

Проницаемость, структура порового пространства и динамика движения природных и техногенных флюидов в кристаллических породах (по экспериментальным данным)

А. В. Жариков^{1,2}, В. М. Шмонов², В. М. Витовтова²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
vil@igem.ru, факс: +7(499)9511587, тел.: +7(499)2308440

² Институт экспериментальной минералогии РАН, Черногловка

Ключевые слова: проницаемость, пористость, температура, давление, земная кора

Ссылка: Жариков, А. В., В. М. Шмонов, В. М. Витовтова (2011), Проницаемость, структура порового пространства и динамика движения природных и техногенных флюидов в кристаллических породах (по экспериментальным данным), *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6029, doi:10.2205/2011NZ000159.

Проницаемость горных пород является одним из основных параметров, определяющих динамику движения природных и техногенных флюидов в геологической среде. Поэтому для решения многих важных задач геологии и геоэкологии необходимо оценить как современную, так и палеопроницаемость горных пород. Сложность состоит в том, что не существует дистанционных методов для непосредственного определения проницаемости глубинных пород в естественном залегании. Однако, проницаемость горных пород, в том числе и при высоких температурах и давлениях, соответствующих условиям глубинных зон континентальной коры и ближней зоны могильников высокорadioактивных отходов (ВАО) *in situ*, а также условиям функционирования палеогидротермальных систем может быть измерена на образцах. При этом очень важна интерпретация: корректный перенос результатов, полученных на образцах на геологические объекты и процессы. Основная сложность состоит в том, что универсальные правила перехода от масштаба образца к масштабу геологического объекта отсутствуют.

В такой ситуации можно предложить следующий путь исследований:

- Определение основных закономерностей изменения проницаемости при высоких *PT* по результатам измерений на образцах.
- Выявление основных причин и механизмов изменения параметра путем сопоставления полученных результатов с данными микроструктурных исследований и численного моделирования.
- В тех случаях, когда проницаемость геологической среды, может быть близка к матричной проницаемости пород, численная оценка проницаемости среды *in situ* по данным измерений на образцах.
- Использование данных физического эксперимента (измерений на образцах) в качестве входных данных для численного (моделирования флюидных потоков в геологической среде).

Тематическая группа ИЭМ РАН во главе с В.М. Шмоновым проводит исследования проницаемости более 20 лет. За это время получен беспрецедентный объем экспериментальных данных: при высоких температурах и давлениях исследовано более 50 образцов плотных, низкопористых (0.05 – 10 %) пород, представляющих основные литологических типы континентальной коры (>2000 определений), что позволило выявить основные закономерности изменения проницаемости при высоких *PT*-параметрах [Шмонов и др., 2002].

Увеличение эффективного давления при постоянной температуре приводит к уменьшению проницаемости.

Увеличение температуры при постоянном эффективном давлении приводит либо к монотонному увеличению (рис. 1 а) или уменьшению (рис. 1 б) проницаемости во всем диапазоне температур, либо к появлению инверсий на температурных трендах: проницаемость уменьшается, достигает минимального значения, затем увеличивается (рис. 1 в, г). Следует отметить, что тренды проницаемости часто осложнены резкими, пороговыми переходами.

Сопоставление полученных данных с результатами микроструктурных исследований под оптическим и электронным микроскопом, а также с результатами численного моделирования показало, что такой характер *PT*-трендов проницаемости кристаллических пород определяется

изменениями структуры их порового пространства: в первую очередь изменениями микротрещиноватости.

Микротрещины разной геометрии по-разному ведут себя при нагревании. При увеличении температуры количество, раскрытие и связанность у микротрещин с высоким коэффициентом формы увеличиваются, у микротрещин с низким коэффициентом формы - уменьшаются. В условиях одновременного воздействия высоких температур и давлений эти процессы происходят параллельно, поэтому на температурных трендах проницаемости могут возникать инверсии.

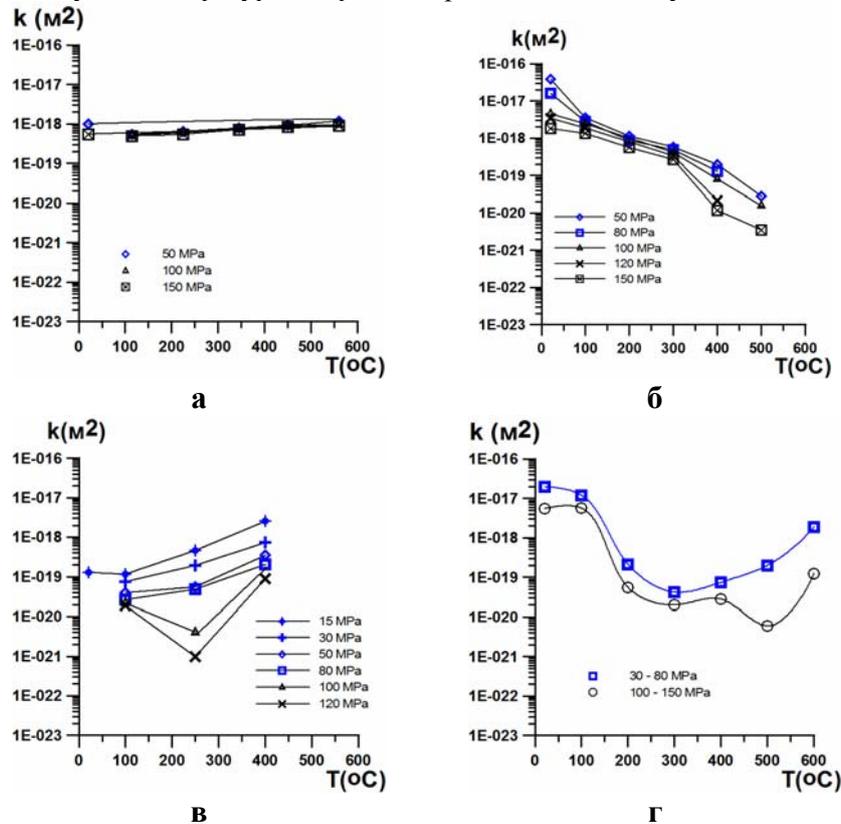


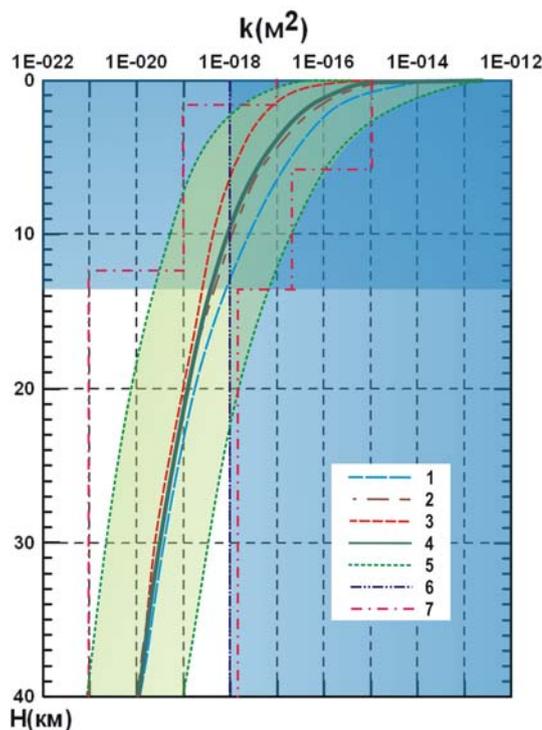
Рис. 1. Температурные зависимости проницаемости. $P_{эфф} = const$.
 а – мрамор, обр. 1, б – гранодиорит, обр. 82066, в – гранит, обр. 2.,
 г- амфиболит, обр. 43639.

Основным фактором, определяющим проницаемость, пород является степень связанности флюидопроводящих кластеров (микротрещин и пор). Даже небольшое изменение количества микротрещин, их длины или раскрытия может привести к резкому изменению проницаемости. Поэтому зависимости проницаемости от температуры и давления часто осложнены пороговыми переходами.

Важным фактором является наличие систем микротрещин, ориентированных в соответствии с элементами текстуры пород (например, вдоль сланцеватости, флюидалности и др.). Такие системы являются устойчивыми флюидопроводящими кластерами.

В результате статистической обработки экспериментальных данных, получена обобщенная зависимость проницаемости пород континентальной коры от глубины (рис. 2). Установлено, что проницаемость (k , m^2) уменьшается с глубиной (h , км) согласно степенному закону $lgk = -12.56 - 3.225h^{0.223}$. Область в границах 90 % доверительного интервала, весьма широка, что показывает, как велики возможные вариации параметра. Поэтому, очевидно, уместней говорить не о конкретных значениях проницаемости на различных глубинах, а об общей тенденции уменьшения проницаемости пород континентальной коры с глубиной. Показательно, что кривые, полученные для различных градиентов температур, и обобщенный тренд хорошо согласуются между собой, приходя в области больших глубин к асимптотическому значению около $10^{-20} m^2$. Такие оценки проницаемости согласуются с полученными по результатам анализа региональных потоков грунтовых вод и теплопереноса, а также исследований активных метаморфических систем [Manning u Ingebritsen, 1999]. Показательно также, что породы с проницаемостью, превышающей $10^{-18} m^2$ – минимальное

значение по Д.Нортону (1979) для функционирования гидротермальных систем могут, по нашим данным, залегать до глубин 10-13 км.



1. тренд для температурного градиента 9°C/км,
2. тренд для температурного градиента 15°C/км,
3. тренд для температурного градиента 26°C/км,
4. обобщенный тренд,
5. границы доверительного интервала 90%,
6. проницаемость 10^{-18} м^2 (по Д.Нортону (1979) минимальное значение для гидротермальных процессов),
7. проницаемость по данным геофизических исследований.

Рис.2. Зависимость проницаемости пород континентальной коры от глубины.

Главной задачей экспериментальных исследований фильтрационных свойств образцов пород из участков, где предполагается подземное захоронение ВАО: метавулканитов из района ПО Маяк и гранитоидов из района Красноярского горно-химического комбината, являлось изучение матричной проницаемости пород ближней зоны могильника ВАО, определение минимальных размеров монолитных блоков этих пород, обеспечивающих безопасное захоронение ВАО, а также прогноз возможного изменения параметра при разогреве вследствие тепловыделения ВАО.

Специфика ПО Маяк заключается в том, что полигон для захоронения ВАО, а это – более 2000 т отвержденных отходов суммарной активностью около $3 \cdot 10^8$ Ки, должен располагаться в санитарно-защитной зоне предприятия. В пределах этой зоны выделены два участка, размеры которых позволяют расположить там скважинные могильники ВАО. Результаты измерений эффективной пористости и проницаемости наиболее представительных образцов из разрезов скважин, пробуренных на этих участках показывают, что вне зон дислокаций метавулканиты представляют собой массивные породы, с низкими значениями пористости (среднее значение – 0.26 %) и проницаемости (среднее значение - $1.92 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$).

Результаты измерений эффективной пористости и проницаемости образцов основных литологических разновидностей пород из керна скважин, пробуренных в Нижнеканском гранитоидном массиве, в районе Красноярского ГХК, где также предполагается размещение могильников или хранилищ ВАО показывают, что среднее значение пористости по обоим участкам - 0.44 %. Среднее значение проницаемости - $1.30 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$.

Таким образом, как для метавулканитов, так и для гранитоидов характерны низкие значения пористости. Средние значения параметра близки. В то же время, среднее значение проницаемости гранитоидов на порядок выше, чем метавулканитов. Такое отличие вызвано разным характером порового пространства пород: в гранитоидах, которые по В.И.Старостину (1988) принадлежат к хрупко-малопрочному петрофизическому типу, сильнее развита микротрещиноватость, чем в метавулканитах вязко-прочного типа. Однако, величины проницаемости и метавулканитов, и гранитоидов являются достаточно низкими, чтобы признать эти породы благоприятной средой для размещения могильников ВАО и в том случае, если они будут размещены в монолитных блоках достаточной мощности.

С тем, чтобы оценить мощность монолитных пород, необходимую для захоронения ВАО было проведено численное моделирование термоконвективного выноса радионуклидов из могильника подземными водами, что позволило по концентрации ^{90}Sr определить безопасную глубину размещения отходов в зависимости от проницаемости вмещающих пород. В качестве входных данных для модели были использованы результаты определений проницаемости на образцах.

С целью реконструкции функционирования палеогидротермальной рудообразующей системы были проведены экспериментальные исследования фильтрационных свойств основных типов пород Стрельцовского рудного поля. Полученные результаты показали, что контрастные различия фильтрационных свойств исследованных пород вызваны особенностями структуры их порового пространства. Показательно, что, как и в случае метавулканитов и гранитоидов, обсуждавшихся выше, отсутствует корреляция между пористостью и проницаемостью пород.

Установлено, что рудовмещающий дацит обладает наибольшими значениями и пористости, и проницаемости. Для этой породы характерны также наибольшие значения анизотропии проницаемости, которые в некоторых образцах достигают двух десятичных порядков. Следует отметить, что, если, моделируя восходящее движение флюида от глубинного источника, рассматривать наименьшие значения проницаемости, которые получены нормально флюидалности породы, то и в этом случае ее величина значительно выше, чем у базальта и гранита. Пористость базальта в несколько раз больше, чем гранита, а проницаемость, напротив, значительно меньше.

В ходе микроструктурных исследований установлено, что и даците пористость представлена как микротрещинами, так и изометричными порами. Причем, и те и другие приурочены к флюидалности пород, определяя появление анизотропии проницаемости. Этот фактор, очевидно, оказывал существенное влияние на характер движения флюидов в вулканогенных породах чехла кальдеры. Численное моделирование с использованием полученных экспериментальных данных показало наличие характерного излома линий тока флюида, обусловленного анизотропией пород. Более высокие значения пористости базальта вызваны наличием в породе значительного числа изометричных пор. Однако, в ходе исследований под сканирующим электронным микроскопом установлено, что доля «тупиковых» пор, через которые не происходит движения флюидов, составляет около половины объема порового пространства базальта, определяя низкую проницаемость породы. Пористость гранита определяется микротрещинами, которые пересекаясь образуют связанные кластеры, вследствие чего проницаемость гранита выше, чем базальта.

В ходе исследований проницаемости при высоких температурах и давлениях, отвечающих условиям функционирования древней гидротермальной системы в Стрельцовской кальдере, установлено, что увеличение давления приводит к монотонному снижению проницаемости всех исследованных образцов. Увеличение температуры, напротив, приводит к монотонному возрастанию проницаемости всех образцов. Показательно, что при всех PT сохраняется соотношение между величинами проницаемости, характерное для исходных образцов: проницаемость гранита сопоставима с проницаемостью дацита нормально к флюидалности, а проницаемость дацита параллельно флюидалности значительно выше.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования проницаемости основных типов кристаллических пород при PT -параметрах, отвечающих условиям глубинных зон земной коры и ближней зоны могильников ВАО *in situ*, а также палеогидротермальных систем.

Установлено, что проницаемость пород и характер PT -трендов определяется изменениями структуры их порового пространства: в первую очередь параметрами микротрещиноватости.

Использование результатов физического эксперимента в качестве входных данных для численного позволило определить безопасные глубины скважинных могильников ВАО и характер движения флюидов в гидротермальной рудообразующей системе Стрельцовского рудного поля.

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

Литература

Шмонов В. М., В. М. Витовтова, А. В. Жариков (2002), *Флюидная проницаемость пород земной коры*, Научный мир, Москва.

Старостин В. И. (1988) *Палеотектонические режимы и механизмы формирования структур рудных месторождений*. Недра Москва.

Manning C. E., S. E. Ingebritsen (1999), Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems, *Rev. Geophysics.*, 37, № 1, pp. 127-150.

Norton D. (1979), Transport phenomena in hydrothermal system: the redistribution of chemical components around cooling magmas, *Bull.Mineral.*, 102, № 5/6. pp. 689-716.