

Распределение пор по размерам в континентальной коре: выводы из экспериментальных данных о проницаемости

В. М. Витовтова¹, В. М. Шмонов¹, А. В. Жариков²

¹ Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

vitovt@iem.ac.ru; shmonov@iem.ac.ru

Ключевые слова: континентальная кора, проницаемость, распределение пор по размерам

Ссылка: Витовтова, В. М., В. М. Шмонов, А. В. Жариков (2011), Распределение пор по размерам в континентальной коре: выводы из экспериментальных данных о проницаемости, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6018, doi:10.2205/2011NZ000148.

Структурные характеристики горных пород определяют динамику движения сквозькоровых флюидов, а также вклад поверхностной энергии в термодинамические свойства нанопористых флюидов. Это определяет важность информации о распределении пористости, проницаемости, удельной поверхности и размеров пор пород в разрезе земной коры. Нами экспериментально изучены проницаемости пород при высоких давлениях и температурах. Сведения о проницаемости образцов гранитов, гранодиоритов, диоритов, серпентинитов, гнейсов, амфиболитов, мраморов, известняков и песчаников представлены в нашей монографии [Шмонов и др., 2002]. На основании наших экспериментальных данных мы построили тренд проницаемости континентальной земной коры [Shmonov et al., 2002; Shmonov et al., 2003]. Палеопроницаемость, установленная другими авторами по тепловым потокам [Ingebritsen and Manning, 1999] или метасоматическим и метаморфическим процессам [Manning and Ingebritsen, 1999], хорошо согласуется с нашим трендом. Наши экспериментальные данные о проницаемости пород позволили получить представление о распределении пор по размерам в пределах земной коры.

Измерения проницаемости выполнены методом стационарной газовой (аргон) фильтрации [Шмонов и др., 2002]. При фильтрации газа через пористые среды скорость его зависит от соотношения длины свободного пробега молекул газа, λ , и размера пор, r . Клинкенберг [Klinkenberg, 1941] нашел, что

$$k_g = k_w(1 + b/p), \quad (1)$$

где k_g - проницаемость по газу, k_w - проницаемость по воде, p - среднее давление фильтрующегося газа, b - постоянная для данной пары «газ – пористая среда». Таким образом метод позволяет определять по потоку газа одновременно а) значения проницаемости образца для конденсированного флюида, k_w , б) проницаемость образца для газа, k_g , при различных давлениях фильтрации и в) постоянную, b , характеризующую структуру порового пространства породы. Уравнение (1), преобразованное к виду $k_g = k_w + B/p$ дает значение параметра Клинкенберга в виде $B = k_w b$ позволяющее рассчитать эффективный радиус капилляров цилиндрической формы по уравнению из [Scott and Dullien, 1962] в виде

$$r = 4/3 \pi \bar{v} \mu (k_w / B) \quad (2)$$

где \bar{v} – средняя тепловая скорость движения молекул, μ – динамическая вязкость аргона, k_w – проницаемость, а B – параметр Клинкенберга. В результате обработки первичного материала были получены значения параметра Клинкенберга, B , для различных температур. Значения их в зависимости от проницаемости представлены на рис.1. По уравнению (2) были рассчитаны эффективные радиусы пор для модели пород с серией параллельных цилиндрических капилляров одинакового радиуса. Результаты расчетов приведены в табл 1.

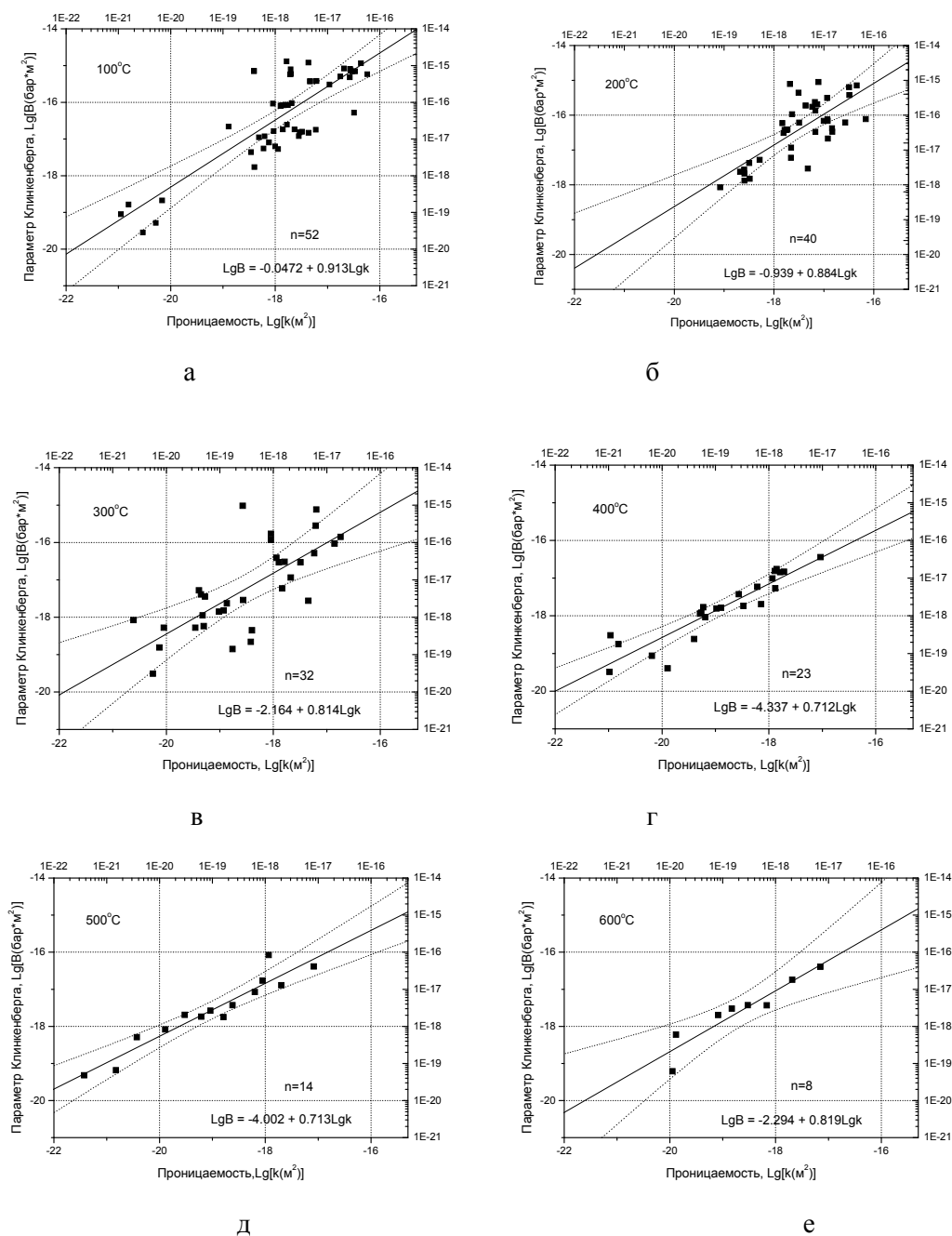


Рис.1 Зависимость параметра Клинкенберга от проницаемости при различных температурах. На каждом графике а) n - количество экспериментальных точек, б) приводятся уравнения линейной регрессии для сплошной линии и в) пунктиром даны верхняя и нижняя границы 99% доверительного интервала.

Таблица №1. Значения эффективного радиуса пор, r(нм), в породах с различной проницаемостью, k_w , при температурах 100–600°C.

k, m^2	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
1×10^{-16}	38	130	205	854	482	543
1×10^{-17}	31	100	133	440	249	358
1×10^{-18}	25	76	87	227	129	236
1×10^{-19}	21	58	57	117	66	156
1×10^{-20}	17	45	37	60	34	103
1×10^{-21}	14	34	24	31	18	68
1×10^{-22}	11	26	16	16	9	45

Проницаемость, k , определяется структурой пористого материала. Размерность проницаемости – квадрат длины, $[L^2]$, что является «грубой мерой среднеквадратичного порового диаметра» [Коллинз, 1964]. Как и следовало ожидать на изотерме уменьшению проницаемости соответствует уменьшение радиуса пор. В ряду постоянных значений проницаемости более высоким значениям температур соответствуют большие размеры пор. Но при одном и том же значении проницаемости «просветность» [Дмитриев, 1995] должна оставаться постоянной. В этом случае можно полагать, что одна и та же проницаемость при более высоких температурах обеспечивается порами большего размера, но количество их должно быть меньше.

В условиях земной коры проницаемость снижается от поверхности земли до границы Мохо по степенному закону [Shmonov et al., 2002] (рис.2). Наши экспериментальные данные о проницаемости пород в работах [Витовтова и Шмонов, 1982; Жариков и др., 1990; Шмонов, 2000; Zharikov et al., 2003] представлены для кратных значений температур: 100, 200, 300, 400, 500 и 600°C. Поэтому при построении тренда сначала по уравнению $H = T/\text{grad}T$, где H – глубина в км, T – в градусах °C, было определено каким глубинам в земной коре соответствует вышеприведенный ряд кратных температур для градиентов 9, 15 и 26°C/км. При $\text{grad}T=9^\circ\text{C}/\text{км}$ экспериментальные данные могут быть использованы для глубин 11.1, 22.2, 33.3 и 44.4 км; при $\text{grad}T=15^\circ\text{C}/\text{км}$ – для глубин 6.7, 13.3, 20.0, 26.7, 33.3, и 40.0 км и для $\text{grad}T = 26^\circ\text{C}/\text{км}$ – 3.8, 7.7, 11.5, 15.4, 19.2 и 23.1 км.

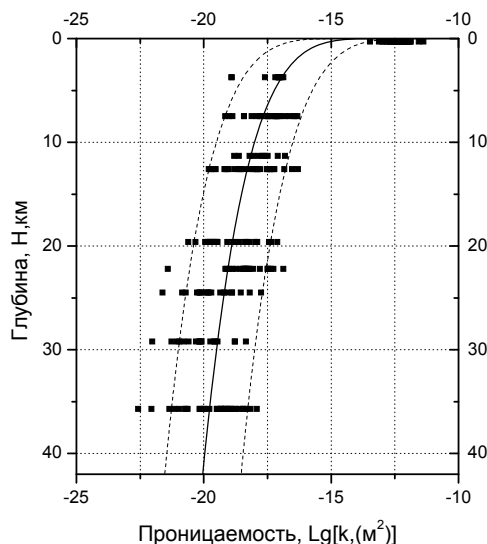


Рис.2. Тренд проницаемости континентальной земной коры построенный по нашим экспериментальным данным.

Ранее нами [Shmonov et al., 2002] было показано, что зависимость $k=f(H)$ может быть представлена степенным уравнением $\log k = a + bH^c$. Для k - H кривой при низких тепловых потоках уравнение имеет вид $\log k = -12.56 - 2.703H^{0.2682}$, при средних тепловых потоках $\log k = -12.55 - 3.124H^{0.2447}$ и $\log k = -12.45 - 4.330H^{0.1360}$ – при высоких тепловых потоках. По этим уравнениям для вышеприведенных глубин были рассчитаны значения проницаемостей.

На следующем этапе в соответствии с уравнениями на графиках рис.1 для значений проницаемости были определены параметры Клинкенберга, V . И по уравнению (2) рассчитаны радиусы пор.

Результат обработки данных показан на рис. 3 а, б и в. На графиках показаны предельные значения радиусов пор рассчитанные в соответствии с диапазоном 99% доверительного интервала значений параметра Клинкенберга и проницаемостей (рис.1). При низких тепловых потоках наблюдается уменьшение радиуса пор с глубиной от 179÷827 нм на уровне 11.1 км до 36÷139 нм на уровне 44.4 км. При средних и высоких тепловых потоках нет явно выраженной зависимости размеров пор от глубины. Возможно это связано с тем, что с увеличением тепловых потоков разуплотнению более пластичных пород препятствует сжимающие давления.

ВИТОВТОВА И ДР.: РАЗМЕРЫ ПОР В КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЕ

В пределах ошибки расчетов по экспериментальным данным о проницаемости средние значения радиусов пор находятся около 100 нм (~ 0.1 мкм), хотя разброс в отдельных случаях может достигать полтора десятичного порядка.

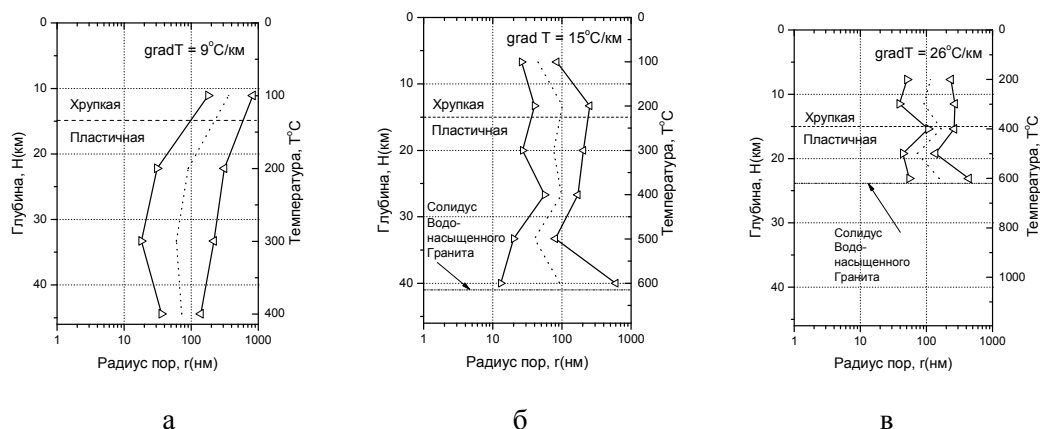


Рис.3 Тренд эффективного радиуса пор пород для разреза континентальной коры при различных термоградиентах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-00778), Программы 4 РАН (Направление 1) и Программы 8 ОНЗ РАН

Литература

Витовтова, В. М., В. М. Шмонов (1982) Проницаемость горных пород при давлениях до 2000 кг/см² и температурах до 600°C, *ДАН СССР. Т.266. №5.* сс.1244-1248.

Дмитриев, Н. М. (1995) Просветность и проницаемость пористых сред с периодической микроструктурой, *Изв. РАН. МЖГ. №1.* сс.79-85.

Жариков, А. В., В. М. Витовтова, В.М. Шмонов (1990) Экспериментальное исследование проницаемости архейских пород Кольской сверхглубокой скважины, *Геология рудных месторождений. 1990. №6.* сс.79-88.

Коллинз, Р. (1964) *Течение жидкостей через пористые материалы, М.Мир,* 350 с.

Шмонов, В. М. (2000) Проницаемость пород и плотность флюида в высокотемпературных геохимических процессах. Экспериментальные исследования, *Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. М.: ГЕОХИ РАН им. В.И.Вернадского,* 48 с.

Шмонов, В. М., В. М. Витовтова, А. В. Жариков (2002), *Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный Мир,* 216 с.

Ingebritsen, S. E., C. E. Manning (1999) Geological implications of permeability-depth curve for the continental crust, *Geology, V.27. No.12.* pp.1107-1110.

Klinkenberg, L. J. (1941) The permeability of porous media to liquids and gases, *Amer. Petroleum Inst. Drilling and Production Practice,* pp.200-211.

Manning, C. E., S. E. Ingebritsen (1999) Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems, *Rev. Geophysics.V.37. No1.* pp.127-150.

Shmonov, V. M., V. M. Vitovtova, A. V. Zharikov, A. A. Grafchikov (2002) Fluid permeability of the continental crust: Estimation from experimental data, *Geochemistry International, Vol. 40, Suppl.* pp. S3-S13.

Shmonov, V. M. V. M. Vitovtova, A. V. Zharikov, A.A. Grafchikov (2003) Permeability of the continental crust: implications of experimental data, *Journal of Geochemical Exploration, 78-79,* pp.697-699.

Scott, D. S., F. A. L. Dullien (1962) The flow of rarefied gases, *Amer. Inst. Chem. Eng. J., V.8, №3,* pp.293-297.

Zharikov, A. V., V. M. Vitovtova, V. M. Shmonov, A. A. Grafchikov (2003) Permeability of the rocks from the Kola superdeep borehole at high temperature and pressure: implication to fluid dynamics in the continental crust, *Tectonophysics, 370,* pp.177-191.