

Транспортные свойства кристаллических пород: следствия для подземного захоронения радиоактивных отходов

А. В. Жариков^{1,2}, В. И. Величкин¹, В. М. Витовтова², В. И. Мальковский¹, В. М. Шмонов²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва,

²Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

vil@igem.ru

Рассмотрены результаты исследований фильтрационных свойств кристаллических пород, интерпретации и применения полученных результатов с целью выбора участков для безопасного подземного захоронения или хранения ВАО и ОЯТ на основе данных физического и численного экспериментов. Для лабораторных исследований использованы образцы основных типов пород из мест вероятного подземного захоронения ВАО: метавулканыты из района ПО Маяк и гранитоиды Нижнеканского массива из района Красноярского ГХК. На основе сопоставительного анализа полученных экспериментальных данных и результатов микроструктурных исследований выявлены факторы, определяющие фильтрационные свойства пород. Сделан прогноз возможного изменения их проницаемости при нагревании вследствие тепловыделения ВАО. Показано, как с использованием результатов физического эксперимента в качестве исходных данных для численного определить мощности монолитных блоков пород, достаточные для безопасного размещения могильников ВАО.

Ключевые слова: пористость и проницаемость горных пород, численное и физическое моделирование, скважинные могильники ВАО

Ссылка: Жариков А. В., В. И. Величкин, В. М. Витовтова, В. И. Мальковский, В. М. Шмонов (2012), Транспортные свойства кристаллических пород: следствия для подземного захоронения радиоактивных отходов, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG.

Главное требование, предъявляемое к участку, выбранному для подземного захоронения или хранения ВАО и ОЯТ, заключается в минимизации риска, связанного с выносом радионуклидов потоком подземных вод в биосферу. В этой связи очевидна актуальность исследования фильтрационных свойств пород и, в первую очередь, их проницаемости - одного из основных факторов, определяющих динамику движения как природных, так и техногенных флюидов в геологической среде. Так как величины проницаемости плотных, малопористых кристаллических пород ближней зоны могильников или хранилищ ВАО и ОЯТ, как правило, очень малы, их определение связано с серьезными трудностями. Поэтому авторами была разработана специальная методика лабораторных исследований проницаемости, учитывающая особенности характера течения газа через плотные, малопористые кристаллические породы. Определения проводятся с учетом изменения свойств фильтрующегося газа в зависимости от температуры и давления, что позволяет проводить высокоточные измерения в широком диапазоне значений (10^{-22} – 10^{-15} м²) как при нормальных, так и при высоких *PT*-параметрах [Мальковский и др., 2009] и по данным единственного опыта определять как значение проницаемости образца, так и параметра Клинкенберга, характеризующего поровое пространство породы. По сравнению с традиционными методами, увеличена точность измерений, уменьшена их трудоемкость, упрощена регистрация параметров.

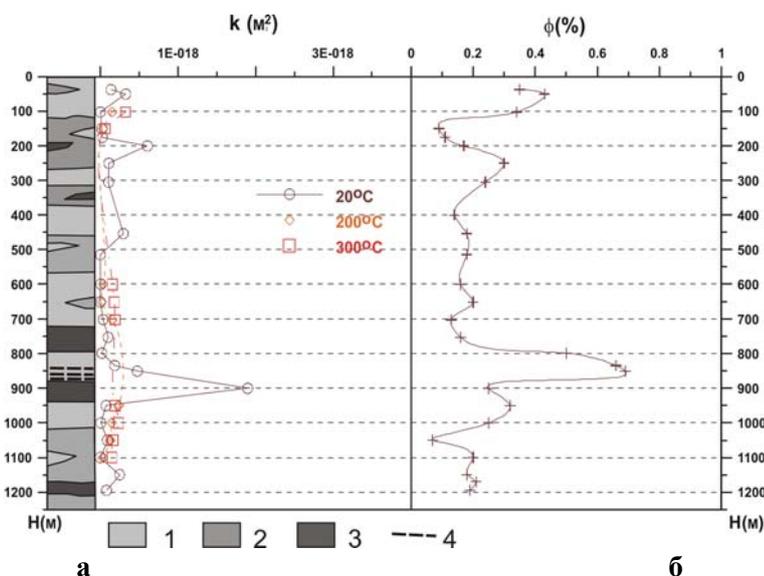


Рис. 1. Проницаемость (а) и пористость (б) образцов, отобранных в скважинах 8001 и 8002, пробуренных на участке Марс-2, ПО Маяк.
1 – туфы, туфолавы; 2 – лавобрекчии, 3 – порфириновые андезитово-базальты, 4 – рассланцованные породы.

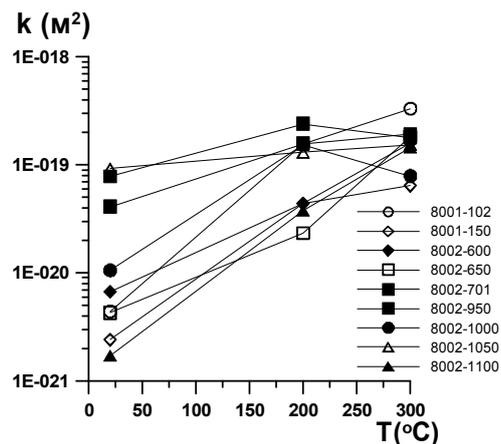


Рис. 2. Зависимости проницаемости образцов из скважин 8001 и 8002 участка Марс-2, ПО Маяк от температуры. $P_{эфф} = \text{const} = 25 \text{ МПа}$.

С применением новой техники проведены исследования фильтрационных свойств образцов основных типов пород из мест вероятного размещения могильников или хранилищ ВАО и ОЯТ: метавулканитов из района ПО Маяк (Южный Урал) и гранитоидов Нижнеканского массива из района Красноярского ГХК (Енисейский край) (рис. 1–4).

Полученные результаты показывают, что вне зон дислокаций метавулканиты обладают низкими значениями пористости и проницаемости. Значения пористости образцов изменяются от 0.07 до 0.69 %, среднее – 0.26 %. Для большинства исследованных образцов характерны также очень низкие значения проницаемости: ее величина для 17 образцов из 27 не превышает 10^{-19} м^2 , а среднее значение для всей выборки составляет $1.92 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$. Показательно, что «фоновые» значения проницаемости даже с учетом их возрастания вследствие нагревания значительно ниже, чем у образца, отобранного на фланге зоны рассланцевания в стандартных условиях (рис. 1, 2). Таким образом, наличие связанных систем ориентированных микротрещин, приуроченных к текстуре породы, в данном случае к сланцеватости, очевидно, – более опасный фактор, уменьшающий изоляционные свойства пород ближней зоны могильника ВАО, чем терморазуплотнение.

Значения эффективной пористости образцов гранитоидов также достаточно низкие: 0.14 – 0.95 %. (рис. 2. б). Средние значения по участкам близки между собой и составляют 0.44 % для участка Итатский и 0.37 % для участка Каменный, по обоим – 0.41 %.

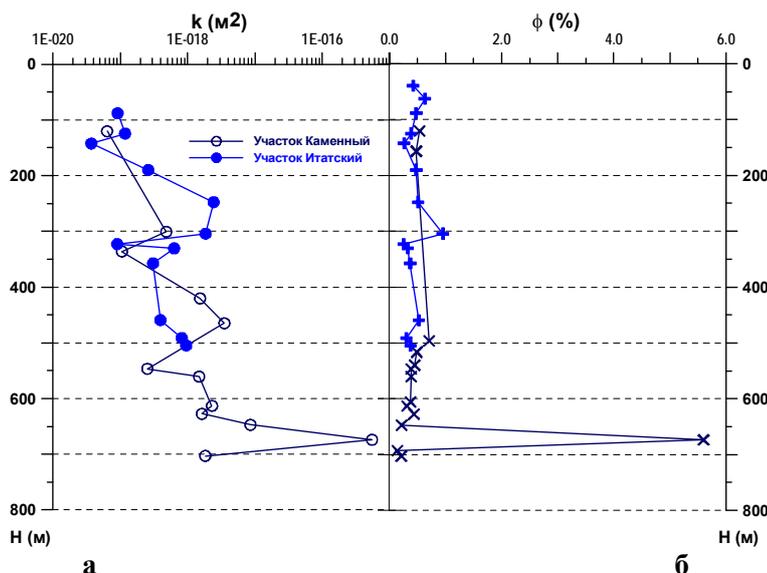


Рис. 3. Проницаемость (а) и пористость (б) образцов, отобранных в скважинах ИИ-500 и 1К-700, пробуренных на участках Итатский и Каменный, Красноярский ГХК.

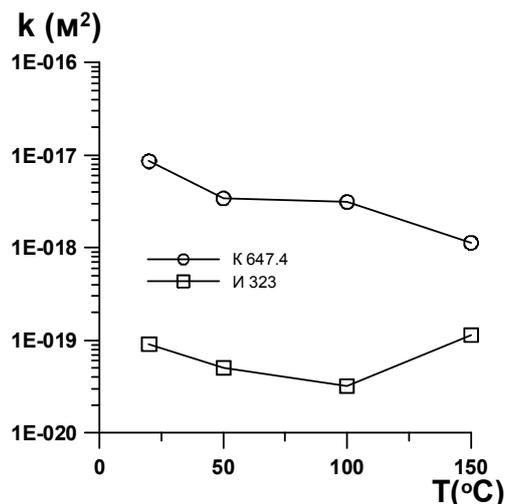


Рис. 4. Зависимости проницаемости образцов Нижнеканского массива от температуры. $P_{эфф} = \text{const} = 25 \text{ МПа}$.

Проницаемость подавляющего числа исследованных образцов гранитоидов варьирует от $3.71 \cdot 10^{-20}$ до $8.59 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$. Среднее значение по обоим участкам составляет $1.30 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$. Сопоставление данных по участкам Итатский и Каменный показывает, что средняя проницаемость образцов из первого составляет $6.67 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$, что превышает более чем в 3 раза среднее значение проницаемости образцов с участка Марс-2, ПО Маяк ($1.92 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$). Средняя проницаемость образцов участка Каменный еще выше: на десятичный порядок и составляет $1.98 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$, здесь же отмечаются большие вариации параметра. Для обеих скважин характерно увеличение проницаемости с глубиной (рис. 3 а).

Таким образом, средние значения пористости образцов метавулканитов участка Марс-2 и гранитоидов участков Итатский и Каменный очень близки (разница составляет всего 0.1 %). В тоже время средняя проницаемость гранитоидов значительно (на десятичный порядок) выше, чем метавулканитов. В [Petrov et al., 2005 а, б] показано, что в ходе геологической истории как метавулканиты, так и гранитоиды подверглись многочисленным преобразованиям, которые часто приводили к образованию вторичной пористости. Однако для гранитоидов характерна более высокая интенсивность таких преобразований. Результаты микроструктурных исследований показали, что проницаемость кристаллических пород со столь низкой пористостью обеспечивается микротрещинами [Zharikov et al., 1993]. При этом интенсивность развития микротрещин в гранитоидах, принадлежащих к хрупко-малопрочному петрофизическому типу сред структурообразования, значительно выше, чем в метавулканитах, которые принадлежат к вязко-прочному типу [Лаверов, и др., 2001, Старостин, 1988]. Как следствие, средняя проницаемость гранитоидов значительно выше, чем проницаемость метавулканитов. Однако такие величины проницаемости являются достаточно низкими, чтобы признать оба типа рассматриваемых пород благоприятной средой для размещения могильников или хранилищ ВАО и ОЯТ в том случае, если сооружения будут размещены в блоках массивных пород, достаточной мощности.

Поведение проницаемости при увеличении температуры (рис. 2, 4) также определяется особенностями микроструктуры пород. В метавулканитах, где в исходных образцах микротрещиноватость развита не столь интенсивно, образование микротрещин на границах минеральных зерен приводит к увеличению проницаемости пород. В исходных образцах гранитоидов, напротив, распространены микротрещины значительных раскрытий и длины. Такие микротрещины не являются устойчивыми, поэтому нагревание на начальном этапе может приводить к уменьшению проницаемости пород. Дальнейшее увеличение температуры может привести к уменьшению проницаемости во всем диапазоне температур, либо к появлению инверсий на температурных трендах: уменьшение проницаемости может смениться ее увеличением. Следует отметить, что даже в условиях, при которых значения параметра минимальны и близки к матричной проницаемости пород, в анизотропных породах со слоистой структурой могут сохраняться

устойчивые пути движения флюидов на микроуровне: по ориентированным микротрещинам вдоль сланцеватости пород.

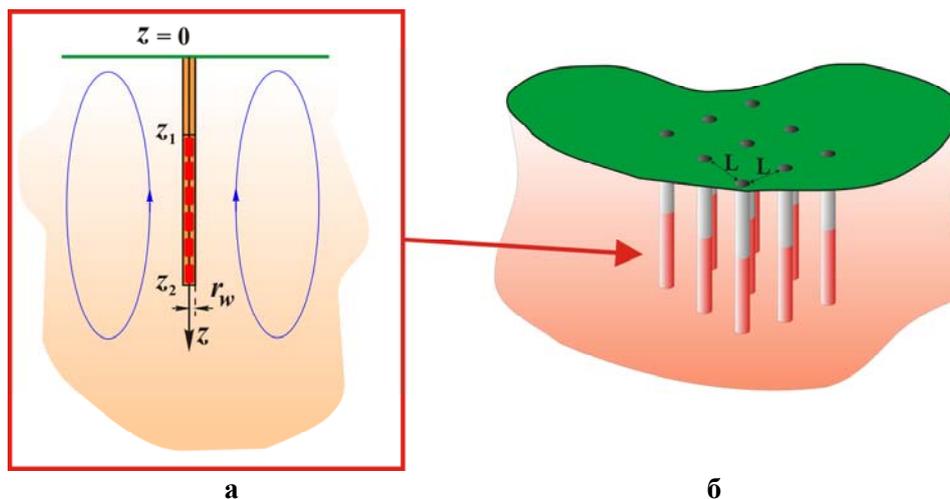


Рис.5. Модели скважинного могильника ВАО, представленного одиночной (а) и группой скважин (б).

С тем, чтобы определить размеры блоков монолитных пород, которые обеспечат безопасное захоронение ВАО и ОЯТ, были применены методы численного моделирования свободной тепловой конвекции подземных вод, возникающей в массиве горных пород, вмещающем могильник. Теоретические основы использованной методики подробно изложены в [Malkovsky et al., 1998], где рассмотрена модель могильника, представленного одиночной вертикальной скважиной, в нижней части которой размещены контейнеры с тепловыделяющими радиоактивными отходами (рис. 5 а). Задача моделирования заключалась в расчете выноса подземными водами из могильника в биосферу одного из наиболее опасных для человека радионуклидов - ^{90}Sr . Были проведены расчеты концентрации ^{90}Sr в приповерхностных подземных водах с учетом глубины могильника, его геометрии, пористости и проницаемости вмещающих пород, теплофизических свойств пород и воды, а также тепловыделения ВАО. Безопасной полагалась такая глубина подземного могильника (расстояние между загруженной частью скважины и поверхностью земли – z_1 , см. рис. 5 а), при которой максимальная массовая концентрация ^{90}Sr в подземных водах у поверхности земли не превышает предельно допустимое значение. Ключевые параметры подземной среды определялись по их значениям, характерным для слаботрециноватых кристаллических пород, слагающих разрезы участков Итатский и Каменный Нижнеканского массива [Petrov et al., 2005 а]. Таким образом, результаты физического моделирования служили входными данными для численного. Применение компьютерного моделирования дало возможность оценить и горизонтальные размеры, ненарушенных блоков пород, достаточные для безопасного захоронения ВАО [Мальковский и Пэк, 2007]. Оценки основаны на моделировании термоконвективного выноса радионуклидов как для одиночной скважины, так и для группы скважин, в нижней части которых размещаются ВАО в зависимости от физических свойств вмещающих пород и ВАО, а также параметров загрузки скважин отходами. Таким образом, удалось определить не только безопасные горизонтальные размеры монолитного блока пород в случае одиночной скважины, но и безопасные расстояния между скважинами (L , см. рис. 5 б).

Заключение

Рассмотрены результаты исследований фильтрационных свойств кристаллических пород, интерпретации и применения полученных результатов с целью выбора участков для безопасного подземного захоронения или хранения ВАО и ОЯТ на основе данных физического и численного экспериментов. Для лабораторных исследований использованы образцы основных типов пород из мест вероятного подземного захоронения ВАО: метавулканиты из района ПО Маяк и гранитоиды Нижнеканского массива из района Красноярского ГХК. На основе сопоставительного анализа полученных экспериментальных данных и результатов микроструктурных исследований выявлены

ЖАРИКОВ И ДР.: ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА

факторы, определяющие фильтрационные свойства пород. Сделан прогноз возможного изменения их проницаемости при нагревании вследствие тепловыделения ВАО. Использование результатов физического эксперимента в качестве исходных данных для численного позволило определить мощности монолитных блоков пород, достаточные для безопасного размещения могильников ВАО.

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

Литература

Лаверов, Н. П., В. И. Величкин, Б. И. Омеляненко (2001). Изоляционные свойства кристаллических пород в связи с проблемой захоронения высокорadioактивных отходов, *Геология рудных месторождений*, т. 43, № 1, сс. 6–23.

Мальковский, В. И., А. В. Жариков, В. М. Шмонов (2009), Новые методы измерения проницаемости образцов горных пород для однофазного флюида, *Физика Земли*, № 2, сс. 3–14.

Мальковский, В. И., А. А. Пэк (2007), Оценка плотности загрузки подземных скважинных хранилищ твердых высокорadioактивных отходов, *Геология рудных месторождений*, № 3, сс. 218–226.

Старостин, В. И. (1988), *Палеотектонические режимы и механизмы формирования структур рудных месторождений*, М.: Недра, 256 с.

Malkovsky, V. I., A. A. Pek, C. F. Tsang (1998), A new formulation of convective transfer for simulation of mass transport with large concentration variations, *Proc. 4th Int. Conf. "IAMG'98" V.1. - Napoli: De Frede Editore*, pp. 304–308.

Petrov, V. A., V. V. Poluektov, A. V. Zharikov, et al., (2005a). Microstructure, filtration, elastic and thermal properties of granite rock samples: implication for HLW disposal, *Petrophysical properties of crystalline rocks, Geological Society of London, Special publications, Ed. by Harvey P.K., Brewer T.S., Pezard P.A. & Petrov V.A.*, v. 240, pp. 237–253.

Petrov, V. A., V. V. Poluektov, A. V. Zharikov, et al., (2005b). Deformation of metavolcanics in the Karachay Lake area, Southern Urals: petrophysical and mineral-chemical aspects, *Petrophysical properties of crystalline rocks, Geological Society of London, Special publications, Ed. by Harvey P.K., Brewer T.S., Pezard P.A. & Petrov V.A.*, v. 240, pp. 307–321.

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*, v. 370, № 1–4, pp. 177–191.