональным профилям с шагом 100 м. В окрестностях термоаномалии шаг уменьшался до 20 – 40 м. Протяженность профиля С-Ю составила около 4 км, профиля В-З – 1,5 км. В связи поломкой записывающих устройств на двух сейсмостанциях, для окончательной обработки был взят фрагмент профиля С-Ю протяженностью лишь 2,5 км. Для регистрации микросейсм использовались три сейсмические станции MARS-lite с трехкомпонентными сейсмодатчиками LE-3Dlite немецкой фирмы Lennartz. При регистрации применялись следующие параметры: частотный диапазон канала – 0,3-1 Гц, чувствительность канала –  $400 \text{ В} \cdot \text{с/м}$ , частота дискретизации - 250 отчетов в секунду. Длительность измерений в каждой точке составляла 1 час, что соответствует времени достижения статистической устойчивости спектра микросейсмического сигнала [2; 3; 4].

Техника проведения микросейсмического зондирования подразумевает регистрацию сигнала на опорной точке в пределах исследуемого полигона, что позволяет исключить влияние микросейсм, не связанных с геологическими свойствами среды, на спектральные характеристики сигнала. В связи с этим, одна станция использовалась, как опорная, и одновременно двумя оставшимися производились измерения по профилям от точки к точке.

### **Обработка полученных данных**

Обработка и построение изображений состоят в том, что для каждой частоты  $f$  в спектре строится кривая интенсивности микросейсмического сигнала, зависящая от положения измеряемой точки на профиле. Эта кривая привязывается к глубине. На основе всей совокупности кривых распределения интенсивностей строится поверхность, по горизонтальной оси которой откладывается расстояние вдоль исследуемого профиля, а по вертикальной оси – соответствующая глубина. При этом распределение интенсивностей микросейсм строится по отношению к базовой станции. В результате обработки получается поверхность, отражающая распределение относительных интенсивностей микросейсмического сигнала при его прохождении в пределах площади исследования. Поскольку имеется определенная непропорциональная обратная зависимость между скоростью сейсмических волн в среде и их амплитудой, то результирующая поверхность фактически отражает распределение относительных скоростей в пределах изучаемой площади, хотя при этом данное результирующее распределение не дает возможности определить сами абсолютные значения сейсмических скоростей.

## Основные результаты

По данным 2008 года в результате построения пространственного распределения интенсивности микросейсмического сигнала (от 0 до 4 Дб) по всем точкам наблюдения выделяются две контрастные области с повышенной интенсивностью сигнала на севере, и с пониженной – на юге (рис. 2). Граница между этими областями проходит по разлому, который отражен в рельефе и выделяется по данным проведенных здесь ранее геологических работ [1; 7].

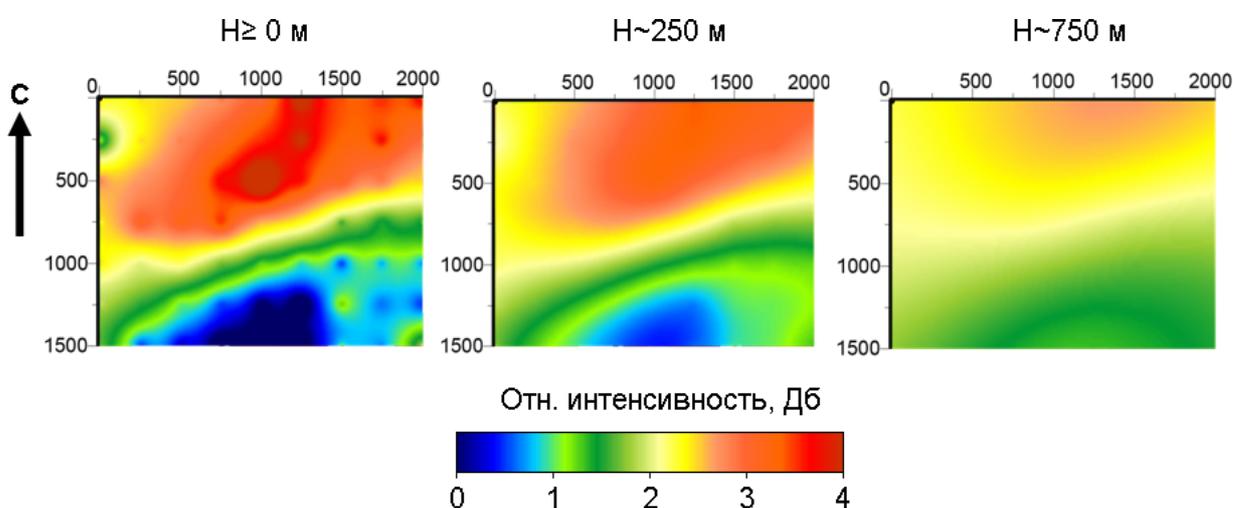


Рис.2 Пространственное распределение интенсивности микросейсмического поля по данным микросейсмического зондирования. Результат работ 2008 года.

Область с повышенными амплитудами (более низкими сейсмическими скоростями) приурочена к термоаномалии и, по-видимому, отражает зону водогазонасыщения, что свидетельствует о разуплотненном состоянии горной породы. Вторая область наоборот имеет более низкие амплитуды (повышенные скорости), что свидетельствует о более консолидированном состоянии горных пород.

Результат измерений 2009 года представляет собой вертикальный разрез, отражающий распределение относительных скоростей поперечных сейсмических волн (рис. 3).

На разрезе выделяется несколько контрастных зон. Наиболее интересная для нас зона расположена непосредственно под самой термоаномалии-

ей. По данным ранних геологоразведочных работ в результате бурения было вскрыто интрузивное тело диоритового состава, которое и определяет положение современной зоны кипения растворов. Как известно, при повышении температуры происходит раскрытие пор и микротрещин, что связано с процессами дегидратации минералов, проникновением воды, ее расклинивающим действием, термическим расширением минералов. Возрастание внутрипорового давления приводит к уменьшению эффективного напряжения и снижению скоростей упругих волн [5].

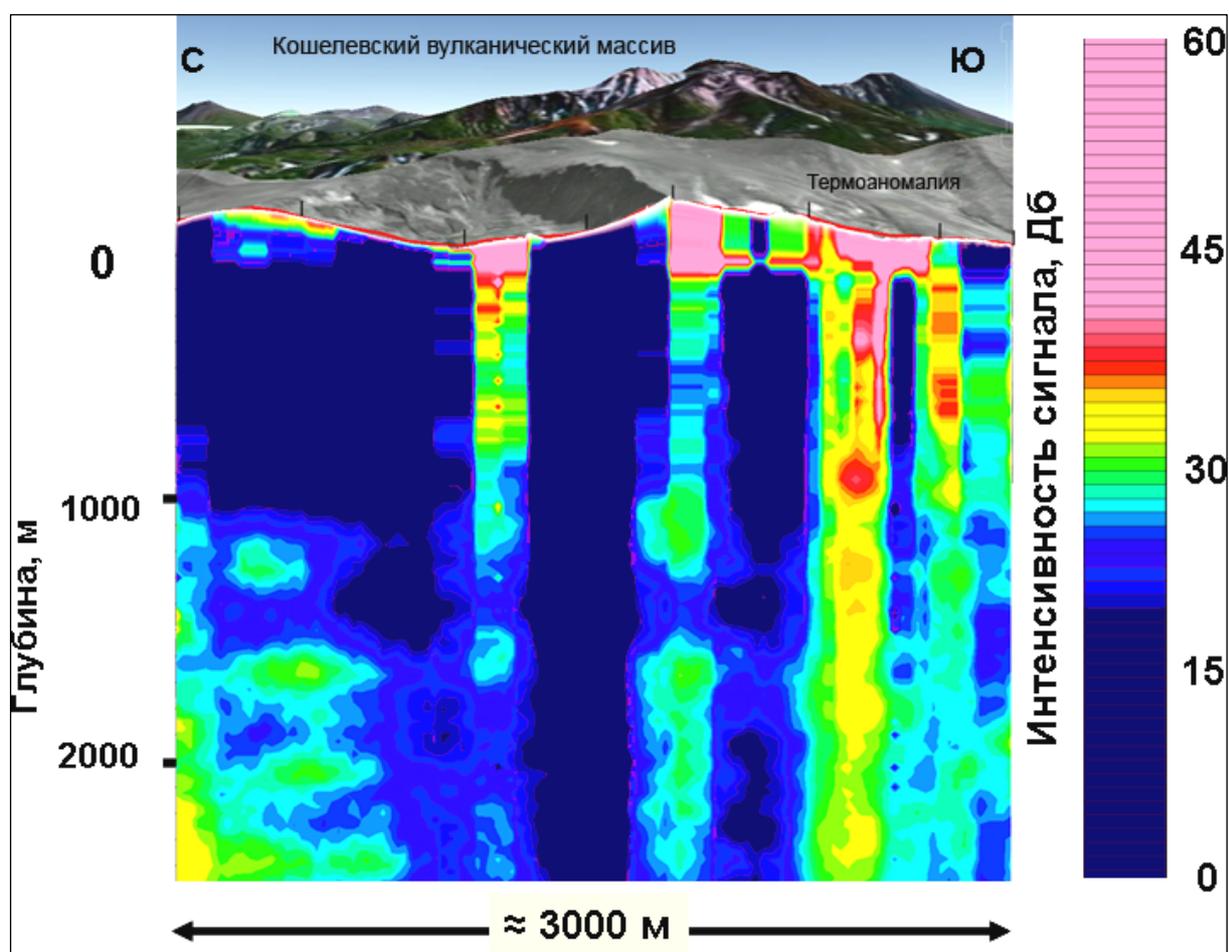


Рис. 3. Разрез по относительным скоростям поперечных сейсмических волн, полученный методом микросейсмического зондирования в 2009 г.

Таким образом, глубинное строение термоаномалии по данным микросейсмического зондирования представляет собой чашеобразную высокоамплитудную (от 45 до 60 Дб) область до глубин 200-300 м, с уходящим

на глубину порядка 1 км «узким корнем». К северу от термоаномалии прослеживается обширная низкоамплитудная область. По геологическим данным эта зона представляет лавово-экструзивный комплекс андезито-дацитового состава, в пределах которого скрываются интрузивные тела от габбро-диоритов до диоритов. В пределах этой области также выделяются две контрастные вертикальные низкоскоростные зоны. В данном методе такие зоны интерпретируются, как зоны тектонического нарушения, что также подтверждается геологическими данными.

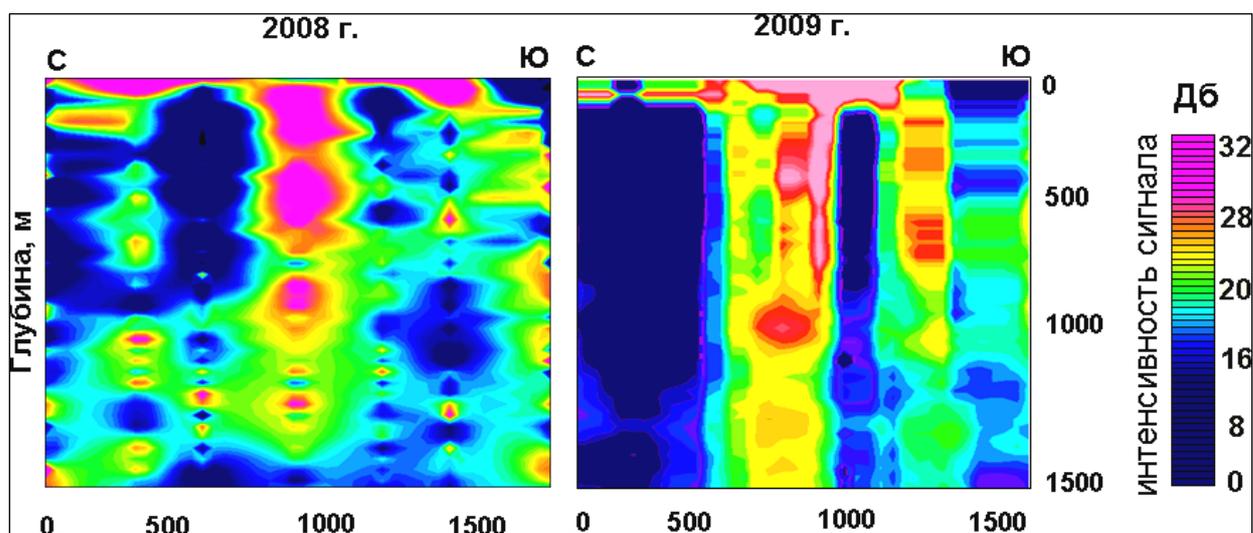


Рис.4. Разрезы по относительным скоростям поперечных сейсмических волн, полученные методом микросейсмического зондирования в 2008 и 2009 гг.

Кроме того, сравнение разрезов разных лет, проходящих через термоаномалию по одной линии (рис. 4), показало устойчивость результатов. Т.е. несмотря на разницу во времени в один год и различный шаг исследований, подтвердилось строение верхней части (до 200-300 м) термоаномалии в виде низкоскоростной области чашеобразной формы с узким корнем, уходящим на глубину около 1 км.

## Выводы

По данным микросейсмического зондирования, глубинное строение Нижне-Кошелевской термоаномалии в микросейсмическом поле представляет собой чашеобразную область (до глубины 200-300 м) с уходящим на

глубину (до 1000 м) «узким корнем». Сопоставление результатов микро-сейсмических исследований, проведенных с интервалом 1 год, показало удовлетворительную повторяемость общих структур верхней части земной коры в районе термоаномалии, несмотря на разный шаг измерений. Полученные методом низкочастотного микросейсмического зондирования результаты, соответствуют представлениям о геологическом строении района, что оправдывает выбор данного метода при исследованиях подобных геологических объектов.

Также стоит отметить низкую себестоимость и неприхотливость метода в условиях сложного рельефа, что делает этот метод более выигрышным по сравнению с методами классической сейсморазведки, при применении его в вулканических областях. Кроме того, метод микросейсмического зондирования имеет перспективу при количественных оценках запасов геотермальных ресурсов подобных месторождений.

Авторы искренне благодарят заведующего лабораторией геотермии д.г.-м.н. Рычагова С.Н. за организацию и помощь в проведении полевых работ.

Работы выполнялись в рамках проекта ДВО РАН № 09-III-A-08-430 по плану работ Южнокамчатско-Курильской экспедиции Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Вакин Е.А., Декусар З.Б., Сержников А.И., Спиченкова М.В. Гидротермы Кошелевского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 57-78.
2. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Арнозо Х., Монтесиньос Ф. Развитие модели острва Эль Иерро Канарского архипелага на основе комплексной интерпретации результатов низкочастотного микросейсмического зондирования и гравиметрических исследований // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008 а. С. 60-70.
3. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли, 2008 б. №.7. С. 66-84.
4. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли, 2008. №.1. С. 57-67.
5. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты // М.: Наука, 2009. - 328 с.
6. Рычагов С.Н., Давлетбаев Р.Г., Ковина О.В. Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2009. №2. С. 22-39.
7. Писарева М.В., Судакова И.А., Нажалова И.Н. Отчет о поисковых работах, проведенных на Нижне-Кошелевском месторождении парогидротерм в 1975-1984 гг. 1984 г.
8. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.

EXPERIENCE OF APPLICATION OF THE METHOD MICROSEISMIC  
SOUNDING ON GEOTHERMAL FIELDS ON EXAMPLE  
NIZHNE-KOSHELEVSKY THERMOANOMALY (SOUTHERN KAMCHATKA)

*Abkadyrov I.F.<sup>1</sup>, Gorbatikov A.V.<sup>2</sup>, Stepanova M.Yu.<sup>2</sup> and Bukatov Yu.Yu.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

<sup>2</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth*

Geophysical researches were carried out on Nizhne-Koshelevsky thermoanomaly with microseismic sounding method. Microseismic sounding method is based on the analysis of spatial distribution of amplitudes of a vertical component of a microseismic field for all frequencies in observed spectrum implying that vertical a field component is defined by the contribution of the fundamental mode of Rayleigh waves. We found as results of the experiment the thermoanomaly revealing as low- velocity crater-like area, with rather small depth (200-300m) having a narrow root tracing beneath at least on 1000 m. On the geological cross-section passing through thermoanomaly along N-S direction we find faults. These faults could be also revealed on the corresponding microseismic cross-sections.

*Key words:* Rayleigh wave, microseismic sounding, microseismics, thermoanomaly, geophysical researches, Koshelevsky volcanic massive.