

РАДИОФИЗИКА

УДК 536.21

ГРНТИ 29.19.09

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).426-437

Специальность ВАК 1.3.4; 1.3.14

Научная статья

К ОПИСАНИЮ ТЕМПЕРАТУРНО-БАРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГРАНИТОВ

Аливердиев А. А.^{1, 2}, Алиев Р. М.^{1, 2}, Амирова А. А.³, Бейбалаев В. Д.^{1, 2},
Григорьев Б. А.⁴, Заричняк Ю. П.⁵, Эфендиева М. Р.¹

¹Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия)

²Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН
(Махачкала, Россия)

³Институт физики ДФИЦ РАН (Махачкала, Россия)

⁴ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

⁵Национальный исследовательский университет информационных технологий,
механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия)

Аннотация В данной работе обсуждаются результаты проведенных нами комплексных исследований температурно-барических зависимостей эффективной теплопроводности гранитов. Для подробного анализа были выбраны опубликованные экспериментальные результаты температурных и барических зависимостей эффективной теплопроводности ряда гранитов и гранитоидов в диапазонах ~273-900 К и 0.1-1500 МПа, что соответствует параметрам горных пород от поверхностного слоя до глубин более 50 км континентальной коры. Предложено малопараметрическое описание температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности, достаточно хорошо согласующееся с экспериментальными данными в температурном диапазоне ~273-600 К при условии отсутствия необратимых изменений в образцах в результате термобарического воздействия.

Ключевые слова: теплофизические свойства, эффективная теплопроводность, высокие давления, давление, граниты

Для цитирования: Аливердиев А. А., Алиев Р. М., Амирова А. А., Бейбалаев В. Д., Григорьев Б. А., Заричняк Ю. П., Эфендиева М. Р. К описанию температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности гранитов // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 426-437. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).426-437

Research Article

ON THE DESCRIPTION OF THE TEMPERATURE-BARIC DEPENDENCE OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF GRANITES

Aliverdiev A. A.^{1, 2}, Aliyev R. M.^{1, 2}, Amirova A. A.³, Beibalaev V. D.^{1, 2},
Grigoriev B. A.⁴, Zarichnyak Yu. P.⁵, Efendieva M. R.¹

¹Dagestan State University (Makhachkala, Russia)

²Institute for Geothermal Research and Renewable Energy – Joint Institute for High Temperatures of the
Russian Academy of Sciences (Makhachkala, Russia)

³Amirkhanov Institute of Physics of DSC RAS (Makhachkala, Russia)

⁴Gazprom VNIIGAZ LLC

⁵Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
(Saint Petersburg, Russia)

Abstract This paper discusses the results of our comprehensive studies of the temperature-baric dependences of the effective thermal conductivity of granites. For a detailed analysis, we selected some

published experimental results of the temperature and pressure dependences of the effective thermal conductivity of a number of granites (as well as granitoids) in the temperature and pressure ranges of ~273–900 K and 0.1–1500 MPa, which corresponds to the parameters of rocks from the surface layer to depths of more than 50 km of the continental crust. A low-parametric description of the temperature-baric dependence of the effective thermal conductivity is proposed, which is in good agreement with the experimental data, at least in the temperature range of ~273–600 K, in the absence of irreversible changes in the samples as a result of the thermobaric effect.

Keywords: thermophysical properties, effective thermal conductivity, high pressures, pressure, granites

For citation: Aliverdiev A. A., Aliyev R. M., Amirova A. A., Beibalaev V. D., Grigoriev B. A., Zarichnyak Yu. P., Efendieva M. R. On the description of the temperature-baric dependence of the effective thermal conductivity of granites // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 426-437. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).426-437

Введение

В зарубежных и отечественных обзорных работах по возобновляемым источникам энергии [1-4] наряду с уже активно развивающимися ветровыми и солнечными электростанциями в число перспективных включены геотермальные и петротермальные, позволяющие извлекать тепловую энергию из глубин земной коры. Масштабы возможного извлечения тепловой энергии определяются технологически освоенными горизонтами бурения (3–10 км в настоящее время), перспективами более глубокого бурения, распределением температуры и тепловых потоков в земной коре и теплопроводностью пород земной коры при возрастающими по глубине температурами и давлением.

Наиболее распространенные в континентальной земной коре кислые полнокристаллические магматические горные породы – граниты, которые представляют собой естественные неоднородные материалы с достаточно сложной структурой, в состав которой входят кварц, калиевый полевой шпат, кислый плагиоклаз, слюда и другие незначительные включения. Исследование их теплофизических свойств в условиях естественного залегания является актуальной задачей для оценок и количественного моделирования температурных полей призабойных зон [5, 6], так и естественных геодинамических процессов, включая магматизм, метаморфизм и землетрясения, происходящие в земной коре, тепловую эволюции Земли и т. д. [7-10].

За последние несколько десятилетий были разработаны различные экспериментальные подходы для измерения термических свойств горных пород и минералов при высоких температурах и давлениях. Тем не менее, на сегодняшний день исследования совместного воздействия высокой температуры и давления на термические свойства гранитов остаются немногочисленными во всём диапазоне, характерном для земной коры и верхней границы мантии [11].

Построению модели теплопроводности гранитов и гранитоидов в условиях естественного залегания на основе анализа экспериментальных зависимостей и посвящена настоящая работа.

Образцы и эксперимент

Для анализа были использованы опубликованные экспериментальные результаты температурных и барических зависимостей эффективной теплопроводности ряда гранитов и гранитоидов в температурном и барическом диапазонах ~273-900 К и 0,1-1500 МПа. Перекрытие диапазонов различных экспериментальных методик делает возможным непосредственное сравнение результатов и обобщение выводов.

Для образца 1 (гранит, м/р р. Дагестан, глубина залегания 3020-3090 м, плотность 3,2 г/см³, пористость 1 %) и образца 2 (гранит, м/р Кольский п/о, поверхностные отложения, плотность 2,54 г/см³, пористость 1-2 %) данные взяты из [12]. Исследования теплопроводности для них проводились абсолютным стационарным методом плоского слоя на установке, которая позволяла производить измерения при гидростатическом давлении до 400 МПа в диапазоне температур 273-523 К [13]. Передающей давление средой служил газ аргон. Предварительно проводилась подготовка образцов путём их просушивания в термостате при температуре 10⁵ °С в течение 8-10 часов и последующие взвешивания на аналитических весах с точностью до 10⁻³ г.

Данные по образцу гримзельского гранита (плотность 2.55 г/см³) взяты из [14]. Тепловые свойства измерялись методом лазерной вспышки. Измерения проводились при нагреве до 500 °С и далее при охлаждении до комнатной температуры.

Данные по образцам гранитоидов 4 (сиеногранит) и 5 (монцогранит) взяты из [11]. Плотность образцов составляла около 2,7 г/см³. Образцы также исследовались методом лазерной вспышки. Предварительно образцы очищались в ацетоне и этаноле с использованием ультразвуковой очистки и высушивались в вакуумной печи при 473 К в течение 24 часов для удаления возможной абсорбированной воды. Эксперименты при высоком давлении проводились в Институте геохимии Китайской академии наук на установке YJ-3000t с шестью наковальнями из карбида вольфрама. В качестве среды, передающей давление, и нагревателя использовались пирофиллитовый куб и графитовая втулка соответственно. Перед экспериментами под высоким давлением пирофиллитовый куб и другие детали предварительно нагревали до 1173 К для удаления абсорбированной воды.

Данные по образцу 8 (гранит из Вестерли, Род-Айленд, плотность 2,60 г/см³, пористость 2 %) взяты из [15]. Для создания высокого давления использовалась кубическая наковальня клинового типа.

Кроме того, анализировались экспериментальные зависимости эффективной теплопроводности гранитов [16, 17 и др.].

Результаты и обсуждение

Как показано в [18-20], температурная зависимость большинства естественных и искусственных композитных материалов при фиксированном давлении достаточно хорошо описывается степенным законом:

$$\lambda(T, P) = \lambda(T_0, P) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n(P)}. \quad (1)$$

Для описания температурно-барической зависимости нами было предложено:

$$\lambda(T, P) = \lambda_0 \cdot (1 + \delta_{T_0}(P)) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{n_0 \cdot (1 - \nu(P))}. \quad (2)$$

Такое представление позволяет выделить всего две опорные величины $n_0 = n(0)$ и $\lambda_0 = \lambda(T_0, 0)$, и две безразмерные барические функции $\nu(P)$ и $\delta_{T_0}(P)$. Коэффициенты $\nu(P)$ и n_0 зависят от давления и не зависят от выбора температуры T_0 , в то время как $\delta_{T_0}(P)$ параметрически зависит от выбранной для привязки температуры T_0 .

На рисунке 1 представлены экспериментальные температурные зависимости эффективной теплопроводности образцов 1-4, для давлений 0,1 МПа (атмосферного) и 400 МПа для 1 и 2 [12], для давления 0.1 МПа для образца 3 при нагреве (сплошные символы) и последующем охлаждении (открытые символы) [14] и для давления 500 МПа для образца [11]. Вместе с экспериментальными данными представлены пунктирные линии, полученные согласно аппроксимации экспериментальных точек степенным законом (1) с коэффициентами, найденными методом наименьших квадратов.

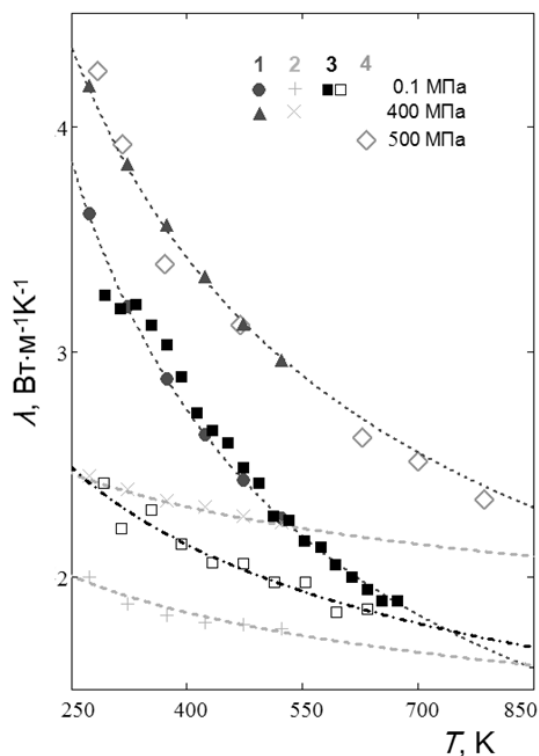


Рисунок 1. Зависимость эффективной теплопроводности от температуры: на изобаре 0.1 МПа (образцы 1-3), 400 МПа (1, 2) и 500 МПа (образец 4)

При атмосферном давлении ход температурной зависимости эффективной теплопроводности для образца 3 при нагревании почти совпал с данными по первому образцу. Однако для образца 3 авторы [14] обнаружили эффект термической модификации образца при достижении температуры порядка 700 К. Обратный ход зависимости эффективной теплопроводности, снятый при охлаждении, также блестяще описывается степенным законом (1), но имеет другой степенной коэффициент n , что говорит о существенной модификации образца.

В [14] данный эффект объяснялся образованием трещин из-за высокой термической нагрузки. Такое объяснение находит подтверждение и в выводах работ [21, 22], в которых тепловые свойства гранитов измерялись на образцах после нагрева до различных фиксированных температур и последующего охлаждения до комнатной температуры. В результате было установлено, что с повышением предельной температуры нагрева теплопроводность и температуропроводность постепенно уменьшаются, но удельная теплоемкость постепенно увеличивается. При этом в температурных диапазонах 475-575 К и 775-875 К имеет место наиболее быстрое изменение всех обозначенных тепловых параметров. Причём в диапазоне 775-875 К проявляются наиболее существенные изменения. Фотографии подвергшихся тепловой обработке образцов подтвердили предположение, что изменения тепловых параметров обусловлены возникновением, расширением и соединением трещин. Между 900 К и 1150 К размеры и характер трещин не сильно меняются, но их количество и связность постепенно увеличивается. При более высоких температурах на поверхности кристалла появляются явные признаки плавления, что свидетельствует о термическом повреждении образцов.

С другой стороны, трещинообразование очень сильно зависит не только от достигнутых температур, но и от скорости нагрева и остывания, повторяемости действий, а также приложенного давления. В частности, для α - β -перехода кварца, где его обычная форма с тригональной симметрией обратимо переходит в форму с гексагональной симметрией, температура перехода составляет 845 К при атмосферном давлении и возрастает до 945 К при 375 МПа [21]. В работе [11], показано, что несмотря на достижение достаточно высоких температур (более 850 К), эффект образования и расширения трещин при приложенных высоких давлениях практически не выражен.

В свою очередь, ход температурной зависимости эффективной теплопроводности для образца 4 при 500 МПа (открытые ромбы на рисунке 1) практически совпал с зависимостью для первого образца при 400 МПа (закрытые треугольники на рисунке 1).

В таблице 1 представлена итоговая информация по температурным зависимостям исследуемых образцов с коэффициентами, найденными методом наименьших квадратов.

Таблица 1. Значения эффективной теплопроводности при 300 К и показателя n для образцов

№	0.1 МПа		500 МПа		Примечание, ссылка
	n	λ (300 К) Вт м ⁻¹ К ⁻¹	n	λ (300 К) Вт м ⁻¹ К ⁻¹	
1.	-0.72	3.37	-0.53 (*)	4.01 (*)	[12]
2.	-0.18	1.94	-0.12 (*)	2.51 (*)	[12]
3.	-0.73	3.42	-	-	(нагрев) [14]
3.	-0.32	2.35	-	-	(охлаждение) [14]
4.	-	-	-0.53	3.97	сиеногранит [11]
5.	-	-	-0.44	3.33	монцогранит [11]
6.	~ -0.79 (*)	3.21	-0.56 (*)	3.80 (*)	[15]

Значения со знаком (*) получены экстраполяцией.

Как было показано в [12], зависимости $\nu(P)$ и $\delta_{T_0}(P)$ для большинства образцов гранитов существенно нелинейны, и достаточно сильно коррелированы между собой. Более того при надлежащим образом выбранной фиксированной температуре $T_0 \approx 455 \text{ К} \pm 20 \text{ К}$ могут быть представлены одним выражением:

$$\nu(P) = \delta_{T_0}(P) = \frac{\beta \left(\frac{P}{P_0^*} \right)}{1 + \frac{P}{P_0^*}}, \quad (3)$$

где величина β имеет физический смысл отношения предельной теплопроводности к теплопроводности при нулевом давлении, а P_0^* – константа, имеющая размерность давления и определяющая нелинейность зависимости.

Анализ зависимости эффективной теплопроводности от температуры и давления позволили установить корреляцию между λ_0 и ρ_0 (см. таблицу 1), и представить выражение (2) в виде:

$$\lambda(T, P) = \lambda_0 \cdot (1 + \delta(P)) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-N \cdot \chi \cdot (1 - \delta(P))}, \quad (4)$$

$$\delta(P) = A \cdot P \frac{1 + D \cdot \chi}{P_0 + D \cdot P \cdot \chi}, \quad (5)$$

$$\chi = \frac{\lambda_0}{\lambda_0^*} - 1, \quad (6)$$

где λ_0 – значение эффективной теплопроводности при $T_0 = 455 \text{ К}$ и атмосферном давлении.

Установлено, что для всех изученных гранитов имеющиеся экспериментальные данные с отклонением, не превышающим экспериментальную погрешность, описываются уравнением (4) с использованием одних и тех же эмпирических параметров $P_0 = 445 \text{ МПа}$, $\lambda_0^* = 1,64 \text{ Вт/(м·К)}$, $A = 0,29$, $N = 1,6$, $D = 1$. Тем самым температурно-барическая зависимость становится функцией одного аргумента – значением эффективной теплопроводности при $T_0 = 455 \text{ К}$. В свою очередь, связь между значениями эффективной теплопроводности при $T_0 = 455 \text{ К}$ (λ_0) и при 300 К при атмосферном давлении табулируется посредством (4). Таким

образом, знание значения эффективной теплопроводности гранита при атмосферном давлении и комнатной температуре даёт возможность прогнозировать её температурно-барическую зависимость в достаточно широком диапазоне температур и давлений.

В [15] для образца 6 не представлено температурной зависимости эффективной теплопроводности при атмосферном давлении, но присутствуют две зависимости, имеются две изобары при давлениях 400 МПа и 1000 МПа, а также изотерма. Это позволило провести первичную оценку полной температурно-барической зависимости эффективной теплопроводности образца согласно (4). Как следует из рисунка 2, экспериментальные данные хорошо совпадают с расчётными. На рисунке 3 представлены экспериментальные барические зависимости для образцов 1, 4-6. Пунктирные линии представляют аппроксимации внутри экспериментальных диапазонов. Все экспериментальные точки оказались лежащими на расчетных кривых в пределах экспериментальной погрешности, что делает такой подход обоснованным и позволяет надеяться на хорошие экстраполяционные возможности (4).

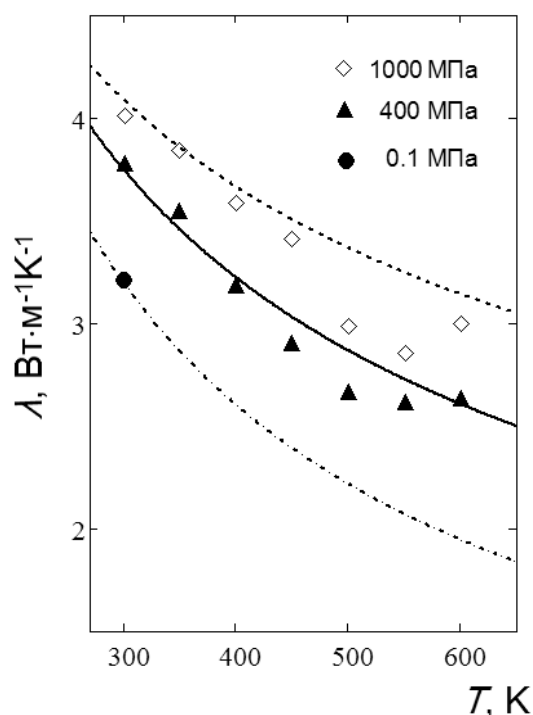


Рисунок 2. Температурные зависимости эффективной теплопроводности образца 6 на изобарах 0.1 МПа, 400 МПа и 1000 МПа

К сожалению, отсутствие данных по эффективной теплопроводности при атмосферном давлении для образцов гранитоидов 4, 5 не позволяют выполнить их анализ согласно уравнению (4). Кроме того, следует отметить, что полученные коэффициенты нельзя рассматривать как универсальные, и границы применимости данного подхода ещё требуют изучения. Тем не менее, на рисунке 3 представлена возможная аппроксимация барических зависимостей согласно (4)-(6). Для лучшего

описания имеющихся температурных зависимостей (см. рисунок 4) для монцогранита (образец 5) применялся параметр $A=0,22$, остальные параметры уравнений (4)-(6) использовались те же, что и для гранитов 1, 2 и 6. Значение λ_0 при построении зависимостей, представленных на рисунке 3, для гранитоидов 4 и 5 подбиралось для лучшего описания имеющихся температурных зависимостей. Для образца 4 в [11] такая зависимость представлена только для $P=500$ МПа и барическая зависимость, представленная на рисунке 3, построена с использованием тех же параметров, что для гранитов 1, 2 и 6. Для гранитов 1, 2 и 6 значение λ_0 варьировалось в пределах 3 % отклонения от экспериментальных значений, представленных в таблице 1.

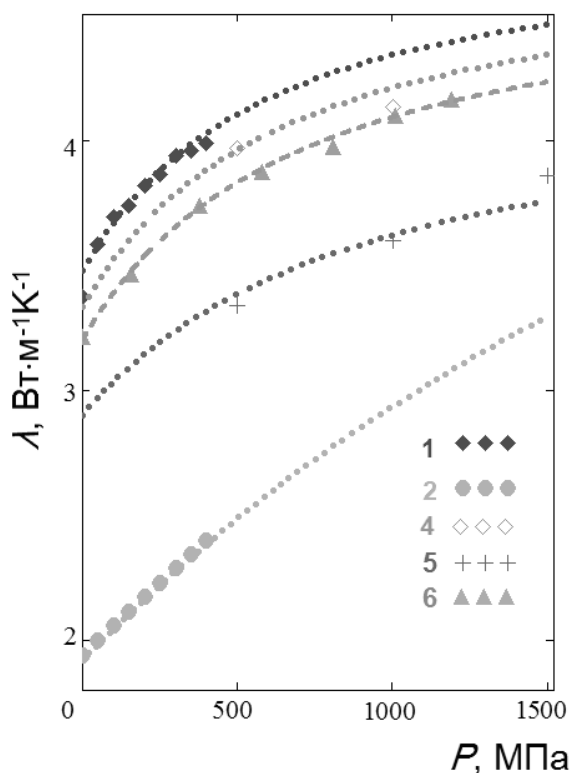


Рисунок 3. Зависимости эффективной теплопроводности для образцов 1,2, 4-6 на изотермах 300 К

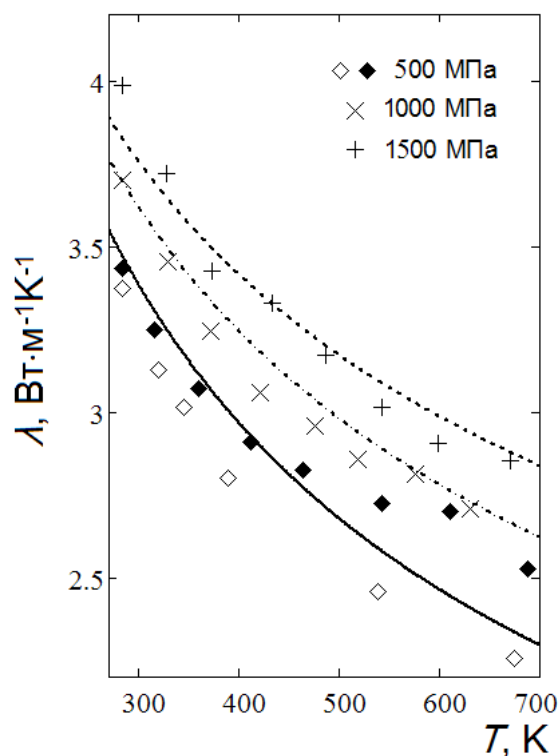


Рисунок 4. Зависимости эффективной теплопроводности для образца 5 на изобарах 500 МПа, 1000 МПа и 1500 МПа (открытые и закрытые символы – результаты двух измерений при одном давлении 500 МПа)

Уточнение величины и вариации найденных коэффициентов в зависимости от состава и других факторов возможно при условии постановки и проведения соответствующих широкомасштабных исследований.

Заключение

Установлено, что знание значения эффективной теплопроводности гранитов при атмосферном давлении и комнатной температуре даёт возможность прогнозировать её температурно-барическую зависимость в достаточно широком

диапазоне температур и давлений. Несмотря на то, что оценка границ применимости предложенного метода расчета эффективной теплопроводности ограничена как в температурно-барическом диапазоне, так и по составу пород, и требует для уточнения дополнительных экспериментальных исследований, полученные результаты могут найти широкое практическое применение, по меньшей мере, в первичных оценках.

Список литературы

1. IRENA (2023): Renewable energy statistics 2023 / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2023. 69 p. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/03/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf
2. Energy Technology Perspectives 2023 // Report of International Energy Agency. France by IEA, 2023. 459 p. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/01/EnergyTechnologyPerspectives2023_compressed-1.pdf
3. Алексеенко С. В., Маркович Д. М. Комплексный научно-технический проект полного инновационного цикла (КНТП) «Технологии геотермальной энергетики» – Новосибирск, ИТ СО РАН, 2022.
4. Гусаров В. А., Писарев Д. Ю., Гусарова Е. В. Концепция развития петротермальных тепловых электростанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. 68, 1(42). 44-49. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-44-49
5. Norden B., Förster A., Förste H.-J., Fuchs S. Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration // Geothermal Energy. 2020. 8(1). 1-19. DOI: 10.1186/s40517-020-0157-0
6. Miranda M. M., Márquez M. I. V., Raymond J., Dezayes C. A numerical approach to infer terrestrial heat flux from shallow temperature profiles in remote northern regions // Geothermics. 2021. 93. 102064. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102064
7. Furlong K. P., Chapman D. S. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2013. 41(1). 385-410. DOI: 10.1146/annurev.earth.031208.100051
8. Annen C., Blundy J. D., Sparks R. S. J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones // Journal of Petrology. 2005. 47(3). 505-539. DOI: 10.1093/petrology/egi084
9. Nabelek P. I., Whittington A. G., Hofmeister A. M. Strain heating as a mechanism for partial melting and ultrahigh temperature metamorphism in convergent orogens: Implications of temperature dependent thermal diffusivity and rheology // Journal of Geophysical Research. 2010. 115(B12). B12417. DOI: 10.1029/2010JB007727
10. Whittington A. G., Hofmeister A. M., Nabelek P. I. Temperature-dependent thermal diffusivity of the Earth's crust and implications for magmatism // Nature. 2009. 458. 319-321. DOI: 10.1038/nature07818
11. Huangfei F., Baohua Z., Jianhua G., Zili X., Shuangmeng Z., Shuang M. S., Heping L. Thermal diffusivity and thermal conductivity of granitoids at 283–988 K and 0.3–1.5 GPa // American Mineralogist. 2019. 104(11). 1533-1545. DOI: 10.2138/am-2019-7099
12. Emirov S., Aliverdiev A., Beybalaev V., Amirova A. On the temperature and pressure dependences of the effective thermal conductivity of granites // Thermal Science. 2021. 25, 4(A). 2493-2501. DOI: 10.2298/TSCI200408176E

13. Emirov S. N., Aliverdiev A. A., Zarichnyak Y. P., Emirov R. M. Studies of the Effective Thermal Conductivity of Sandstone Under High Pressure and Temperature // *Rock Mechanics Rock Engineering*. 2021. 54(6). 3165-3174. DOI: 10.1007/s00603-020-02353-3
14. Kant M. A., Ammann J., Rossi E., Madonna C., Höser D., Rudolf von Rohr P. Thermal properties of Central Aare granite for temperatures up to 500 C: Irreversible changes due to thermal crack formation // *Geophysical Research Letters*. 2017. 44(2). 771-776. DOI: 10.1002/2016GL070990
15. Horai K., Susaki J. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1989. 55. 292-305. DOI: 10.1016/0031-9201(89)90077-0
16. Miao S. Q., Li H. P., Chen G. Temperature Dependence of Thermal Diffusivity, Specific Heat Capacity, and Thermal Conductivity for Several Types of Rocks // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2014. 115(2). 1057-1063. DOI: 10.1007/s10973-013-3427-2
17. Miranda M. M., Matos C. R., Rodrigues N. V., Pereira A. J. S. C., Costa J. J. Effect of Temperature on the Thermal Conductivity of a Granite with High Heat Production from Central Portugal // *Journal of Iberian Geology*. 2019. 45(1). 147-161. DOI: 10.1007/s41513-018-0096-9
18. Emirov S. N., Beybalaev V. D., Amirova A. A., Ibragimov A. I., Aliverdiev A. A. Thermal Conductivity Temperature-Pressure Dependence of Rocks and Ceramics // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1172. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1172/1/012006
19. Aliverdiev A. A., Grigoriev B. A., Aliev R. A., Zarichnyak Yu. P., Beybalaev V. D., Amirova A. A. Temperaturno-baricheskiye zavisimosti effektivnoy teploprovodnosti gornykh porod razlichnoy uporyadochennosti [Temperature-baric dependences of the effective thermal conductivity of rocks of various ordering] // *Vesti Gazovoy Nauki*. 2021. 4(49). 54-59.
20. Emirov S. N., Aliev R. M., Amirova A. A., Aliverdiev A. A., Beybalaev V. D., Grigoriev B. A., Zarichnyak Y. P. Temperature-baric dependence of the effective thermal conductivity of amorphous and polycrystalline rocks // *Materials Today: Proceedings*. 2022. 66(3). 866-870. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.495
21. Sun Q., Zhang W., Zhu Y., Huang Z. Effect of high temperatures on the thermal properties of granite // *Rock Mechanics Rock Engineering*. 2019. 52. 2691-2699. DOI: 10.1007/s00603-019-1733-0
22. Zhao X. G., Zhao Z. G., Guo Z., Cai M., Li X., Li P. F., Cheng L., Wang J. Influence of Thermal Treatment on the Thermal Conductivity of Beishan Granite // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018. 51(7). 2055-2074. DOI: 10.1007/s00603-018-1479-0

References

1. IRENA (2023): Renewable energy statistics 2023 / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2023. 69 p. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/03/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2023.pdf
2. Energy Technology Perspectives 2023 // Report of International Energy Agency. France by IEA, 2023. 459 p. Available at: https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/01/EnergyTechnologyPerspectives2023_compressed-1.pdf

3. Alekseenko S. V., Markovich D. M. Kompleksnyy nauchno-tekhnicheskiy proyekt polnogo innovatsionnogo tsikla (KNTP) «Tekhnologii geotermal'noy energetiki» [Integrated scientific and technical project of the full innovation cycle (ISTP) "Technologies of geothermal energy"]. Novosibirsk: Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022.
4. Gusarov V. A., Pisarev D. Yu., Gusarova E. V. Kontseptsiya razvitiya petrotermal'nykh teplovykh elektrostantsiy [The concept of development of petrothermal thermal power plants] // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2021. 68, 1(42). 44-49. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-44-49
5. Norden B., Förster A., Förste H.-J., Fuchs S. Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration // Geothermal Energy. 2020. 8(1). 1-19. DOI: 10.1186/s40517-020-0157-0
6. Miranda M. M., Márquez M. I. V., Raymond J., Dezayes C. A numerical approach to infer terrestrial heat flux from shallow temperature profiles in remote northern regions // Geothermics. 2021. 93. 102064. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102064
7. Furlong K. P., Chapman D. S. Heat flow, heat generation, and the thermal state of the lithosphere // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2013. 41(1). 385-410. DOI: 10.1146/annurev.earth.031208.100051
8. Annen C., Blundy J. D., Sparks R. S. J. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones // Journal of Petrology. 2005. 47(3). 505-539. DOI: 10.1093/petrology/egi084
9. Nabelek P. I., Whittington A. G., Hofmeister A. M. Strain heating as a mechanism for partial melting and ultrahigh temperature metamorphism in convergent orogens: Implications of temperature dependent thermal diffusivity and rheology // Journal of Geophysical Research. 2010. 115(B12). B12417. DOI: 10.1029/2010JB007727
10. Whittington A. G., Hofmeister A. M., Nabelek P. I. Temperature-dependent thermal diffusivity of the Earth's crust and implications for magmatism // Nature. 2009. 458. 319-321. DOI: 10.1038/nature07818
11. Huangfei F., Baohua Z., Jianhua G., Zili X., Shuangmeng Z., Shuang M. S., Heping L. Thermal diffusivity and thermal conductivity of granitoids at 283–988 K and 0.3–1.5 GPa // American Mineralogist. 2019. 104(11). 1533-1545. DOI: 10.2138/am-2019-7099
12. Emirov S., Aliverdiev A., Beybalaev V., Amirova A. On the temperature and pressure dependences of the effective thermal conductivity of granites // Thermal Science. 2021. 25, 4(A). 2493-2501. DOI: 10.2298/TSCI200408176E
13. Emirov S. N., Aliverdiev A. A., Zarichnyak Y. P., Emirov R. M. Studies of the Effective Thermal Conductivity of Sandstone Under High Pressure and Temperature // Rock Mechanics Rock Engineering. 2021. 54(6). 3165-3174. DOI: 10.1007/s00603-020-02353-3
14. Kant M. A., Ammann J., Rossi E., Madonna C., Höser D., Rudolf von Rohr P. Thermal properties of Central Aare granite for temperatures up to 500 °C: Irreversible changes due to thermal crack formation // Geophysical Research Letters. 2017. 44(2). 771-776. DOI: 10.1002/2016GL070990
15. Horai K., Susaki J. The effect of pressure on the thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. 55. 292-305. DOI: 10.1016/0031-9201(89)90077-0
16. Miao S. Q., Li H. P., Chen G. Temperature Dependence of Thermal Diffusivity, Specific Heat Capacity, and Thermal Conductivity for Several Types of Rocks // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. 115(2). 1057-1063. DOI: 10.1007/s10973-013-3427-2

17. Miranda M. M., Matos C. R., Rodrigues N. V., Pereira A. J. S. C., Costa J. J. Effect of Temperature on the Thermal Conductivity of a Granite with High Heat Production from Central Portugal // Journal of Iberian Geology. 2019. 45(1). 147-161. DOI: 10.1007/s41513-018-0096-9
18. Emirov S. N., Beybalaev V. D., Amirova A. A., Ibragimov A. I., Aliverdiev A. A. Thermal Conductivity Temperature-Pressure Dependence of Rocks and Ceramics // Journal of Physics: Conference Series. 2019. 1172. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1172/1/012006
19. Aliverdiev A. A., Grigoriev B. A., Aliev R. A., Zarichnyak Yu. P., Beybalaev V. D., Amirova A. A. Temperaturno-baricheskiye zavisimosti effektivnoy teploprovodnosti gornykh porod razlichnoy uporyadochennosti [Temperature-baric dependences of the effective thermal conductivity of rocks of various ordering] // Vesti Gazovoy Nauki. 2021. 4(49). 54-59.
20. Emirov S. N., Aliev R. M., Amirova A. A., Aliverdiev A. A., Beybalaev V. D., Grigoriev B. A., Zarichnyak Y. P. Temperature-baric dependence of the effective thermal conductivity of amorphous and polycrystalline rocks // Materials Today: Proceedings. 2022. 66(3). 866-870. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.495
21. Sun Q., Zhang W., Zhu Y., Huang Z. Effect of high temperatures on the thermal properties of granite // Rock Mechanics Rock Engineering. 2019. 52. 2691-2699. DOI: 10.1007/s00603-019-1733-0
22. Zhao X. G., Zhao Z. G., Guo Z., Cai M., Li X., Li P. F., Cheng L., Wang J. Influence of Thermal Treatment on the Thermal Conductivity of Beishan Granite // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018. 51(7). 2055-2074. DOI: 10.1007/s00603-018-1479-0

Информация об авторах

Аливердиев Абутраб Александрович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия); главный научный сотрудник, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН (Махачкала, Россия), ORCID: 0000-0003-1650-3633, aliverdi@mail.ru

Алиев Расул Магомедович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия); главный научный сотрудник, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН (Махачкала, Россия), ORCID: 0000-0002-3061-4121, geopromooo@yandex.ru

Амирова Анисе Александровна – инженер-исследователь, Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН (Махачкала, Россия), ORCID: 0000-0001-9630-4487, anise65@mail.ru

Бейбалаев Ветлугин Джабраилович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия); старший научный сотрудник, Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН (Махачкала, Россия), ORCID: 0000-0002-4881-9264, kaspjij_03@mail.ru

Григорьев Борис Афанасьевич – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, начальник Отдела ученого совета, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Развилка, Россия), ORCID: 0000-0002-8691-6962, B_Grigoriev@vniigaz.gazprom.ru

Заричняк Юрий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник, доцент, Национальный исследовательский Университет информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-8713-3583, zarich4@gmail.com

Эфендиева Марият Рамзесовна – студентка, Дагестанский государственный университет (Махачкала, Россия), ORCID: 0009-0001-5746-5330, mari5007ef@gmail.com