Тепловые свойства осадочных горных пород в условиях естественного залегания

Процесс переноса тепла в диэлектриках и горных породах носит сложный характер и трудно поддается моделированию даже при многих упрощениях.

Температура и давление являются достаточно сильными инструментами, позволяющими исследовать закономерности и процессы распространения и рассеяния тепловых волн в твёрдых телах, которые необходимы и для теории, описывающей явления теплопереноса, и для практического применения в промышленности, электронике и особенно в геофизике для разведки, проектирования и разработки нефтегазовых и геотермальных месторождений.

Теплопроводность твёрдых тел является чувствительным, а иногда единственным параметром, позволяющим исследовать дефектную структуру и процессы распространения и рассеивания тепловых волн.

- Нефтегазовая и геотермальная отрасли имеют принципиальное значение в развитии общества 21 века. Роль энергоресурсов предлагаемых данной промышленностью трудно переоценить. Однако, одним из важнейших этапов рациональной и безопасной деятельности на всех этапах производственного цикла в нефтегазовой и геотермальной промышленности является постоянный мониторинг параметров системы «скважина-пласт». Одним из таких параметров выступает температура в призабойной зоне скважины.
- Оценка и мониторинг температуры в призабойной зоне пласта имеет принципиальное значение на всех этапах работ - от проектирования, бурения до промышленной эксплуатации. В процессе бурения данные о температуре играют определяющую роль в выборе промывочной жидкости. Температура оказывает определяющую роль на фильтрационные и реологические свойства бурового раствора и его вязкостные характеристики.

Закон Фурье (1822 г.)

$q = -\lambda \, grad\, T$, где $grad\, T = \dfrac{T_2 - T_1}{h_2 - h_1}$, $q = \dfrac{Q}{S}$

Закон Эйкина (1911г.)

$$\lambda(T) \approx CT^{-1}$$

Закон Лейбфрида – Шлеймана

$$\lambda_{ф}(T) = \frac{12}{5} \quad 4^{1/3} \quad \left(\frac{k}{h}\right)^3 \quad \frac{M \quad a \quad \theta^3}{\gamma^2 \quad T}, \qquad где \quad \theta = \frac{h\upsilon_{max}}{k}$$

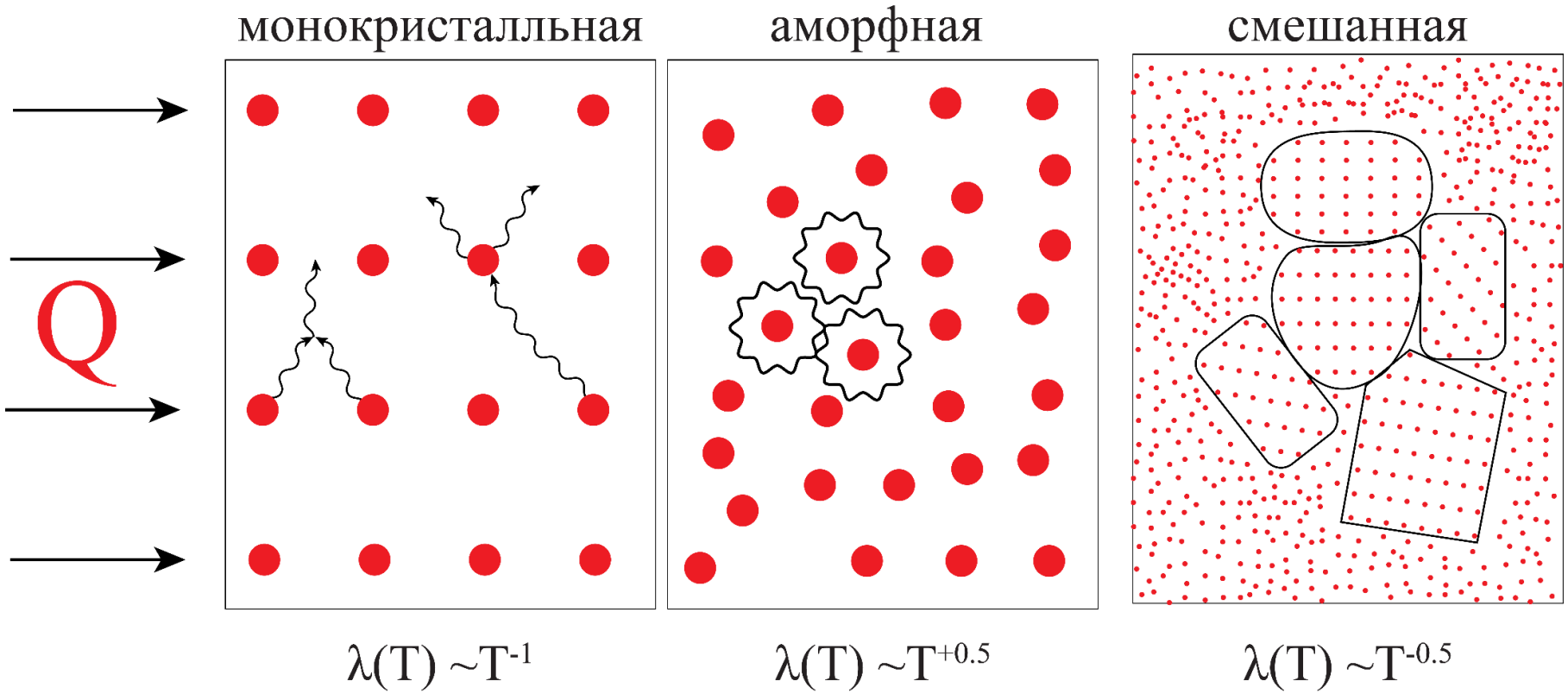
Закон Дугдейла-Макдональда

$$\lambda(T) = a\upsilon / 3\chi\gamma^2 T$$

Термоэлектрическая добротность

$$Z(T) = \sigma\alpha^2 \Big/ \lambda T$$

СТРУКТУРА ТВЁРДОГО ТЕЛА



Jesse D. Merriman, Anne M. Hofmeister. Temperature-dependent thermal transport properties of carbonate minerals and rocks. J. Geosphere. 2018 V.14, no.4/ p. 1-27.

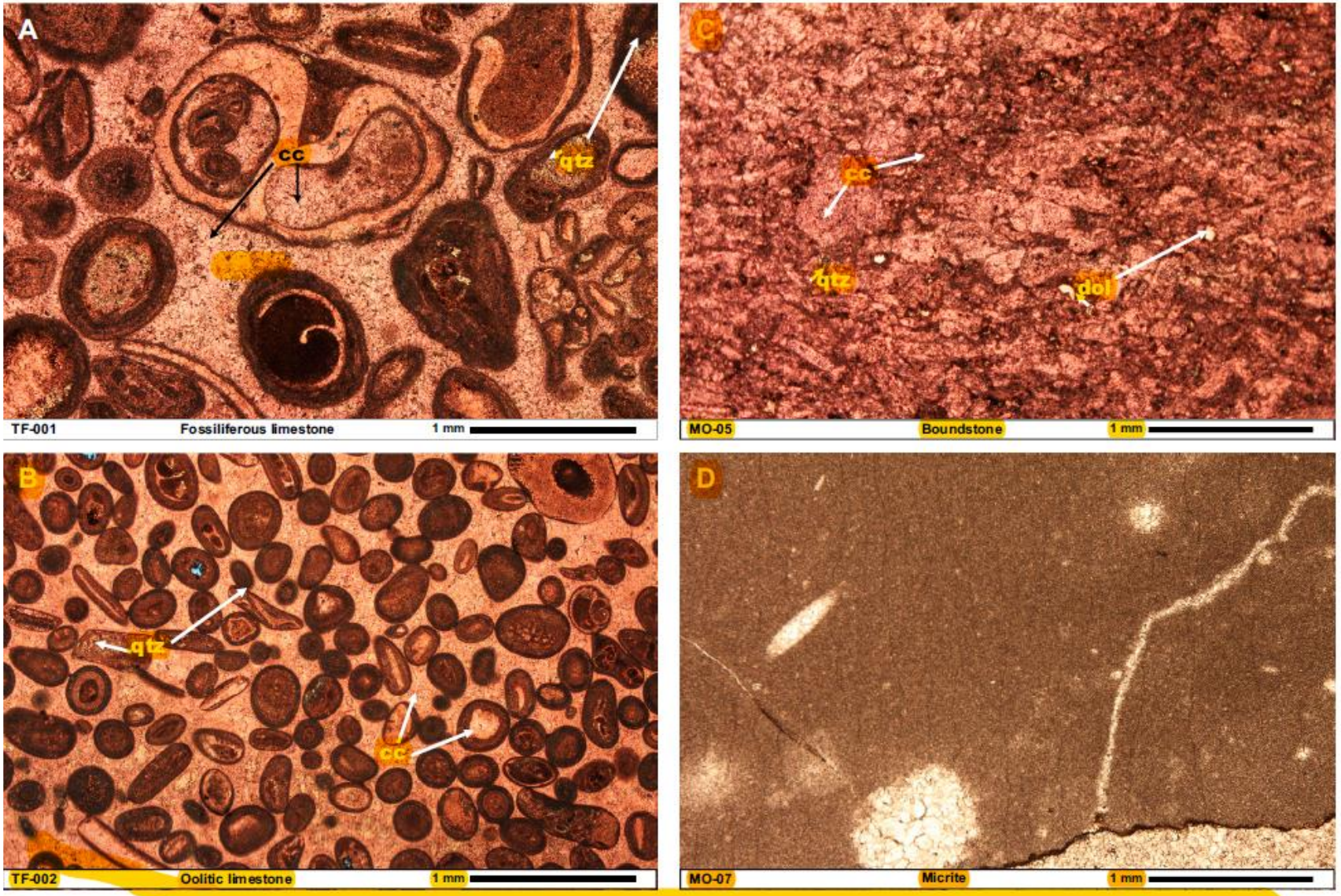


Figure 3 (*on this and following two pages*). Photomicrographs of rock samples (Table 1) in plane-polarized light. See text for sample descriptions. Samples TF-001, TF-002, MO-05, KS-002, 33-1, and 17-4 were treated with alizarin to highlight calcite where present (red tint). All images are at the same scale. Polymineralic samples have example phases marked according to mineralogy: qtz—quartz; cc—calcite; dol—dolomite; for—forsterite; kfs—potassium feldspar; chl—chlorite. (A) Sample TF-001, fossiliferous limestone, with minor qtz in ooids and some fossils. (B) Sample TF-002, oolitic limestone, with minor qtz in ooids and fossils; large pore space (pale blue) in two upper left ooids is likely a result of sample preparation. (C) Sample MO-05, boundstone. (D) Sample MO-07, micrite, consisting of nearly pure cc; rare qtz is not visible at this scale.

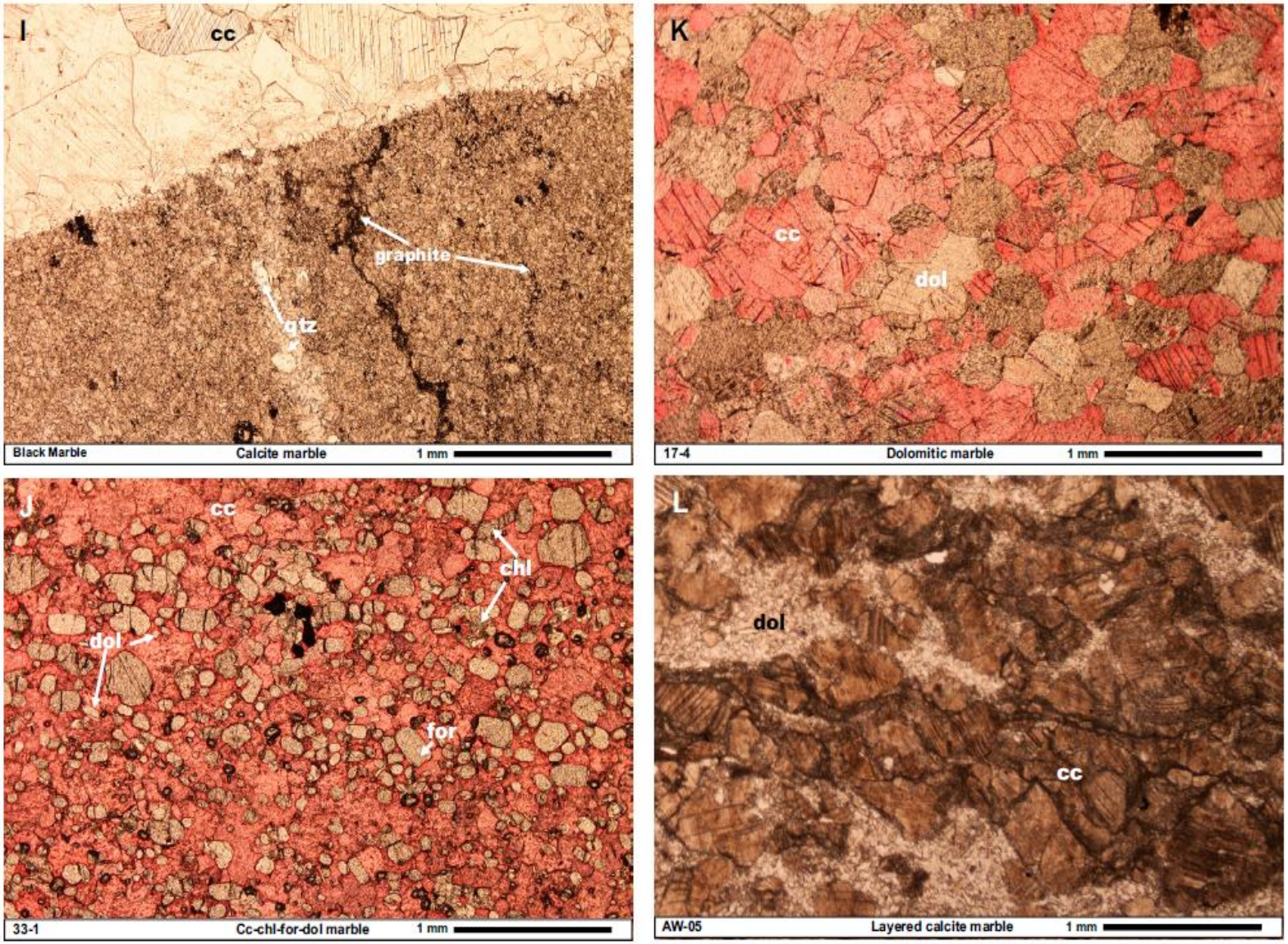


Figure 3 (*continued*). (I) Black marble; calcite marble with minor (0.9 wt%) qtz; black veins and spots may be graphite. (J) Sample 33-1, cc-chl-for-dol marble; cc is stained red; for appears as high-relief translucent grains, dol as lower-relief translucent grains; chl is visible as alteration between grains. (K) Sample 17-4, dolomitic marble; abundant cc (red) and dol (translucent) compared to X-ray diffraction results (Table 1; ~94% dol versus ~6% cc) suggests mineralogical heterogeneity in the sample (see text for discussion). (L) Sample AW-05, layered cc marble; matrix is fine-grained dol; chl is visible as alteration along cc grains (brown); sample layering and textural variation are not visible at this scale.

$$\lambda_{эф}(T) \approx CT^{-n},$$

где $n \geq 1$ - описывает перенос тепла в кристаллических веществах,

$n = 0.5$ - в кристаллических веществах с большим количеством дефектов [4,5],

$n=-0.5$ - в аморфных веществах [6].

1] Eucken A. Uber die Temperaturabhangigkeit der Warmeleitfahigkeit fester Nichtmetalle. Ann. Phys. 34, 185, 1911.

[2] Debye P. Vorträge über die Kinetische Theorie der Materie und Electricitat. Berlin, 1914.

[3] Пайерлс Р. Квантовая теория твердых тел.М.: И.Л., 1956. -324 с.

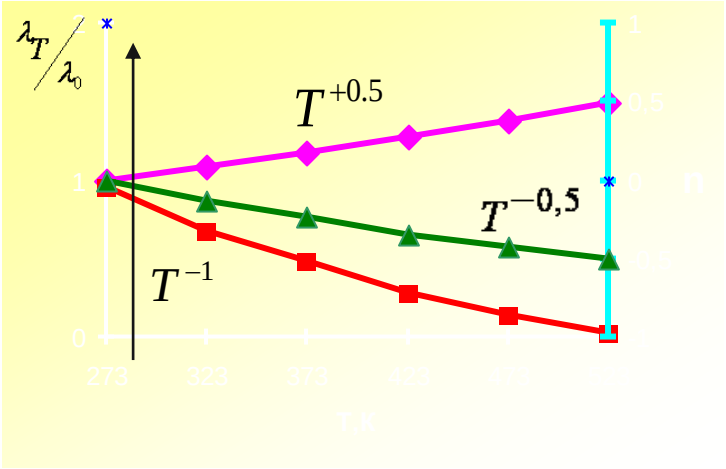
[4] Klemens P.G. Theory of the pressure dependence of the lattice thermal conductivity. Solid St. Physics.-1958. Proc 7 Symposium on Thermo.

[5] Roufosse M., Klemens P.G. Thermal Conductivity of complex dielectric crystals. Phys. Rev. B., 1973. V.7. P.5379

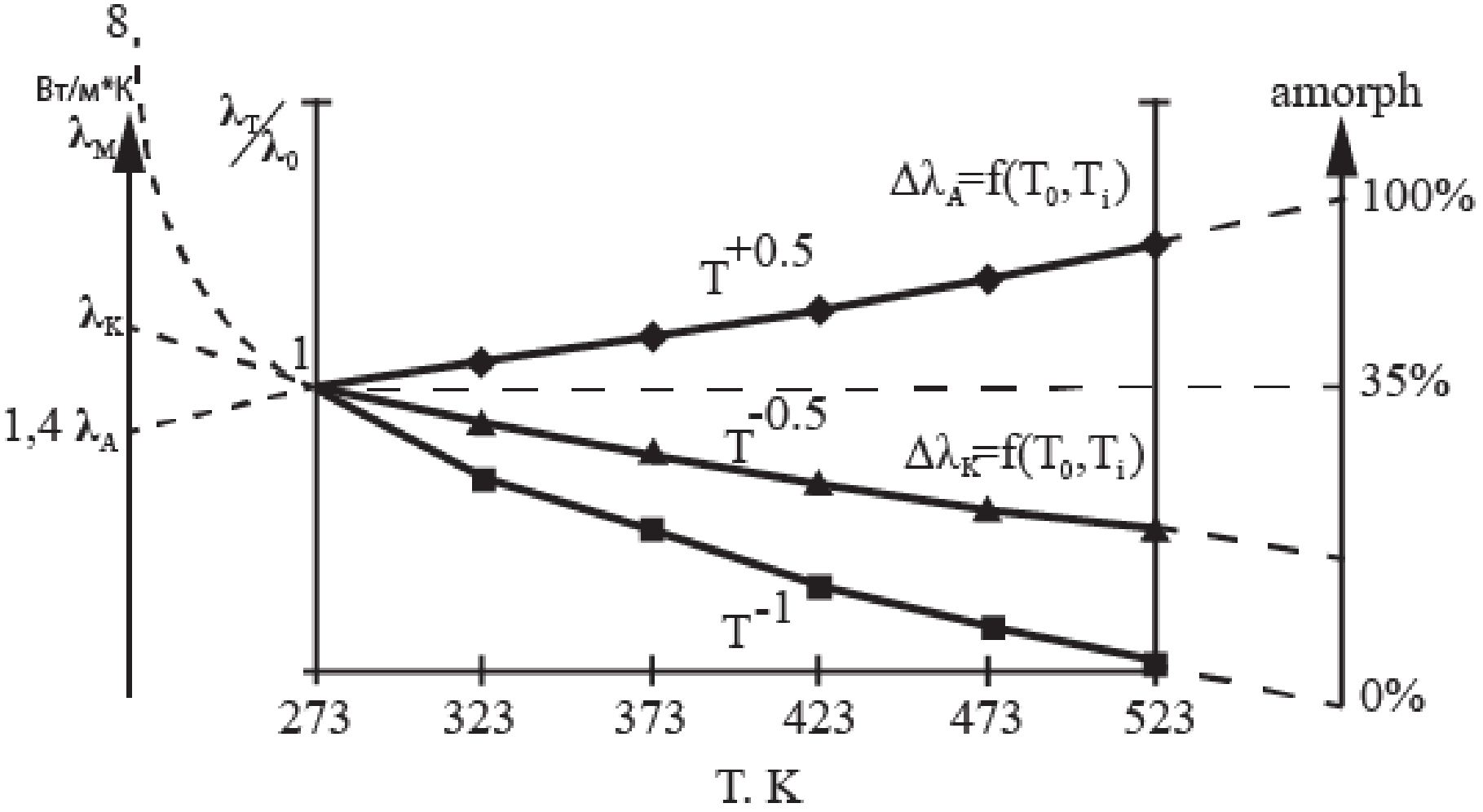
[6] Ziman J.M. Electrons and fonons. The Theory of transport phonons in Solids. Ox Ford. 1960.

[7] Займан Дж. Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах. М. 1962. 488с.

[8] Dugdal J.S., Macdonald. Lattict Thermal Conductivity. Phys. Rev. 1955. 98. №6ю Рю 1751-1752



$$\lambda_{эф}(T) \approx T^{\pm n},$$



$$\lambda_{эф}(T) \approx T^{o}$$

Андизит, обсидиан, пероксен, базальт, сиенит, диабаз, габбро, чернокит

1. Horai K., Susaki G.// Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1989. 55. 292.
2. Clark jr. Handbook of Physical Constant Revised Edition. 1966. 238.
3. Эмиров С.Н., Рамазанова А.Э. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. 71. 317.
4. Seipold U. // High Temp.- High Press. 1996. 27/28. 147.
5. Кларк С. Справочник физических констант горных пород. М: Мир, 1969. 543 с.
6. Лебедев Т.С. и др. Петрофизические исследования при высоких PT-состояниях. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
7. *М.А.Садовский. О значении и смысле дискретности в геофизики. Сб.н. трудов. М.Наука. 1989. с. 5-14.*

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2018, том 82, № 7, с. 912–913

УДК 536.21:592:621

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ КОМБИНИРОВАННОГО СОСТАВА

© 2018 г. Ю. П. Заричняк[1, *], А. Э. Рамазанова[2], С. Н. Эмиров[2]

[1]Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии ДНЦ РАН, Махачкала

*E-mail: zarich4@gmail.com

Рассмотрена модель структуры горной породы как гетерогенной системы из двух компонент: аморфной и кристаллической и расчетная формула для теплопроводности горных пород, с разными температурными зависимостями теплопроводности компонент. Зная зависимость теплопроводности компонент от температуры и их объемные доли, можно прогнозировать теплопроводность реальной горной породы для разных сочетаний аморфной и кристаллической фаз.

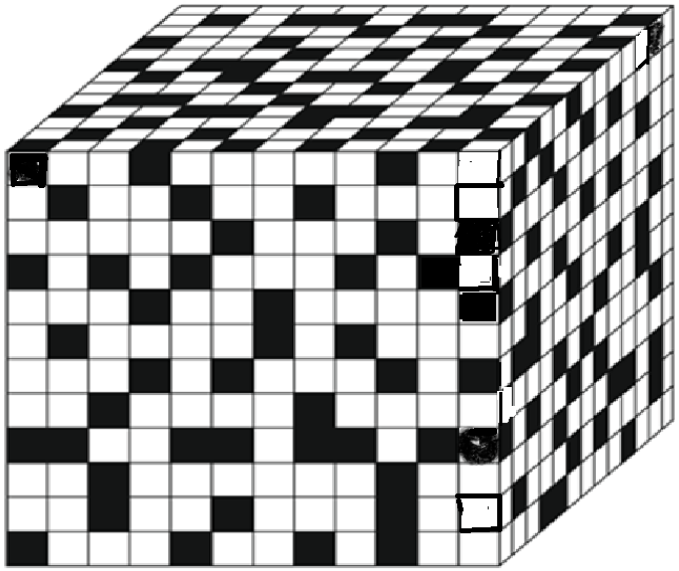
DOI: 10.1134/S0367676518070451

Оценка плотности теплового потока и распределение температур на различных глубинах непосредственно связаны с величиной теплопроводности горных пород в условиях пластовых давлений и температур. Изучение теплофизических свойств горных пород – предмет геофизических

висимость эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ описывается уравнением

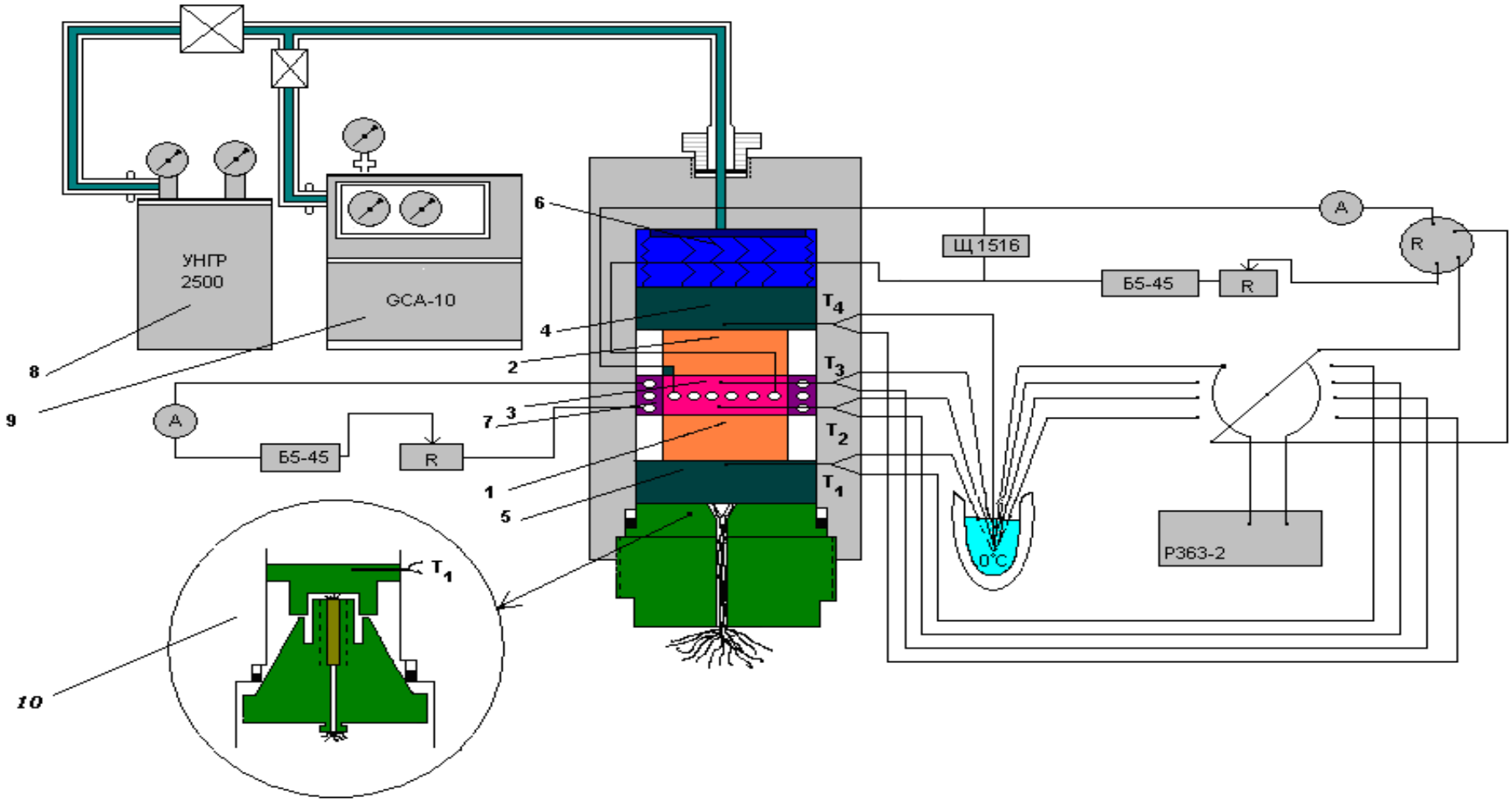
$$\lambda_{эф} = CT^n, \quad (1)$$

где $n = -1$ для кристаллического состояния, в котором существует дальний порядок межатомных



Модель структуры реального грунта в виде бинарной гетерогенной системы с хаотическим расположением изомерных аморфного и кристаллического компонентов

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



1,2 - образцы, 3 – градиентный нагреватель, 4,5 – холодильники, 6 – пружинка, 7 – компенсацион-ный нагреватель, 8 – масляный компрессор, 9 – газовый компрессор, 10 – пробка с конусным уплотнением, Т1, Т2 , Т3, Т4 - медь – константановые термопары

Основные методы экспериментального измерения эффективной теплопроводности горных пород и диэлектриков

Абсолютный стационарный компенсационный метод Х.И.Амирханова

$$\lambda_{эф} = \frac{Q - Q_{пот}}{\frac{S_1}{h_1}\Delta T_1 + \frac{S_2}{h_2}\Delta T_2}$$

Нестационарный метод

$$\lambda_{эф} = C_P \alpha \rho$$

T, K	Thermal conductivity , W/m K							
	1 [34]	2 [35]	3 [36]	4 [29]	5 [29]	6 [24]	7 [37]	8 [47]
273	3,35	3,99	2,48	2,06	2,71	3.75	4,98	2,25
323	3,22	3,67	2,25	1,91	2,61	3.60	4,55	2,10
373	3,05	3,42	2,07	1,83	2,52	3.48	4,21	1,98
423	2,91	3,22	1,93	1,76	2,45	3.38	3,94	1,87
473	2,74	3,05	1,81	1,71	2,39	3.30	3,71	1,80
523	2,69	2,90	1,71	1,66	2,34	3.22	3,51	1,75
n	-0,38	-0,49	-0,56	-0,28	-0,22	-0.23	-0,53	-0,40
C. W/ m	1812	62,61	60,11	9,87	9,61	13.96	99,99	21,46

1. (Крист. Кварц) - Hofmeister A.M., Alan G. Whittington A.G., Pertermann M. . Transport properties of high albite crystals, near-endmember feldspar and pyroxene glasses, and their melts to high temperature. Contrib Mineral Petrol (2009) 158:381–400. [34]

2. (Гранит)- Horai K., Susaki J. The effect of pressure on thermal conductivity of silicate rocks up to 12 kbar. Physics of the Earth and planetary Interiors. 1989. 292-305. [35]

3. (Известняк) – Clark Jr. Handbook of Physical Constants Revised Edition Sidney. P. Clark , jr., Editor yale University. 1966. (Poole. Phil.1912.24. 45.) [36]

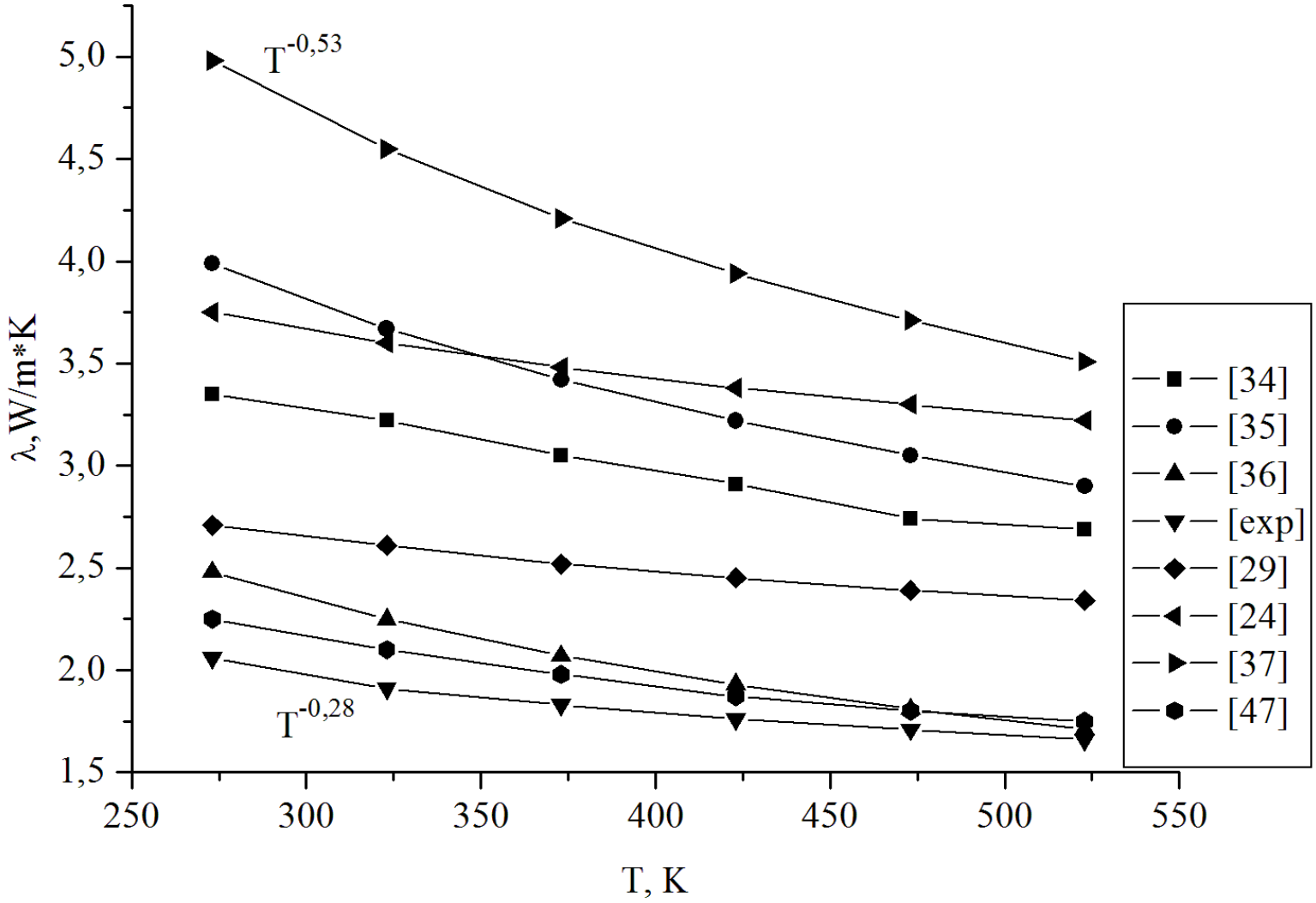
4. (Песчаник) - Наши результаты

5. Abdulagatova Z.Z., Abdulagatov I.V., Emirov S.N. Int. J. Rock Mech. Mining Scienses. 2009. 46. 1055-1071. [29]

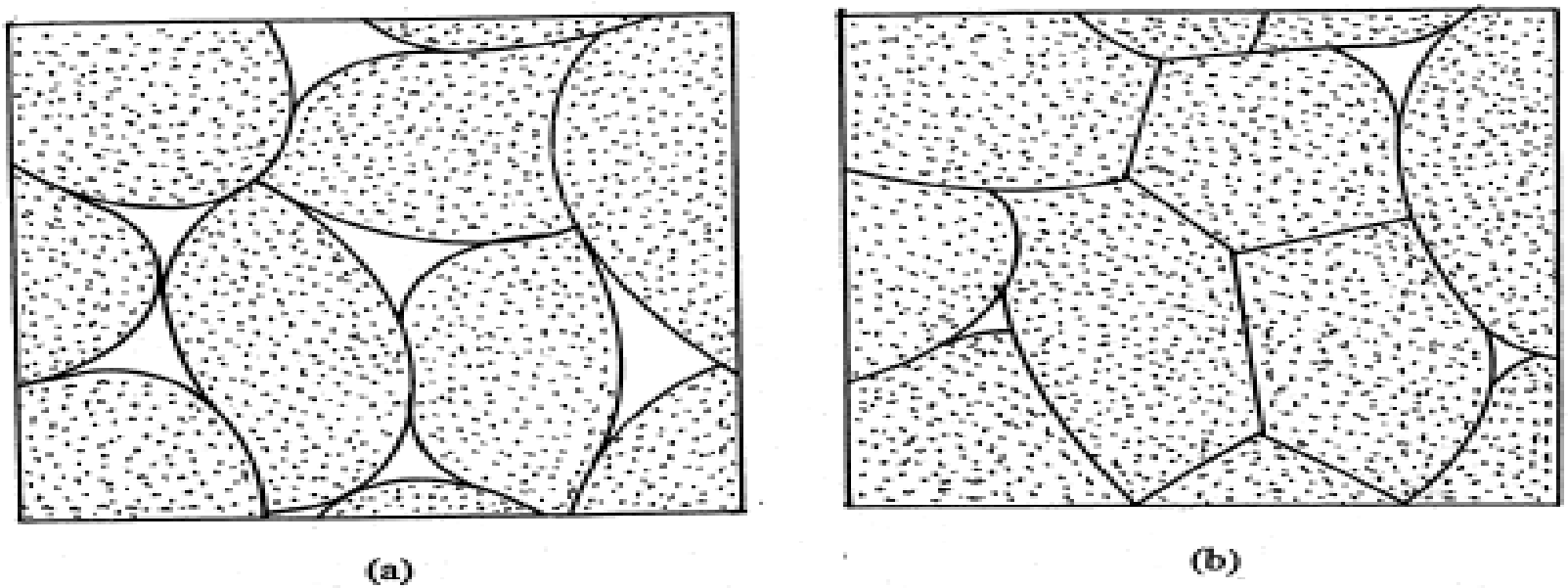
6.(Песчаник) – Adulaganov I.M., Abulagatova Z.Z., Kallaev S.N., Bakmaev A.G., Ranjith. Int. J. Thermophys. 2015. 36. 658-691. [24]

7. (Пирофиллит) - – Clark Jr. Handbook of Physical Constants Revised Edition Sidney. P. Clark , jr., Editor yale University. 1966. [37]

8. (Песчаник LS -4) - Aurangzeb, Liaqat Ali Khan and Asghari Maqsood. Prediction of effective thermal conductivity of porous consolidated media as a function of temperature: a test example of limestones.J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. 40. 4953–49. [47]


λ,W/m*K
T, K
T^-0,53
T^-0,28
5,0
4,5
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
250
300
350
400
450
500
550
[34]
[35]
[36]
[exp]
[29]
[24]
[37]
[47]

Схематическое изображение структуры трещин и пор и их распределение в породах при низких (a) и высоких (b) давлениях



1. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Явление образования в поликристаллах неравновесных границ зерен при поглощении ими решеточных дислокаций. // Бюллетень. Открытия. Изобретения, 1988, №7, Диплом №339.
2. Стрельцов В.А., Зайцев В.И., Рюмшина Т.А. Эффекты анизотропии сжатия и их роль в исследовании пластической деформации гидростатически сжатых кристаллических систем // Физ. и техн. выс.давлений, 1980, 7, с.8.
3. Стрельцов В.А. Напряженное состояние бикристалла, вызванное всесторонним гидростатическим сжатием // Физ. и техн. выс. давлений. 1983. 14. С. 24-29.
4. Барьхтар В.Г., Галкин А.А. О переходе твердых тел из хрупкого в пластическое состояние. ДАН СССР . 1976. № 5 Т. 227. С. 1079.
5. Галкин А.А., Барьхтар В.Г. К теории поглощения звука при переходе материала из хрупкого в пластическое состояние ДАН СССР. 1978. № 4, Т. 239, С. 835.

Теоретически влияние давления на теплопроводность твердых растворов, сплавов и горных пород большинство авторов анализируют на основании формулы Лейбфрида – Шлеймана:

$$\lambda_{ф}(T) = \frac{12}{5} \quad 4^{1/3} \quad \left(\frac{k}{h}\right)^3 \quad \frac{M \quad a \quad \theta^3}{\gamma^2 \quad T}, \qquad где \quad \theta = \frac{h\upsilon_{\max}}{k}$$

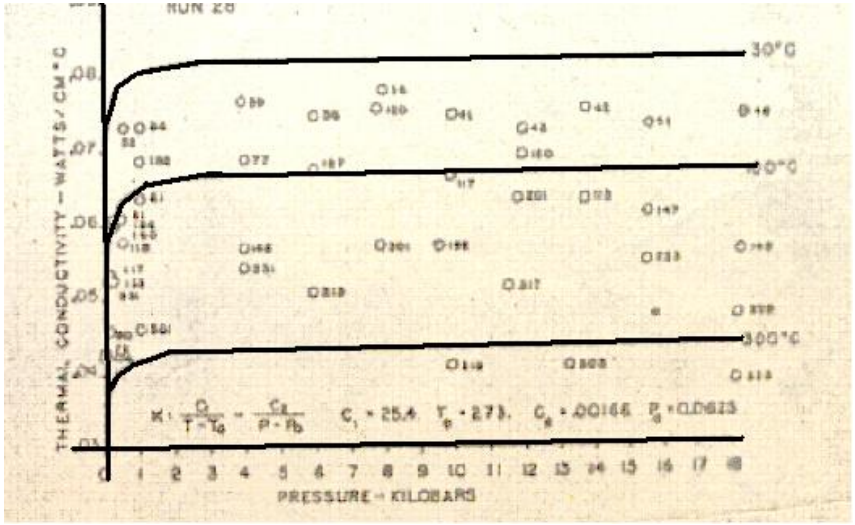
которая показывает, что давление должно приводить к линейному росту теплопроводности. Однако, существующие в литературе результаты экспериментальных исследований по влиянию давления на теплопроводность твердых растворов, сплавов и горных пород, указывают на то, что линейная зависимость теплопроводности от давления встречается достаточно редко.

1. Leibfrid G., Schloeiman E. Nach. Acad. Wiss.Gottingen Mat. Physik. 1954., K.1. V.2. P.71-93.

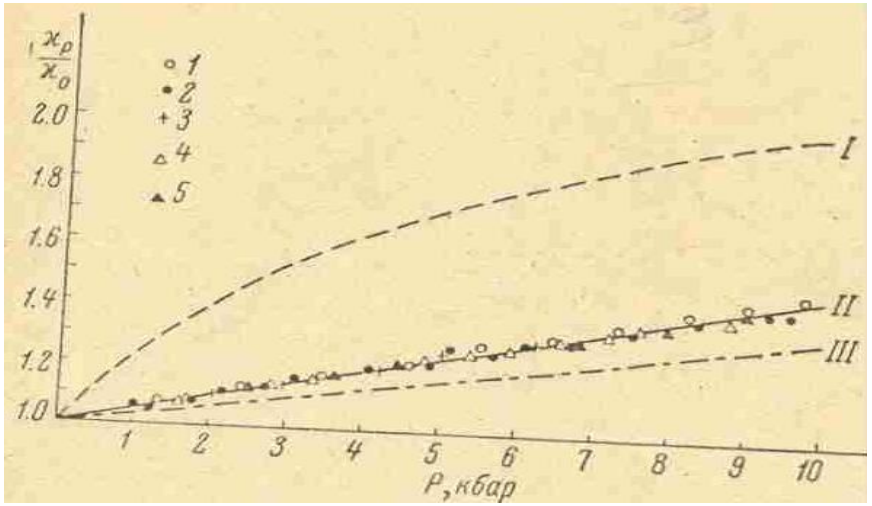
2. Alm O., Backstrom G. Thermal Conductivity of NaCl up to 40 kBar and 240-400 K // High Temperatures-High Pressures. 1975. V. 7. P. 235.

3. Селезнев В.Е., Цыпкина Н.С., Петров А.В., Аверкин А.А., Логачев Ю.А. Влияние давления до 10 Кбар на теплопроводность KCl, KI, NaCl и LiF // ФТТ. 1976. Т. 18. В. 5. С. 1423.

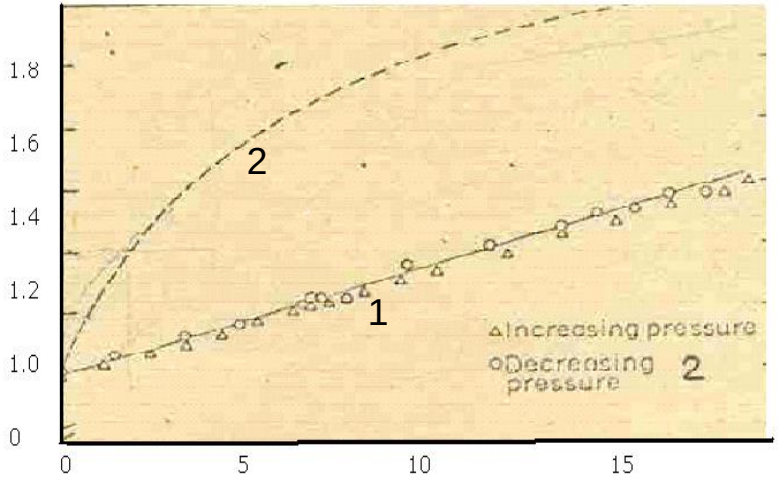
4. Hughes D.S. and Savin F. Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure // Phys.Rev. 1967. V.161. N3. P.861-863.



D.S.Huches and F.Savinf. Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure/ V.161, № 3, 1967, p.861-863.

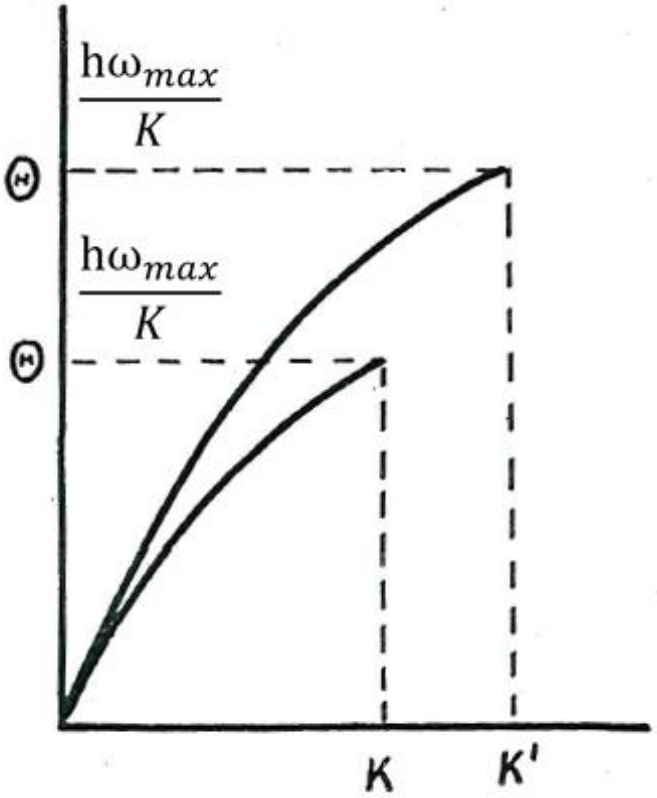


В.У.Селезнев, .С.Цыпкина, А.В.Петров, А.А.Аверкин, Ю.А.Логачев. Влияние давления до 10 Кбар на теплопроводность KCl, Kl, NaCl, LiF. ФТТ. Том 18. В.5, 1976 с. 1423-1425



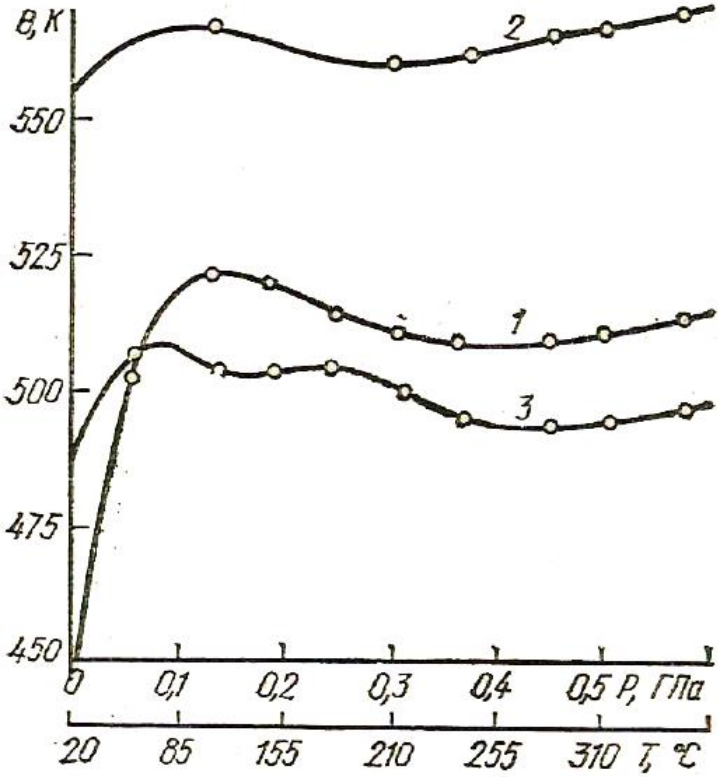
O.Alm and G.Backstrom. Thermal conductivity of KCl up to 19 kbar. J.Phys. Chem. Solids. 1974. V.35. p.421-424

Hughes D.S. and Savin F. Thermal Conductivity of Dielectric Solids at High Pressure // Phys.Rev. 1967. V.161. N3. P.861-863.



Дисперсная кривая для твёрдых диэлектриков в ω-K – пространстве, которая показывает рост температуры Дебая под давлением

Воларович М.М., Баюк Е.И., Левикин А.И., Томешевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях. 1974. М. Наука. 223 с.



Температура Дебая (Θ) при различных термобарических условиях земной коры

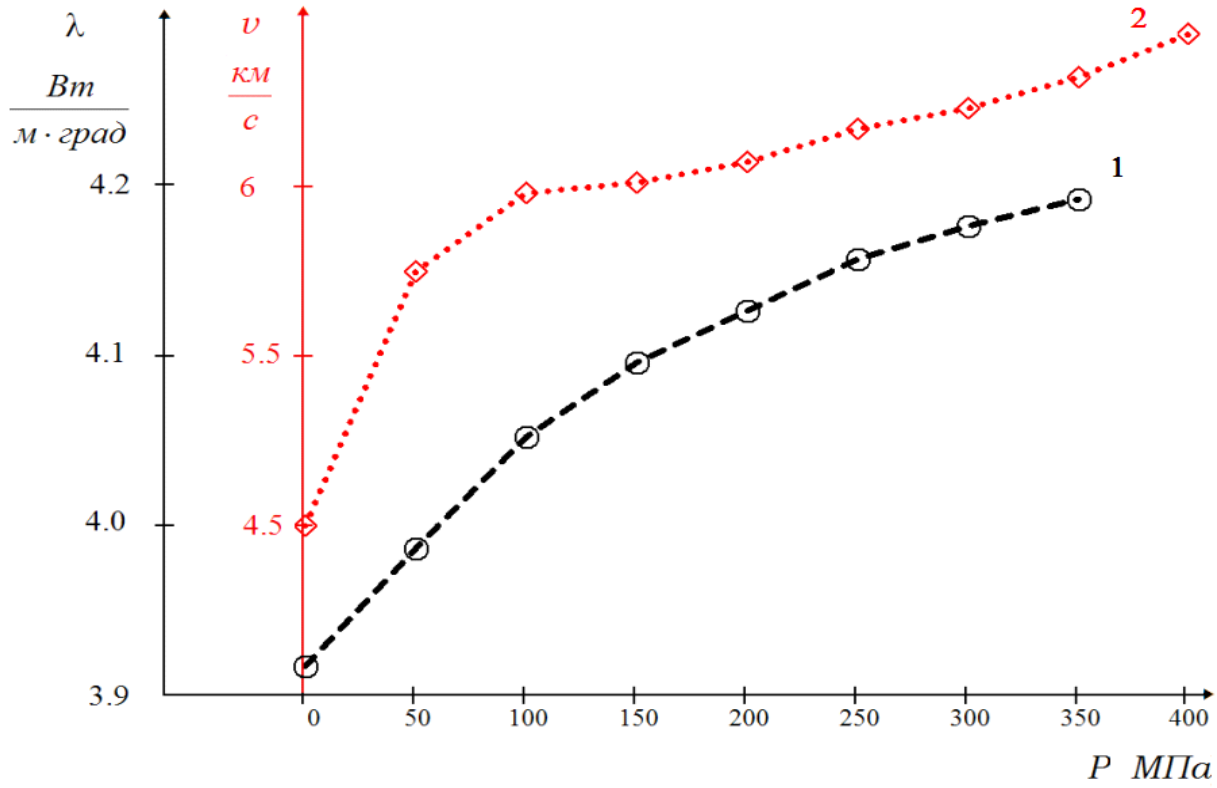


Рис. Зависимость эффективной теплопроводности (1) и скорости распространения продольных ультразвуковых волн (2) андезита от давления.

Таблица 1. Теплопроводность (Вт/м·К) образцов окварцованного андезита-базальта от гидростатического давления и температуры

Давление (МПа)									
T, K	0.1	50	100	150	200	250	300	350	λp/λo
273	3.90	3.97	4.03	4.08	4.11	4.14	4.16	4.17	1.07
323	3.93	4.00	4.07	4.11	4.14	4.17	4.19	4.21	1.07
373	3.96	4.03	4.11	4.14	4.17	4.20	4.23	4.25	1.09
423	3.99	4.05	4.14	4.17	4.20	4.23	4.26	4.28	1.07
473	4.01	4.07	4.17	4.19	4.22	4.25	4.28	4.31	1.08
523	4.03	4.09	4.19	4.21	4.24	4.27	4.31	4.33	1.08
n	0.052	0.045	0.06	0.05	0.05	0.048	0.054	0.059	
C	2.91	3.07	2.85	3.08	3.11	3.14	3.07	2.99	

Таблица 2. Скорость распространения продольных ультразвуковых волн (км/с) в образцах окварцованного андезита- базальта от давления [12]

T, K	Давление (МПа)								
	0.1	50	100	150	200	250	300	350	400
300	5.00	5.75	5.98	6.01	6.07	6.17	6.23	6.32	6.45

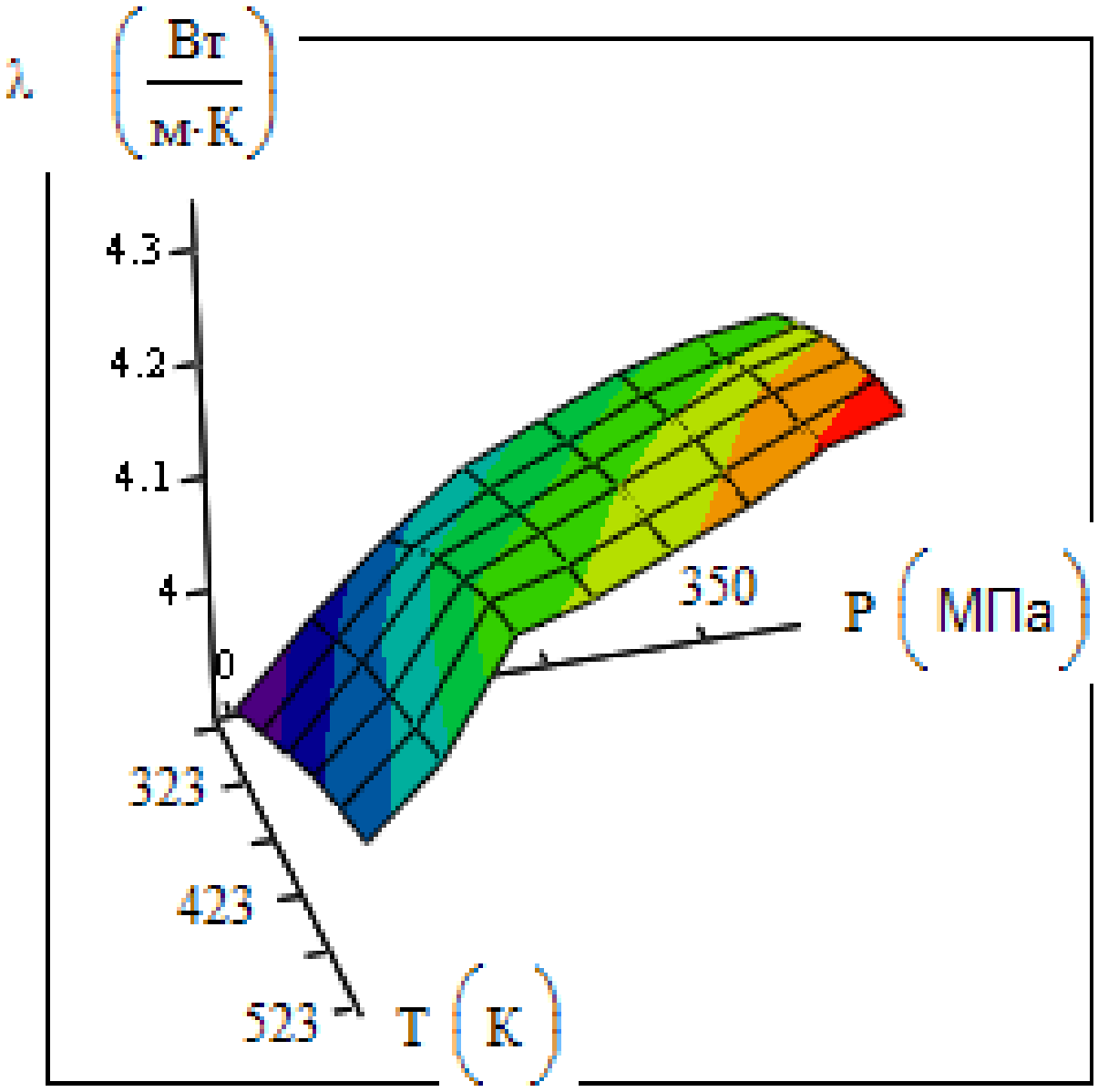

λ
Вт
м·К
4.3
4.2
4.1
4
0
350
P
МПа
323
423
523
T
K

Таблица. Теплопроводность (Вт/м·K) образцов амфиболита от гидростатического давления и температуры

T, K	0.1	50	100	150	200	250	300	350	400
275	3.52	3.78	3.89	3.91	3.93	3.95	3.97	3.99	4.01
323	3.02	3.29	3.39	3.4	3.42	3.44	3.46	3.48	3.5
373	2.63	2.91	3.04	3.06	3.08	3.1	3.12	3.14	3.14
423	2.35	2.58	2.7	2.75	2.78	2.81	2.83	2.85	2.85
473	2.1	2.38	2.5	2.55	2.62	2.66	2.7	2.68	2.64
523	1.89	2.23	2.34	2.4	2.45	2.5	2.5	2.5	2.5
n	-0.95	-0.81	-0.78	-0.75	-0.72	-0.7	-0.71	-0.71	-0.72
C	753	359	312	264	232	205	215	225	236

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2018, том 82, № 7, с. 979–982

УДК 536.21:592:621

О ТЕМПЕРАТУРНЫХ И БАРИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2018 г. С. Н. Эмиров[1, 2], В. Д. Бейбалаев[1, 3], А. Э. Рамазанова[1], И. А. Давудов[2], А. А. Амирова[4], А. А. Аливердиев[1, 3, *]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра Российской академии наук", Махачкала*

[2]*Дагестанский государственный технический университет, Махачкала*

[3]*Дагестанский государственный университет, Махачкала*

[4]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики им. Х. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук", Махачкала,*

**E-mail: aliverdi@mail.ru*

Представлены экспериментальные результаты эффективной теплопроводности горных пород (песчаника и гранита) и поликристаллического халькогенида мышьяка. Измерения проводили абсолютным стационарным методом в температурном диапазоне 273–523 K и при гидростатическом давлении до 400 МПа. Для измеренных образцов при фиксированном давлении характерна степенная температурная зависимость теплопроводности с отрицательным показателем. Предложено описание данной зависимости, по экспериментальным данным вычислены входящие в уравнение величины.

DOI: 10.1134/S0367676518070177

Теплоперенос идеальных кристаллов имеет температурную зависимость $\lambda \sim T^{-1}$ [1, 2], в то время как процесс переноса тепла аморфных структур носит активационный характер, где пе-

$\lambda(T)$ таких пород, как андезит, обсидиан, пироксен, базальт и др. [4, 5, 7] в области температур от 273–523 K не меняется с ростом температуры ($n = 0$). В общем случае величина и знак показа-

$$\lambda(P,T) \approx T^{-n(P)}$$

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

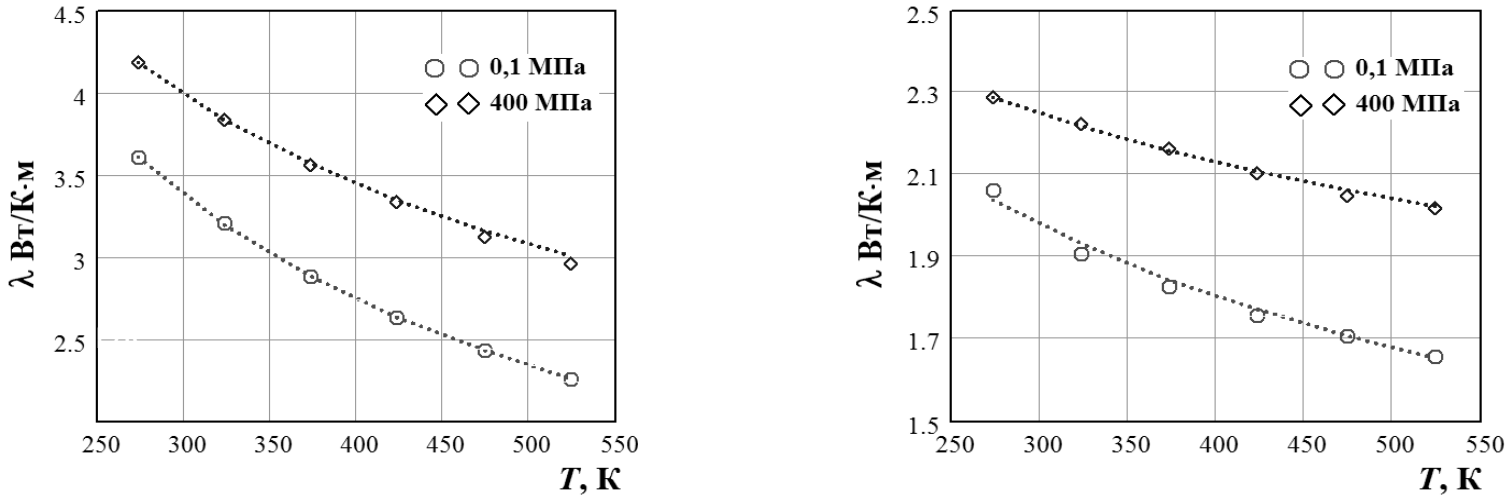


Рис. Температурная зависимость теплопроводности гранита (а) и песчаника (б) при различных давлениях. С экспериментальными точками приведены кривые, полученные в соответствии со степенным законом равенства

$$\lambda(T,P) = \lambda_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{0.132\,\Delta\lambda_P}{\lambda_0}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-\frac{1.54\cdot\Delta\lambda_T}{\lambda_0}} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.65\cdot\ln(\lambda_0/(\lambda_0+\Delta\lambda_P))}$$

$\Delta\lambda_P$ - среднее суммарное приращение теплопроводности при постоянном давлении,

$\Delta\lambda_T$ - среднее суммарное приращение теплопроводности при постоянной температуре,

Согласно работам [1,2,3,4,5] любое, даже незначительное, относительное изменение объёма твёрдого тела под давлением приводит к изменению таких термодинамических параметров как:

- потенциал межатомных взаимодействий;
- сжимаемость и упругие постоянные;
- максимальная частота колебания атомов,

которые показывают, что если фазовые переходы индуцированные температурой составляют не более нескольких процентов, то фазовый переход, индуцированный относительное изменение объёма под давлением, может достигать и даже превышать 50%.

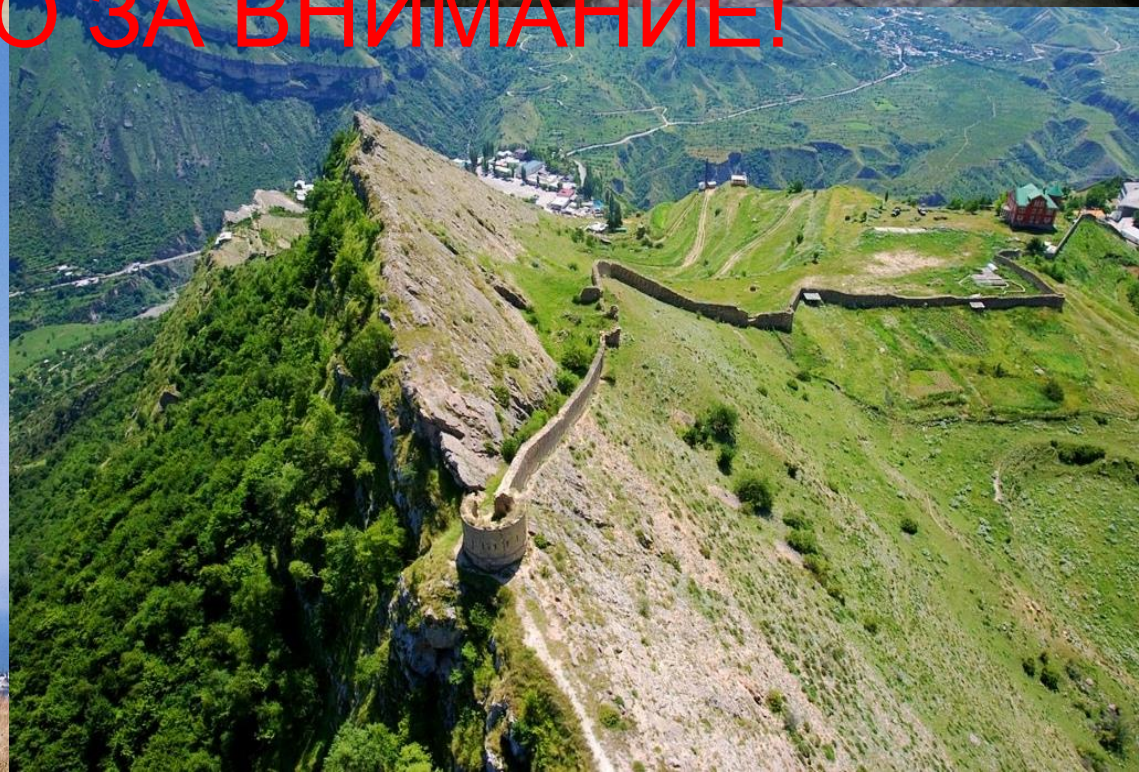
1. Ландау Л. Д. Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М. Наука. 1982. 623 с.
2. Жарков В.Н., Калинин В.А. Уравнения состояния твёрдых тел при высоких давлениях и температурах. М. Наука, 1968. 312 с.
3. Гуфан А.Ю. Феноменологическая теория фазовых переходов, характеризуемых однокомпонентным параметром порядка. Физика твёрдого тела. 2006, Т. 48, № 3, С. 518-522.
4. Наскалова О.В. Феноменологическая теория фазовых переходов под давлением в элементах таблицы Менделеева и простых соединений. Автореф. Канд. Физ. Мат наук. Нальчик. 2012.
5. Гуфан Ю.М. Структурные фазовые переходы. М. Наука. 1982. 302 с.

Заключение

Анализ, существующих в научной литературе экспериментальных данных, по влиянию давления на тепловые свойства и скорость упругих волн показывает, что интенсивный рост этих параметров происходит до давлений P=100 МПа, которое в геофизической литературе, чаще всего объясняется захлопыванием пор в начальной стадии давления.

Ряд авторов, на основании теоретических и экспериментальных литературных данных [1,2,3,4,5], показывают, что ФП 2-го рода, возникающий в твёрдых телах в начальной стадии давления, является обратимым. Отсутствие гистерезиса при повышении и понижении давления при экспериментальных исследованиях теплопроводности и скорости упругих волн отмечено в достаточно большом количестве работ.

Явлению перехода горных пород под давлением из хрупкого в пластическое состояние в геофизической литературе уделено мало внимания, хотя величина и температурная зависимость, как теплопроводности, так и скорости упругих волн носят разный характер. Так, в резюме к работе [6, стр.75] отмечено, что в условиях высоких давлений горные породы характеризуются релаксационными явлениями в виде хрупко-пластических микронарушений структуры минерального вещества.

1985 году в работе [7] была предложена модель литосферы в тектонически-активных областях, которая сложена сравнительно жёсткими пластинами, разделёнными механически ослабленными, легко деформируемыми слоями. Эта модель основана на аномальности физических свойств твёрдых тел при фазовых переходах.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!