

УДК 550.341.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**А.В. Кирюхин, А.Ю. Поляков, А.В. Мушинский, О.М. Топчиева**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
683006; e-mail avk2@kscnet.ru*

### **Введение**

Лабораторное определение теплофизических свойств горных пород является фундаментальной задачей геотермальных исследований, т.к. на этих параметрах основываются разнообразные геодинамические модели, подсчет геотермальных ресурсов и эксплуатационных запасов геотермальных месторождений, модели тепломассопереноса и различные технологии, связанные с извлечением и закачкой флюидов (пара, воды, нефти, газа и др.), особенно в подземных резервуарах трещинно-блокового строения. Наблюдения на высокотемпературных скважинах в связи с прогнозом землетрясений показали чувствительность плохопроницаемой матрицы двухфазных резервуаров к сейсмическим событиям [2], из чего также вытекает необходимость углубленных исследований ее теплофизических свойств. В Институте вулканологии ДВО РАН в 80-е годы Ф.А. Яновским [3] было налажено измерение теплопроводности горных пород, им было проанализировано более 200 образцов. По его данным, теплопроводность вулканогенно-осадочных пород из кернов скважин Камчатки изменяется от 1.0 до 2.4 Вт/м<sup>0</sup>С. При оценке геотермальных ресурсов Камчатки В.М. Сугробовым [8] удельная тепловая емкость флюидонасыщенных горных пород принималась равной 2.5-2.7 Дж/см<sup>3</sup> °С (по данным Циркуляра Геологической Службы США № 790). В настоящее время возникла необходимость продолжить разработку методики определения теплофизических свойств горных пород с использованием методов инверсионного моделирования (iTOUGH2) и с учетом появления нового технического оборудования (термологгеров и приборов дистанционного оптического сканирования тепловых характеристик).

### **Исходные данные**

Изучались образцы, отобранные на геотермальных месторождениях Камчатки. Для определения тепловых свойств выбуривались цилиндры диаметром 44 мм и высотой от 32 до 47 мм из девяти образцов горных пород (табл. 1). Определение минеральной плотности пород осуществлялось пикнометрическим методом в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН; определение плотности - весовым, по этим данным рассчитывалась их пористость (табл. 2). Плотность и пористость образцов пород определялась также в МГУ (Ю.В. Фролова, 2001 [1]), их петрографическое описание проводилось в ИВиС (Л.П. Вергасова и Ю.М. Пузанков, 2008). Значения минеральной плотности пород, определенные в МГУ и ИВиС, в целом совпадают (невязка составляет не более 4%).

### **Определение удельной теплоемкости**

Проведение эксперимента по определению удельной теплоемкости горных пород включает два этапа: 1) равновесный нагрев калориметра с образцом и термологгером до постоянной температуры  $T_2$ ; 2) равновесное охлаждение калориметра в холодильнике, имеющем постоянную температуру  $T_1$ . Для регистрации температуры в процессе проведения эксперимента использовались термологгеры НОВО U12 (автономные программируемые цифровые термометры с энергонезависимой памятью и

Таблица 1. Образцы пород для теплофизических исследований

№ обр.	Код пробы	Место отбора	Дата отбора	Описание образца
0	AK2607-2007-1	Долина Гейзеров	26.07.2007	Пемзовые туфы. Вторичные минералы (40%): монтмориллонит, морденит, клиноптилолит.
1	AK0210-2000-2	Малки, гора Зеркальце	2.10.2000	Туф кристаллокластический полностью измененный. Вторичные минералы: хлорит, карбонаты, альбит.
2	AK0210-2000-3	Малки, левый берег р. Быстрая	3.10.2000	Туф измененный по цементу. Вторичные минералы: хлорит, кварц.
3	AK0110-2000-1	Паратунское геотермальное месторождение, обнажение диоритов у руч. Серебрянный	1.10.2000	Диорит. Вторичные минералы: цеолит, альбит, кварц, эпидот, кальцит.
4, 5	AK3009-2000-1	Паратунское геотермальное месторождение, кернохранилище	30.09.2000	Литокластические туфы, измененные. Обломки представлены эффузивами (диориты, андезиты). Вторичные минералы - хлориты, карбонаты, эпидот и кварц.
6, 8	AK0210-2000-1	Малки, гора Зеркальце	2.10.2000	Метаалевролит трещиноватый. Заполнение трещин кварцем и клиноцоизитом.
7	AK3009-2000-2	Паратунское геотермальное месторождение, кернохранилище	30.09.2000	Андезибазальт. Вторичные минералы: смектит.

Примечание. Петрографическое описание образцов № 1-8 выполнено Ю.В. Фроловой, образца № 0 - Л.П. Вергасовой и Ю.М. Пузанковым.

разрешающей способностью измерений  $0.025^{\circ}\text{C}$ ).

Кривая понижения температуры в калориметре до температуры холодильника  $T_1$  представляет собой экспоненциальную зависимость, показатель которой обратно пропорционален тепловой емкости калориметра, образца и термолотгера:

$$T - T_1 = (T_2 - T_1) e^{-\alpha_1 t} \quad (1)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\alpha}{(C_K M_K + C_R M_R + C_W M_W)} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2):  $T$  - текущая температура в калориметре,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_1$  - температура в холодильнике,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_K$  - удельная теплоемкость калориметра,  $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ;  $M_K$  - масса калориметра,  $\text{kg}$ ;  $C_R$  - удельная теплоемкость образца горных пород,  $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ;  $M_R$  - масса образца горных пород,  $\text{kg}$ ;  $C_W$  - удельная теплоемкость воды,  $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$ ;  $M_W$  - масса калибровочного объема воды,  $\text{kg}$ ;  $\alpha$  - коэффициент теплообмена

калориметра с холодильником, Вт/°С;  $t$  - время, с. Коэффициент  $\alpha$  определяется в результате калибровки калориметра с различными объемами воды.

Удельная теплоемкость образца рассчитывалась исходя из результатов наблюдений равновесного охлаждения в холодильнике:

$$C_R = \frac{\frac{-\alpha}{\alpha_1} - C_K M_K}{M_R} \quad (3)$$

Результаты определений удельной теплоемкости горных пород представлены в табл. 2.

Таблица 2. Физические и теплофизические свойства пород

№ образца	Название горной породы	$\rho_{ск}$ кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\phi$ пористость	$C$ кДж/кг °С
0	Пемзовые туфы, Долина Гейзеров	2330	925	0.60	819
1	Малки, диорит измененный	2650	2584	0.03	881
2	Малки, туф измененный	2850	2822	0.01	882
3	Паратунский диорит, измененный	2720	2530	0.07	910
4	Паратунский туф, измененный.	2790	2651	0.05	946
5	Паратунский туф, измененный	2830	2660	0.06	1039
6	Малки, метаавлевролит	2690	2394	0.11	843
7	Паратунский андезибазальт, измененный.	2775	2498	0.10	1070
8	Малки, метаавлевролит	2810	2641	0.06	844

Примечание.  $\rho_{ск}$  - минеральная плотность,  $\rho$  - плотность,  $\phi$  - пористость,  $C$  - удельная теплоемкость.

### **Определение тепловых свойств методом временного прослеживания температурной волны**

#### **Организация лабораторного эксперимента**

Для определения теплопроводности образцов горных пород была создана оригинальная установка, включающая маломощный (30 Вт) нагреватель, теплоизолированную капсулу для удерживания цилиндрического образца с открытым в сторону нагревателя нижним торцом и размещения зонда термолоттера в зондировочном отверстии глубиной 10 мм и диаметром 2.4 мм на противоположном торце образца (рис. 1). Для улучшения термоконтакта зонда использовалась теплопроводящая паста КПТ-8. Для регистрации прохождения температурной волны в образце после включения теплового источника использовался термолоттер Nioki 3447-01, с разрешающей способностью 0.1°С.

Для обеспечения постоянной начальной температуры эксперимента, установка с образцами и регистрирующим логгером выстаивалась в течение 18 ч до начала эксперимента в специальном лабораторном помещении, размещенном в подвале ИВиС ДВО РАН, в котором обеспечивались минимальные суточные колебания температуры (не более 0,5 °С). За 5 мин до включения нагревателя регистрировалась начальная температура образца, затем на 5 мин включался тепловой источник и с временным интервалом 10 с регистрировалось прохождение температурной волны через образец. Результаты регистрации изменения температуры преобразовывались в цифровой вид и использовались в качестве калибровочных данных для решения оценки тепловых параметров образца.

#### **Параметризация лабораторного эксперимента**

Радиально-цилиндрическая вычислительная сетка, использованная для обработки

экспериментальных данных, показана на рис. 1. Сетка включает 10 слоев и 11 радиальных зон. Каждый слой имеет мощность 4 мм, радиальные зоны задаются последовательностью логарифмически увеличивающихся радиусов (с коэффициентом 1.0893), первый радиус соответствует радиусу зонда 1.2 мм, последний радиус – радиусу цилиндрического образца 21 мм. Нумерация элементов вычислительной сетки осуществлялась с использованием кодового имени элемента модели в формате AI\_K, где I – номер слоя, K – номер радиальной зоны (от центра к периферии). Зонд термолоттера помещался в элемент модели AI\_1, где I определялось глубиной зондировочного отверстия.

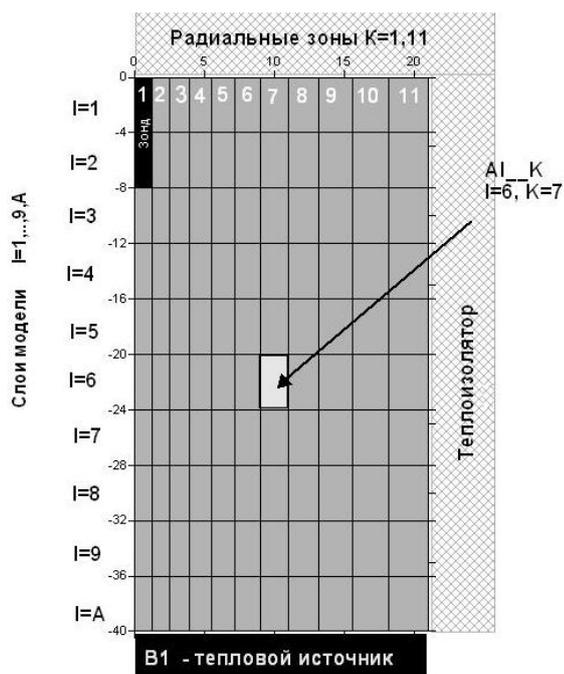


Рис. 1. Вертикальный разрез установки для определения тепловых свойств (показана правая половина образца). На образец нанесены контуры вычислительной сетки, используемой для моделирования прохождения температурной волны в цилиндрическом образце. AI\_K – обозначение элемента модели, где I – номер слоя, K – номер радиальной цилиндрической зоны (от центра к периферии).

образцов более чем на 99% было заполнено воздухом (эксперименты проводились на сухих образцах), в качестве уравнения состояния использовался модуль EOS-3 программы TOUGH2 [7], включающий две фазы: газовую (воздух с парами воды) и водную (с растворенным воздухом). В этом уравнении состояния используются три основные переменные: давление  $P$ , насыщение газовой фазы (воздух)  $S_g$ , температура  $T$ . Начальные значения:  $P = 10^5$  Па,  $S_g = 0.99$  (образцы сухие). Зависимость теплопроводности  $\lambda$  от насыщения порового пространства водой задавалась формулой  $\lambda = \lambda_{wet} + (\lambda_{wet} - \lambda_{dry}) S_w$ , где  $\lambda_{wet}$  теплопроводность насыщенных водой горных пород,  $\lambda_{dry}$  – теплопроводность сухих горных пород,  $S_w$  – насыщение водой.

В качестве калибровочных точек для инверсионного моделирования использовались зарегистрированные в процессе эксперимента значения температуры. Они задавались в элементе модели, соответствующем позиции термозонда.

Модель разделялась на два домена: ROCK1, – в котором задавались и оценивались свойства пород, и ZOND1 – который включал элементы зондировочного отверстия с зондом (в нем так же задавались известные свойства стального стержня).

Источник тепла был задан в элементе «В», сообщаемым с элементами модели нижнего слоя AA\_K. В элементе «В» определялась фиксированная тепловая мощность  $W=12.75$  Вт, полученная по результатам калибровочных экспериментов с цилиндрами, заполненными водой. В некоторых случаях тепловая мощность рассматривалась также в качестве оцениваемого параметра в процессе проведения основного эксперимента.

В качестве известных исходных петрофизических параметров задавались минеральная плотность, пористость и удельная теплоемкость. В качестве оцениваемых параметров рассматривалась теплопроводность цилиндрического образца горных пород. В то же время, при обработке результатов экспериментов рассматривались сценарии независимой оценки мощности теплового источника ( $W$ ) и удельной теплоемкости горных пород ( $C$ ).

Поскольку поровое пространство

### ***Варианты инверсионного многопараметрического моделирования***

Для обработки результатов лабораторных экспериментов было использовано математическое моделирование (iTOUGH2) [4-5], в процессе которого было рассмотрено несколько вариантов решения обратных многопараметрических задач, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Тепловые свойства горных пород по данным лабораторного эксперимента

№ образца	Вариант А		Вариант В	Вариант С		Вариант D		
	$\lambda$ Вт/м °С	$K_w$	$\lambda$ Вт/м °С	$\lambda$ Вт/м °С	$C$ кДж/кг °С	$\lambda$ Вт/м °С	$C$ кДж/кг °С	$K_w$
0				0.25	870			
1	1.51	0.87	1.50	1.70	900	1.50	900	0.88
2	1.62	1.25	1.85	1.82	878	1.60	890	1.3
3	2.38	0.98	2.34	2.37	889	2.3	870	0.97
4	1.82	0.92	1.68	1.73	964	1.80	940	0.91
5	2.61	1.10	2.75	2.71	1030	2.6	1000	1.1
6	1.75	0.84	1.59	1.70	861	1.7	840	0.84
7	1.50	1.20	1.60	1.60	1100	1.6	1100	1.2
8	1.72	0.78	1.53	1.60	850	1.7	850	0.79

Примечание.  $\lambda$  - теплопроводность,  $C$  - удельная теплоемкость.  $K_w$  - расчетный поправочный коэффициент к мощности теплового источника 12.75 Вт.

Вариант А: в качестве оцениваемых модельных параметров рассматривались теплопроводность  $\lambda$  сухих пород, начальная температура  $T_0$  и поглощаемая образцом мощность теплового источника  $W$ . Включение начальной температуры  $T_0$  и мощности теплового источника  $W$  в число оцениваемых параметров вызвано следующим: разрешающая способность и точность термодатчика Nioki 3447-01 составляет 0.1 °С, в то же время чувствительность модели по отношению к значению начальной температуры высока. Параметр  $T_0$  слабо коррелирует с другими оцениваемыми параметрами, что позволяет включить его в число таких параметров. Поглощаемая образцом мощность теплового источника оценивалась периодически на цилиндре, заполненном водой, при этом ее вариации составляли до 14%, что не позволяет полностью гарантировать условие постоянства  $W$  при повторении экспериментов. Модельная точность оценки теплопроводности при этом составляла сотые доли Вт/м К. Установлено также, что из-за высоких отрицательных корреляций  $\lambda$  и  $W$ , заниженные значения  $W$  приводят к завышению  $\lambda$  и наоборот. Это хорошо видно из сравнения вариантов А и В (табл. 3). Вместе с тем, в вычислительных экспериментах с синтезированными данными показана возможность одновременной оценки  $\lambda$  и  $W$  с высокой степенью модельной точности.

Вариант В: в качестве оцениваемого параметра рассматривались теплопроводность и начальная температура. Значение поглощаемой образцом мощности теплового источника задавалось равным 12.75 Вт (среднее значение по калибровочным замерам).

Вариант С: в качестве оцениваемых модельных параметров рассматривались теплопроводность  $\lambda$ , начальная температура  $T_0$  и удельная теплоемкость  $C$ . Включение удельной теплоемкости в число таких параметров позволило в целом подтвердить полученные ранее оценки, выполненные калориметрическим методом (табл. 2). При этом модельная точность оценки значительно снизилась, т.к. для сухих образцов наблюдалась значительная положительная корреляция между  $\lambda$  и  $C$ .

Вариант D: в качестве оцениваемых модельных параметров рассматривались теплопроводность  $\lambda$ , начальная температура  $T_0$ , удельная теплоемкость  $C$  и мощность теплового источника  $W$ . Для этого варианта получена наилучшая сходимость модели с наблюдаемыми данными, но модельная точность оценки существенно снизилась из-за сильной корреляции некоторых из оцениваемых параметров ( $\lambda$ ,  $C$  и  $W$ ).

Вариант E: в качестве оцениваемых модельных параметров рассматривались теплопроводность сухих образцов  $\lambda_{dry}$ , теплопроводность водонасыщенных образцов  $\lambda_{wet}$  и газонасыщенность  $S_g$ . Необходимость такой конфигурации модельных параметров возникла только при исследовании тепловых свойств пемзовых туфов (образец «0», Долина Гейзеров). Получены следующие результаты:  $\lambda_{dry}=0.33$  Вт/м К,  $\lambda_{wet}=0.92$  Вт/м К,  $S_g = 0.82$ . Возможно, это свидетельствует о наличии связанной воды в минеральной фазе образца. Необычайно низкая теплопроводность пемзовых туфов в сочетании с наличием связанной воды способствует аккумуляции в них тепловой энергии и парогидротермальной активности.

Из рассмотренных выше вариантов обработки эксперимента (A, B, C, D) наибольшей модельной точностью и обоснованностью по оценке теплопроводности является вариант A, т.к. он автоматически учитывает возможные погрешности в определении мощности теплового источника и не является «сверхпараметризованным» сильно коррелируемыми оцениваемыми параметрами. Отметим также, что несмотря на «сверхпараметризацию», оценки удельной теплоемкости по вариантам C и D (табл. 3) с высокой точностью сходятся с прямыми оценками удельной теплоемкости, полученными калориметрическими методами (табл. 2).

***Сравнение оценок теплопроводности и удельной теплоемкости по методу временного прослеживания температурной волны и методу оптического сканирования***

После проведения лабораторных экспериментов по определению тепловых свойств горных пород в ИВиС, девять исследованных образцов были направлены в Российский государственный геологоразведочный университет (РГГРУ), где Ю.А. Поповым были проведены повторные измерения теплопроводности и температуропроводности с использованием разработанной им методики оптического сканирования [6], заключающейся в бесконтактном измерении излучаемой температуры движущимся образцом, бесконтактно нагретым точечным источником калиброванной мощности (табл. 4).

Таблица 4. Тепловые свойства горных пород по данным оптического сканирования (по Ю.А. Попову, 2009)

№ образца	$\lambda_{dry}$ Вт/м °С	$\lambda_{wet}$ Вт/м °С	Термодиффузия $10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с
0	0.29	0.72	
1	2.39	2.39	1.05
2	2.55	2.55	1.15
3	2.26	2.26	0.98
4	2.53	2.53	1.12
5	2.60	2.60	1.14
6	2.20	2.20	0.97
7	1.53	1.65	0.7
8	2.11	2.11	0.91

Примечание.  $\lambda_{dry}$  – теплопроводность сухого образца породы,  $\lambda_{wet}$  – теплопроводность водонасыщенного образца породы.

Сравнение результатов определения теплопроводности девяти эталонных образцов сухих горных пород, выполненных в ИВиС (вариант А (табл. 3) с учетом варианта Е) и РГГРУ показано на рис. 2. Получена хорошая сходимост ь определения теплопроводности по образцам 0, 3, 5 и 7. По образцам 1, 2, 4, 6, 8 наблюдается систематическое отклонение оценок ИВиС по сравнению с результатами РГГРУ на 18-37%. Наибольшие расхождения получены по образцам 1, 2, 4, которые характеризуются наименьшей пористостью (до 5%) (табл. 2).

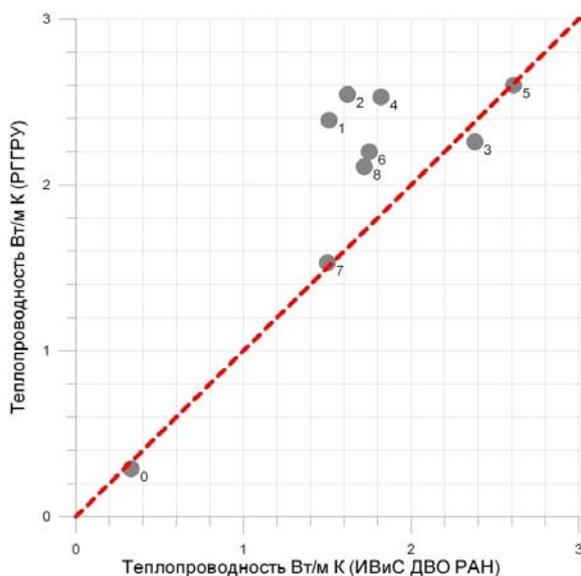


Рис. 2. Корреляция значений теплопроводности сухих горных пород, определенных разными методами в ИВиС (вариант А, с учетом варианта Е) и РГГРУ. Штриховая линия соответствует прямой  $Y=X$ .

показывает сходимост ь результатов определения теплопроводности для образцов с пористостью выше 5% и систематическое занижение их для образцов с низкой пористостью. Сравнительный анализ измерений в различных лабораториях будет продолжен. Будут выполнены также вычислительные эксперименты с синтезированными данными для выяснения условий одновременного определения теплопроводности и удельной теплоемкости.

Авторы выражают признательность проф. Ю.А. Попову (РГГРУ), Ю.В. Фроловой (МГУ), Л.П. Вергасовой и М.Ю. Пузанкову (ИВиС) за помощь в появлении этой статьи. Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 09-05-00605-а.

#### Список литературы

1. Калачев В.Я., Воловик М.Е., Ладыгин В.М. Экспресс методика определения плотности твердой фазы горных пород // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1997. № 2. С. 51-56
2. Кирюхин А.В., Корнеев В.А., Поляков А.Ю. О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре // Вулканология и сейсмология. № 6. 2006. С. 3-11.

#### Заклучение и задачи дальнейших исследований

Апробирована методика определения теплопроводности и удельной теплоемкости сухих горных пород на девяти эталонных образцах, отобранных на геотермальных месторождениях Камчатки. Методика основана на инверсионном многопараметрическом iTOUGH2-моделировании лабораторного эксперимента по регистрации прохождения температурной волны через образец от мгновенно включающегося теплового источника (разработана лабораторная установка для проведения эксперимента). Теплопроводность сухих горных пород может быть определена с высокой модельной точностью при условии предшествующего измерения их минеральной плотности, пористости и удельной теплоемкости.

Сравнение полученных нами оценок теплопроводности по методу прохождения температурной волны с оценками по методу оптического сканирования по-

3. Яновский Ф.А. О теплопроводности вулканогенно-осадочных пород Камчатки // Вулканонология и сейсмология. № 5. 1989. С. 77 – 84
4. Finsterle S. iTOUGH2 User's Guide // LBNL-40040. 1999. 130 p.
5. Kiryukhin, A.V., Asaulova N.P., Finsterle S., 2008. Inverse modeling and forecasting for the exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 37. 24. P. 540-562.
6. Popov Yu.A., Pribnow D.F.C., Sass J.H., et al Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning // Geothermics. 28. 1999. P. 253-276
7. Pruess K. "TOUGH2 Users Guide, Version 2.0" // LBL-43134. Nov. 1999.
8. Sugrobov V. M. Geothermal Resources of Kamchatka, Russia // Terrestrial Heat Flow and Geothermal Energy in Asia. M. Gupta and M. Yamano editors, Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD. 1995. P. 469-492.

## **STUDY OF THERMAL CAPACITY OF SOLID ROCKS IN SAMPLES FROM GEOTHERMAL FIELDS**

**A.V. Kiryukhin, A.Yu. Polyakov, A.V. Mushinskii, O.M. Topchieva**

*The Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: [avk2@kscnet.ru](mailto:avk2@kscnet.ru)*

Heat transfer and thermal capacity of dry rocks have been measured on control samples from geothermal fields of Kamchatka. The method is based on the iTOUGH-2 inversion multiparametric modeling of the laboratory-based experiment that involved recording of temperature waves passing through the sample from the instantaneous source. The experiment has been conducted at the laboratory setup.