

**Р.И. Пашкевич, Е.Ю. Попов, Е.Г. Савельев,
Р.А. Ромушкевич, К.А. Павлов**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ
СВОЙСТВ ПОРОД АВАЧИНСКОЙ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ, КАМЧАТКА**

Приведены результаты измерений комплекса тепловых свойств (теплопроводность, объемная теплоемкость, коэффициент тепловой анизотропии) образцов пород Авачинской геотермальной системы при атмосферных термобарических условиях в двух состояниях насыщения образцов: сухом и водонасыщенном.

Ключевые слова: горные породы, теплопроводность, объемная теплоемкость, коэффициент тепловой анизотропии, метод оптического сканирования, Авачинская геотермальная система.

Определение значений тепловых свойств пород геотермальных систем необходимо для оценки тепловых ресурсов, а также для получения достоверных результатов термогидродинамического моделирования геотермальных месторождений [1, 2]. Ранее в [2] были представлены результаты измерений тепловых свойств пород геотермальных месторождений Камчатки при нормальных и пластовых термодинамических условиях по методам [3] и [4]. В данной работе представлены результаты измерений тепловых свойств образцов пород Авачинской геотермальной системы на Камчатке, как в сухом, так и в водонасыщенном состояниях, при атмосферных термобарических условиях. Исследованы образцы керна пород, полученные при бурении термометрических скважин в южной части Авачинской геотермальной системы [5]. Измерения были выполнены на современной аппаратурно-методической базе [6].

Для измерений теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости водонасыщенных и сухих образцов пород при атмосферных условиях применялся неразрушающий, бесконтактный, прецизионный метод оптического сканирования [4, 7].

Метод оптического сканирования позволяет определять главные значения тензора теплопроводности λ , температуропроводности a , коэффициент тепловой анизотропии K и объемную теплоемкость C , и степень тепловой неоднородности β (представляющую собой коэффициент вариации теплопроводности вдоль линии сканирования) горных пород непосредственно на полноразмерном или стандартном керне.

Принцип метода оптического сканирования основан на нагреве плоской или цилиндрической поверхности изучаемого образца концентрированным источником тепловой энергии и регистрации температуры нагреваемой поверхности инфракрасными датчиками температуры, двигающимися вместе с источником нагрева относительно изучаемых образцов пород с одинаковой и постоянной скоростью [4, 7].

Метод измерений реализован в лабораторной установке оптического сканирования для измерений на полноразмерном керне и штучных образцах [6].

Перед измерениями тепловых свойств образцы распиливались с целью подготовки плоской поверхности и высушивались при комнатной температуре в течение 15 дней. После измерений на образцах в сухом состоянии, перед последующими измерениями, образцы насыщались дистиллированной водой с добавлением соли NaCl (18 г/л) под вакуумом в соответствии с ГОСТ 26450.1–85 [8].

В ходе теплофизических измерений для каждого образца стандартного керна определялись:

- теплопроводность $\lambda_{//}$ вдоль линии параллельной направлению выбуривания керна (линия 1);
- теплопроводность λ_{\perp} в направлении перпендикулярном направлению выбуривания керна (линия 2);
- объемная теплоемкость C ;
- коэффициент тепловой неоднородности $\beta_{//}$ вдоль линии 1;
- коэффициент тепловой неоднородности β_{\perp} вдоль линии 2;
- коэффициент тепловой анизотропии K .

Измерения проводились на плоских поверхностях образцов по двум взаимно-перпендикулярным направлениям. Одна линия совпадала с направлением оси керна, другая – перпендикулярна к оси керна. Сканирование вдоль двух взаимно-

перпендикулярных направлений применяли для охвата большего объема изучаемых образцов и получения более представительных результатов измерений, а также для оценки анизотропии.

Оценка анизотропии и определение главных значений тензора теплопроводности проводились для образцов, на которых было возможно определить направление выбуривания керна или выделить визуально направление ориентированной трещиноватости/пористости. Определение пористости образцов проводилось весовым методом по ГОСТ 26450.1–85 [8].

Полная погрешность однократного измерения составляла $\pm 3,5\%$ для теплопроводности и $\pm 6\%$ для объемной теплоемкости (для доверительной вероятности 0,95).

Восемь образцов коллекции были распилены таким образом, что удалось провести измерения на двух получившихся частях образца. Лабораторные номера этих образцов содержат в номере обозначение «_1», табл. 1. Таким образом, общее количество образцов составило 57.

Для получения информации по тепловой анизотропии плоскость разреза выбиралась таким образом, чтобы она была параллельна цилиндрической образующей керна. В случае невозможности определения ориентации образца по образующей или по напластованию, плоскость распиливания выбиралась так, чтобы получить максимально возможную площадь для проведения измерений. Для образцов без определенной пространственной ориентации тепловая анизотропия не оценивалась.

Для образцов, где не удалось определить направление выбуривания или трещиноватости, две взаимноперпендикулярные линии сканирования выбирались из условия их максимальной длины.

На рис. 1 приведен профиль теплопроводности для одного образца с коэффициентом неоднородности, полученным в ходе измерений в сухом состоянии.

Часть измерений была проведена на образцах (12 шт.) с линейными размерами менее 40 мм в длину и ширину, не соответствующим требованиям оборудования к размерам образцов, т.е. образцы были на 4—7 мм меньше требуемых размеров (табл. 1). Измерения на этих образцах были проведены для получения более полной информации по тепловым свойствам

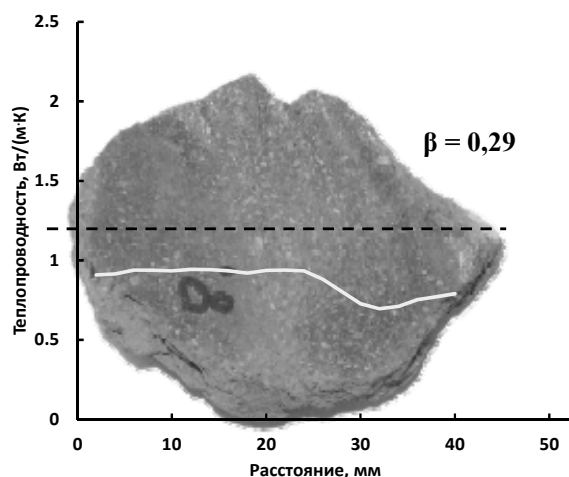


Рис. 1. Профиль теплопроводности для образца № 81 в сухом состоянии. Пунктирная линия – линия сканирования

образцов коллекции. Погрешности измерений теплопроводности и объемной теплоемкости, связанные с небольшими размерами образца, оцениваются в 6–7 % в сторону занижения результатов.

Общее количество образцов, для которых было определено направление выбуривания керн составило 31 шт. Для них было установлено, что разница между значениями теплопроводности, измеренными в сухом состоянии по двум взаимноперпендикулярным направлениям, обусловлена существенной неоднородностью образцов коллекции. Наличие незначительной тепловой анизотропии обнаружено на шести образцах – лабораторные номера 27, 31, 32, 33, 48. Сопоставление результатов измерений для сухих и водонасыщенных образцов показало, что водонасыщение образцов привело к уменьшению коэффициента анизотропии, что позволяет сделать вывод о том, что анизотропия пород обусловлена, главным образом, ориентированной микротрещиноватостью.

В табл. 1 приведены результаты измерений. Для изотропных образцов проводилось усреднение значений коэффициента теплопроводности по результатам измерений вдоль двух линий сканирования (1 и 2).

Таблица 1

Результаты измерений комплекса тепловых свойств пород

№ п/п	Лаб. № образца	№ образца	Глубина отбора керна, м	Горная порода ¹	Пористость, %	Сухие образцы				Водонасыщенные образцы							
						$\lambda_{ф, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{п, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{п, 2}$	$\lambda_{п, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{п, 2}$	$\lambda_{п, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{п, 2}$	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	K	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	K
1	1	6_10м	10	Андезито-базальт пироксен-плагноклазовый, средне-мелкопорфировый, мелкопористый	10.6	1.11	0.11			1.85	1.00	1.70	0.07			2.49	1.00
2	2 ⁵	6_5м	5	Андезито-базальт средне-мелкопорфировый	29.7	0.49	0.27			1.08	1.00	1.15	0.11			2.26	1.00
3	3 ⁴	2_03W_5 м	5	Андезито-базальт (андезит?) массивный, крупнопорфировый	15.1	0.83	0.07			1.68	1.00	1.52	0.08			2.47	1.00
4	4 ⁵	2_03W_1 0м	10	Андезито-базальт плотный, мелкопорфировый	14.6	0.90	0.28			1.63	1.00	1.54	0.13			2.33	1.00
5	5 ⁵	3_07_5м	5	Андезито-базальт пироксен-плагноклазовый, среднепорфировый, пористый	11.8	0.89	0.16			1.77	1.00	1.57	0.07			2.57	1.00
6	6 ⁵	3_07_10м	10	Андезито-базальт мелкопористый, мелкопорфировой структуры	15.9	0.89	0.15			1.63	1.00	1.74	0.06			2.68	1.00
7	7 ⁵	6_1 ⁵			15.9	0.87	0.12			1.60	1.00	1.71	0.05			2.59	1.00
8	8 ⁵	2A_03_5м	5	Андезито-базальт массивный, равномерно-среднепорфировый	3.7	1.36	0.12			2.05	1.00	1.83	0.08			2.25	1.00
9	9 ⁵	7_1 ⁵			4.0	1.40	0.06			2.05	1.00	1.84	0.09			2.04	1.00

12 Продолжение табл. 1

№ п/п	Лаб. № образца	№ образца	Глубина отбора керна, м	Горная порода ¹	Пористость, %	Сухие образцы				Водонасыщенные образцы							
						$\lambda_{ф, 2}$ (м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{л, 2}$ Вт/ (м·К)	$\beta_{л, 2}$	$C, 10^6$ Джк/(м ³ ·К)	К	$\lambda_{ф, 2}$ Вт/ (м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{л, 2}$ Вт/ (м·К)	$\beta_{л, 2}$	$C, 10^6$ Джк/ (м ³ ·К)	К
10	8	5_5м	5	Андезито-базальт мелко-порфировый, пористый	15.5	0.84	0.27			1.66	1.00	1.49	0.08			2.67	1.00
11	9 ⁴	5_10м	10	Андезит (?) мелкопористый	17.9	0.82	0.11			1.63	1.00	1.73	0.05				1.00
12	10 ⁵	3_5м	5	Андезито-базальт псевдобрекчиевидный, пироксен-платиноглазый	19.5	0.91	0.57			1.69	1.00	1.61	0.18			2.55	1.00
13	10 ¹ _{4.5}				22.2	0.89	0.56			1.63	1.00	1.68	0.10			2.42	1.00
14	11 ⁴	3_10м	10	Андезит(?) массивной текстуры	15.8	0.92	0.12			1.71	1.00	1.77	0.07			2.25	1.00
15	12 ⁵	3PR_0,2-0,6м	0,2-0,6	Андезито-базальт мелкопорфировый, с незначительным (до 5%) количеством пор	19,1	0,76	0,12			1,53	1,00	1,38	0,05			2,43	1,00
16	13 ⁴	3PR_5м	5	Андезит (?) массивной текстуры	3.8	1.54	0.12			2.18	1.00	1.74	0.05			2.49	1.00
17	14 ⁵	3PR_5,6-5,9м	5,6-5,9	Андезито-базальт (андезит?) массивный	2.8	1.62	0.06			2.22	1.00	1.86	0.04			2.42	1.00
18	15	3PR_10м	10	Андезит(?) массивной текстуры	7.2	1.43	0.09			1.96	1.00	1.82	0.08			2.12	1.00
19	16 ⁵	2PR_4,7-5,0м	4,7-5	Андезито-базальт пироксен-амфиболовый, мелкопорфировый, пористый. Поры выгнаны в одном направлении без заполнения	12.1	0.97	0.22			1.81	1.00	1.52	0.09			2.36	1.00

20	17 ^{4,5}		5	Андезито-базальт порфировой структуры, пористый. Поры различной формы, часто объёмляются, образуя выпянутые пустоты. Размер пор от 0,5 мм до 5x8 мм	11.2	1.02	0.13			1.80	1.00	1.73	0.07		2.46	1.00
21	18 ⁵	2PR_10м	10	Андезито-базальт (базальт?) плотный, массивной текстуры, мелкопорфировой, ближе к афировой структуре	3.7	1.46	0.07			2.14	1.00	1.71	0.08		2.39	1.00
22	18_1 ⁵				3.8	1.47	0.05			2.13	1.00	1.70	0.07		2.29	1.00
23	19 ⁴	2_10м	10	Андезито-базальт пироксен-платиноклазовый, порфировой структуры. Пористость – до 10 % объёма	24.0	0.73	0.08			1.56	1.00	1.43	0.07			1.00
24	20	1_5м	5	Андезито-базальт пироксен-платиноклазовый, ноздреватый	9.4	1.33	0.08			2.01	1.00	1.65	0.06		2.38	1.00
25	21	1_10м	10	Андезит (?) порфировой структуры. Пористость составляет около 15 %	13.8	0.82	0.20			1.72	1.00	1.51	0.09		2.24	1.00
26	22 ⁴	1_7,0-7,2м	7-7,2	Андезито-базальт пироксен-платиноклазовый, массивный, средне-крупнопорфировый	8.8	1.10	0.10			2.05	1.00	1.52	0.06		2.51	1.00
27	23_1	1_0,2-0,8	0,2-0,8	Андезито-базальт (андезит?), массивный, плотный, порфировой структуры	3.0	1.55	0.10			2.29	1.00	1.80	0.12		2.21	1.00
28	23_2				3.7	1.55	0.08			2.28	1.00	1.87	0.06		2.21	1.00
29	24 ⁴	01_5м	5	Андезито-базальт пироксен-платиноклазовый, ноздреватый	25.5	0.61	0.15			1.37	1.00	1.35	0.06		2.62	1.00
30	25	01_10м	10	Андезит(?) мелкопорфировый	8.9	1.10	0.05			1.96	1.00	1.85	0.06		2.22	1.00

14 Продолжение табл. 1

№ п/п	Лаб. № образца	№ образца	Глубина отбора керна, м	Горная порода ¹	Пористость, %	Сухие образцы				Водонасыщенные образцы						
						$\lambda_{ф, 2}$ (м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{с, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{с, 2}$	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	К	$\lambda_{ф, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{с, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{с, 2}$	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)
31	26	03W_5м	5	Андезит-базальт (андезит?) массивный, средне-крупнопорфировый	8.7	1.17	0.14		1.94	1.00	1.93	0.04		2.54	1.00	
32	27 ^{3.5}	03W_5,2-5,4м	5,2-5,4	Андезит-базальт (базальт?) массивный, афировой структуры	4.1	1.60	0.11	1.50	2.32	1.07	2.08	0.07	1.88	0.12	2.18	1.11
33	28 ⁴	03W_10м	10	Андезит-базальт (базальт?) массивный, афировой структуры	8.8	1.26	0.07		2.02	1.00	1.69	0.05		2.10	1.00	
34	29 ⁵	04W_5м	5	Андезит-базальт (андезит?) порфировой структуры. Поры приблизительно только одинаковой размерности от 0,5 мм до 1,5 мм, равномерно распределены по всей породе, на скеле наблюдается некоторая «сухаристость»	13.4	0.93	0.14		1.83	1.00	1.70	0.07		2.59	1.00	
35	30	04W_10м	10	Андезит-базальт, средне-крупнопорфировый. Поры различной формы и размеров: от долей мм до 3x5 мм	8.4	1.26	0.39		2.16	1.00	1.62	0.12		2.33	1.00	

36	31 ^{3.5}	04W_8.8-9.1м	8.8-9.1	Андезит-базальт (базальт?) массивный, афировой структуры	1.9	1.75	0.12	1.65	0.11	2.14	1.06	1.89	0.10	1.93	0.07	2.45	1.00
37	32 ^{3.5}	1PR_5м	5	Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый, порфировой структуры. Поры разнообразной формы, более-менее равномерно распределены по всей площади породы, размером от 0.5 до 5 мм	11.6	0.99	0.19	0.95	0.25	1.85	1.04	1.65	0.09	1.75	0.21		1.00
38	33 ^{3.5}	1PR_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый, массивной текстуры, крупнопорфировой	2.0	1.40	0.08	1.25	0.15	2.22	1.12	1.55	0.05	1.53	0.07	2.43	1.02
39	33 ^{3.5}	2 ^{3.5}		Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый, массивный, порфировой структуры	2.2	1.44	0.09	1.36	0.17	2.17	1.05	1.49	0.07	1.58	0.09	2.18	1.00
40	34 ^{3.5}	4_21_5м	5	Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый, массивный, порфировой структуры	9.9	0.95	0.19	0.89	0.21	1.78	1.07	1.46	0.06	1.32	0.25	2.42	1.11
41	35 ⁵	4_21_10м	10	Андезит-базальт пироксен-амфиболовый, порфировой структуры	10.0	1.16	0.20			1.92	1.00	1.70	0.07			2.47	1.00
42	36	4_5_5м	5	Андезит-базальт (андезит?) плотный, мелко-среднепорфировой	8.4	0.90	0.30			1.74	1.00	1.37	0.16			2.44	1.00
43	37	4_5_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый, пористый, средне- и мелкопорфировой. Наблюдается линейность в расположении пор	8.0	1.02	0.13			1.86	1.00	1.43	0.09			2.41	1.00
44	38 ⁵	4_7_5м	5	Андезит-базальт пироксен-плагноклазовый. Поры вытянуты в цепочки, выстраиваются в параллельные линии относительно друг друга	3.1	1.19	0.11			2.05	1.00	1.70	0.09			2.27	1.00
45	38 ¹ ⁵				2.4	1.24	0.11			2.10	1.00	1.63	0.13			2.11	1.00

16 Окончание табл. 1

№ п/п	Лаб. № образца	№ образца	Глубина отбора керна, м	Горная порода ¹	Пористость, %	Сухие образцы				Водонасыщенные образцы							
						$\lambda_{ф, 2}$ (м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{л, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{л, 2}$	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	К	$\lambda_{ф, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{ф, 2}$	$\lambda_{л, 2}$ Вт/(м·К)	$\beta_{л, 2}$	$C, 10^6$ Дж/(м ³ ·К)	К
46	39	4_7_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый, массивный, порфировой структуры	26.1	0.52	0.17			1.15	1.00	1.11	0.08			2.12	1.00
47	40 ^{4,5}	4_3_5м	5	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый, средне-крупнопорфировый	8.1	1.13	0.13			1.92	1.00	1.64	0.06			2.28	1.00
48	41 ⁵	4_3_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый, массивный, средне-крупнопорфировый	10.0	1.10	0.14			1.82	1.00	1.78	0.11			2.29	1.00
49	41_1			Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый, массивный, средне-крупнопорфировый	10.5	1.07	0.18			1.87	1.00	1.68	0.10			2.64	1.00
50	42 ⁴	3_02_5м	5	Андезит-базальт порфировой структуры, мелкопористый	19.8	0.97	0.21			1.78	1.00	1.15	0.14			2.22	1.00
51	43 ⁴	3_02_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый, средне-крупнопорфировый, массивный	6.2	0.95	0.17			1.73	1.00	1.86	0.10			2.56	1.00
52	44	4_12_5м	5	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый средне-крупнопорфировой структуры	16.7	0.66	0.45			1.44	1.00	1.23	0.09			2.63	1.00
53	45	4_12_10м	10	Андезит-базальт пироксен-плагиоклазовый средне-крупнопорфировый,	3.9	1.10	0.11			2.08	1.00	1.88	0.10			2.43	1.00

Измерения тепловых свойств были проведены на коллекции из 57 образцов. Коллекция представлена, в основном, андезитобазальтами, редко базальтами и андезитами [9]. Основная масса пород стекловатая, во вкрапленниках преобладает плагиоклаз, присутствуют фенокристаллы пироксена. Структура пород порфировая (от мелкопорфировой до крупнопорфировой), редко афировая, текстура массивная. Пористость пород изменяется в широком диапазоне, поры, в основном, равномерно распределены в породе, в единичных образцах отмечается ориентированное расположение пор. Подробное микроскопическое описание образцов и анализ минерального состава приведены в [9].

Исследованные породы характеризуются широкими вариациями тепловых свойств (табл. 2), что, в основном, обусловлено, как было установлено в [10, 11], широким диапазоном пористости (1,88–29,7 %). Об этом свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции между теплопроводностью и теплоемкостью пород в сухом состоянии и, с другой стороны, пористостью (рис. 2, 3), а также степень изменения тепловых свойств пород при водонасыщении образцов. Так, среднее значение теплопроводности пород при водонасыщении увеличивалось на 50 %, теплоемкости на 29 %, коэффициента тепловой неоднородности на 30–50 %. Подобная зависимость теплопроводности и теплоемкости пород от их пористости была ранее также установлена для пород геотермальных месторождений Камчатки [2].

Изученные образцы пород в тепловом отношении, в основном, изотропны, тепловая анизотропия – с коэффициентом анизотропии до 1,13, у отдельных образцов пород, обусловлена направленной микротрещиноватостью/пористостью.

Влияние минерального состава и структурных особенностей на тепловые свойства пород тесно увязаны с пористостью: так, окварцованные разности характеризуются повышенными значениями теплопроводности как в сухом (1,43–1,62) Вт/(м·К), так и водонасыщенном (1,74–1,86) Вт/(м·К) состояниях, теплоемкость этих разностей также характеризуется повышенными значениями — (1,96–2,28) МДж/(м³·К), (1,96–2,28) МДж/(м³·К), в, соответственно, сухом и водонасыщенном состояниях. Установлена невысокая пористость для этих разностей пород (3–7 %). Породы с афанитовой структурой также имеют повышенные значения теплопроводности и теплоемкости, и низкие значения пористости (2–7 %).

Таблица 2

Статистические характеристики тепловых свойств пород

Параметры	Сухие						Водонасыщенные						Пористость, %
	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$		K	β		$C, \text{МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$		K	β		$C, \text{МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$	
	λ_{\parallel}	λ_{\perp}		\parallel	\perp		λ_{\parallel}	λ_{\perp}		\parallel	\perp		
Максимальное	1,75	1,65	1,13	0,57	0,29	2,32	2,08	1,93	1,11	0,18	0,25	2,68	29,7
Минимальное	0,49	0,82	1,00	0,05	0,11	1,08	1,11	1,32	1,00	0,04	0,06	2,04	1,88
Среднее	1,08	1,20	1,01	0,16	0,19	1,85	1,62	1,65	1,00	0,08	0,12	2,38	11,2
Среднеквадратическое отклонение	0,24	0,27	0,02	0,07	0,05	0,21	0,17	0,17	0,01	0,02	0,06	0,13	5,51

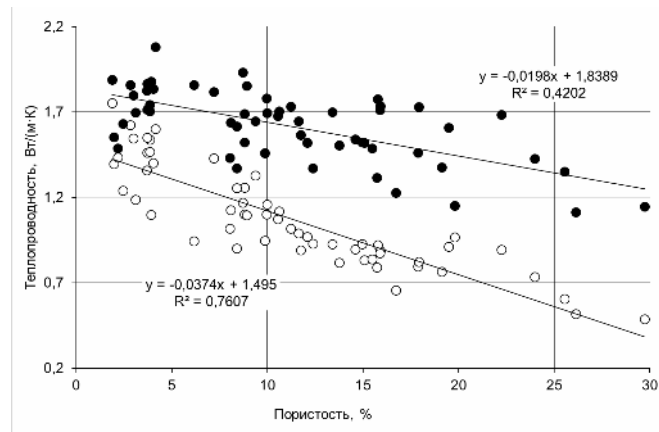


Рис. 2. Зависимость теплопроводности пород от пористости для сухих (белые точки) и водонасыщенных (черные точки) образцов. Приведены уравнения регрессии и данные о коэффициенте корреляции

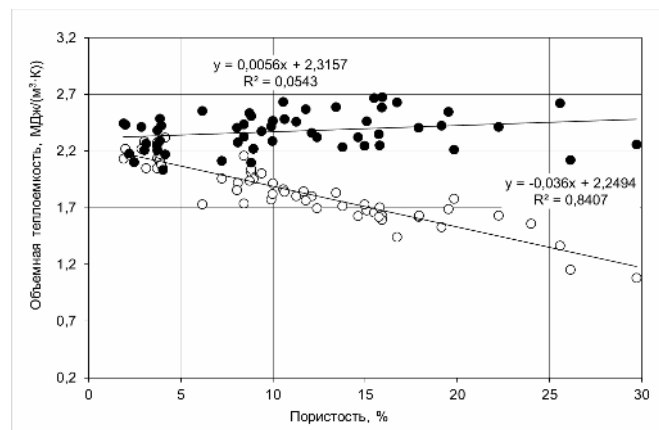


Рис. 3. Зависимость теплоемкости пород от пористости для сухих (белые точки) и водонасыщенных (черные точки) образцов. Приведены уравнения регрессии и данные о коэффициенте корреляции

Приведенные в статье результаты получены в ходе исследований [6], выполненных Сколковским институтом науки и технологий на основе «Протокола об организации работ по совместным исследованиям тепловых свойств образцов пород Авачинской геотермальной системы на Камчатке» между Федеральным государственным бюджетным учреждением науки На-

учно-исследовательским геотехнологическим центром Дальневосточного отделения Российской академии наук и Сколковским институтом науки и технологий, ноябрь 2015 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкевич Р.И. Влияние свойств горных пород на результаты численного моделирования эксплуатации геотермальных систем // ГИАБ. ОВ 2 «Камчатка» (специальный выпуск). – 2014. – С. 175 — 182.
2. Пашкевич Р.И., Попов Е.Ю., Тарелко Н.Ф., Чернев И.И., Павлов К.А., Муратов П.В. Новые данные о тепловых свойствах пород геотермальных месторождений Камчатки // ГИАБ. ОВ 2 «Камчатка» (специальный выпуск). – 2014. – С. 36 — 46.
3. Вертоградский В.А., Попов Ю.А., Миклашевский Д.Е. Метод и установка для измерений теплопроводности горных пород при высоких давлениях и температурах. Известия высших учебных заведений, серия «Геология и разведка». С. 47-51 (2003).
4. Popov Y., Pribnow D., Sass J., Williams C, and Burkhardt H. Characterisation of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics*, №28, pp. 253-276 (1999).
5. Пашкевич Р.И., Горбач В.А., Павлов К.А., Шадрин А.В. Термометрическая съемка участка Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2», 2015, с. 24-34.
6. Спасенных М.Ю., Попов Ю. А., Ромушкевич Р. А., Попов Е. Ю., Габова А. В., Савельев Е. Г. Экспериментальные исследования тепловых свойств пород Авачинской геотермальной системы Камчатки. Отчет о научно-исследовательской работе. Сколковский институт науки и технологий. – М., 2015. – 26 с.
7. Попов Ю.А. Теоретические модели для определения тепловых свойств горных пород на основе подвижных источников тепловой энергии. Известия вузов, серия «Геология и разведка», Статья 1, №9, С. 97-105 (1983); Статья 2, №2, С. 83-91 (1984).
8. ГОСТ 26450.1–85. Породы горные. Метод определения открытой пористости жидкостенасыщением.
9. Пашкевич Р.И., Таранов С.Р., Кунгурова В.Е. Состав пород участка Авачинской геотермальной системы // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2», 2015, с. 86-107.
10. Popov, Y. Tertychnyi, V.V., Romushkevich, R.A., Korobkov, D.A. and Pohl, J. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: experimental data. *Pure and Appl. Geophys.* 160, pp. 1137-1161 (2003).
11. Popov, Y., Romushkevich, R., Korobkov, D., Mayr, S., Bayuk, I., Burkhardt, H., and Wilhelm, H. Thermal properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Impact Crater Chicxulub, Mexico). *Geophys. J. Int.*, 184, pp. 729–745 (2011). **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Пашкевич Роман Игнатьевич – доктор технических наук, директор, pashkevich@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,

Попов Евгений Юрьевич – старший инженер, E.Popov@skoltech.ru, Сколковский институт науки и технологий,

Савельев Егор Геннадьевич – студент, 99sav@mail.ru, Российский государственный геологоразведочный университет «МГРИ» им. Серго Орджоникидзе,

Ромушкевич Раиса Андреевна – научный сотрудник, Romushkevich@mail.ru, Сколковский институт науки и технологий,

Павлов Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 536.2+536.631

EXPERIMENTAL STUDY OF AVACHA GEOTHERMAL SYSTEM ROCKS THERMAL PROPERTIES, KAMCHATKA

Pashkevich R.I., Doctor of Technical Sciences, Director, pashkevich@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia,

Popov E.Yu., Chief engineer, E.Popov@skoltech.ru, Skolkovo Institute of Science and Technology,

Savelyev E.G., Student, 99sav@mail.ru, Russian State Geological Prospecting University N.A. Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU),

Romushkevich R.A., Research scientist, Romushkevich@mail.ru, Skolkovo Institute of Science and Technology,

Pavlov K.A., Research scientist, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

Results of measurements of Avacha geothermal system rocks thermal properties complex (thermal conductivity, bulk heat capacity, thermal anisotropy factor) are presented. The measurements are conducted under normal conditions and two types of saturation: dry and water saturated.

Key words: rocks, thermal conductivity, bulk heat capacity, thermal anisotropy factor, method of optical scanning, Avacha geothermal system.

REFERENCES

1. Pashkevich R.I. *Vliyanie svoystv gornykh porod na rezultaty chislennogo modelirovaniya ehkspluatatsii geotermal'nykh sistem* (Influence of rock properties on the results of numerical modeling of exploitation geothermal systems). GIAB OV 2, «Kamchatka» (special issue), 2014, pp.175—182.
2. Pashkevich R.I., Popov E. Yu., Tarelko N. F., Chernev I.I. Pavlov K.A., Muratov P.V. *Noviye dannye o teplovykh svoystvakh porod geotermalnykh mestorojdeniy Kamchatki* (New data on thermal rock properties geothermal fields of Kamchatka), GIAB OV 2, «Kamchatka» (special issue), 2014, pp.36—45.
3. Vertogradskij V.A., Popov Yu.A., Miklashevskij D.E. *Metod i ustanovka dlya izmerenij teploprovodnosti gornyx porod pri vysokix davleniyax i temperaturax* (Method and apparatus for measuring the thermal conductivity of rocks at high pressures and temperatures). *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij, seriya «geologiya i razvedka»*. pp. 47-51 (2003).
4. Popov Y., Pribnow D., Sass J., Williams C, and Burkhardt H. *Geothermics*, №28, pp. 253-276 (1999).
5. Pashkevich R.I., Gorbach V.A., Pavlov K.A., Shadrin A.V. *Termometricheskaya cjemka uchastka Avachinskoy geotermalnoy sistemy* (Thermometric survey of the area of the Avacha geothermal system) // GIAB № 11, Special issue № 63 «Kamchatka-2», 2015, pp. 24-34.
6. Spasennyh M.Yu., Popov Yu.A., Romushkevich R.A., Popov E.Yu., Gabova A.V. *Experimentalniye issledovaniya teplovykh svoystv porod Avachinskoy geotermalnoy sistemy Kamchatki* (Experimental study of thermal properties of rocks of Avachinsky geothermal systems of Kamchatka). *Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote*. Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, 2015. 26 pp.
7. Popov Yu.A. *Teoreticheskie modely dlya opredeleniya teplovykh svoystv gornykh porod na osnove podviznykh istochnikov teplovoj energii* (A theoretical model for determining thermal properties of rocks on the basis of movable sources of thermal energy). *Izvestiya vuzov, seriya «Geologiya i razvedka»*, Statya 1, No9, pp. 97-105 (1983); Statya 2, No2, pp. 83-91 (1984).
8. GOST 26450.1-85. *Porody gornye. Metod opredeleniya otkritoy poristosti jidkostasysyeniem*.
9. Pashkevich R.I., Taranov S.R., Kungurova V.E. *Sostav porod uchastka Avachinskoy geotermalnoy sistemy* (The composition of the rocks of Avachinsky area of the geothermal system) // GIAB No 11, Special issue No 63 «Kamchatka-2», 2015, pp. 86-107.
10. Popov Yu.A. Tertychnyy V.V., Romushkevich R.A., Korobkov D.A. and Pohl J. *Pure and Appl. Geophys.* 160, pp. 1137-1161 (2003).
11. Popov, Y., Romushkevich, R., Korobkov, D., Mayr, S., Bayuk, I., Burkhardt, H., and Wilhelm, H. *Geophys. J. Int.*, 184, pp. 729-745 (2011).