

**В.М. Шмонов, В.М. Витовтова**

**ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД  
И ПЛОТНОСТЬ ФЛЮИДОВ  
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ  
(экспериментальные исследования)**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ

**В.М. Шмонов, В.М. Витовтова**

**ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД  
И ПЛОТНОСТЬ ФЛЮИДОВ  
В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ  
(ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)**

Москва  
Научный мир  
2017

УДК 550.85:550.89:550.311

Ш74

ББК 26.31

**Шмонов В.М., Витовтова В.М. Проницаемость пород и плотность флюидов в высокотемпературных геохимических процессах (экспериментальные исследования).** – М.: Научный мир, 2017. – 296 с., табл. 35, 123 илл.

ISBN 978-5-91522-444-4

Предлагаемая работа является итогом результатов многолетних систематических экспериментальных исследований авторов в области проницаемости основных типов пород земной коры и плотности флюидов при температурах до 600°C и эффективных давлениях до 200 МПа. Представлены исследования микроструктуры пород под сканирующим электронным микроскопом при температурах до 500°C и давлениях до 100 МПа. Диапазон исследований PVT-свойств флюида составляет для CO<sub>2</sub> до 1000 МПа и 800°C, для бинарной смеси H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> – до 500 МПа и 600°C и для системы H<sub>2</sub>O-CH<sub>4</sub> до 200 МПа и 425°C. Установлены закономерности изменения проницаемости пород и плотности флюида в интервале P-T-параметров континентальной земной коры. Показано влияние свободной поверхностной энергии (СПЭ) на поверхности раздела минерал–порода и длины свободного пробега молекул на флюидный поток для гидротермальных условий. По соотношению длин свободных пробегов молекул экспериментально получены константы Клинкенберга для аргона, воды, углекислого газа и метана в интервале температур 20–600°C и давлений от 15 до 200 МПа. Даны примеры применения накопленного экспериментального материала при решении задач, связанных с проницаемостью и флюидным режимом глубинных зон континентальной и океанической коры, с фильтрацией растворов при формировании месторождений, связанных с гранитоидными интрузиями, а также с взаимодействием раствор–порода в техногенных процессах. Монография является обобщением обширного экспериментального материала, накопленного авторами и изложенного ранее в их диссертациях и многочисленных публикациях.

Книга рассчитана на широкий круг геологов и геоэкологов, занимающихся проблемами транспорта гидротермальных растворов, флюидного режима и современного состояния земной коры. Книга может быть полезна аспирантам и студентам геологических специальностей.

ISBN 978-5-91522-444-4

© Шмонов В.М., Витовтова В.М., 2017

© Научный мир, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>8</b>
<b><i>РАЗДЕЛ I ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ</i></b> .....	<b>12</b>
<b>Глава I.1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ</b> .....	<b>12</b>
<b>Обзор экспериментальных работ</b> .....	<b>13</b>
<b>Понятия и определения проницаемости</b> .....	<b>14</b>
Уравнение Дарси .....	14
Единицы измерения проницаемости.....	15
Физический смысл проницаемости.....	15
Жидкостная и газовая проницаемость .....	16
Флюидное и литостатическое давление (соотношение Терцаги).....	17
<b>Глава I.2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД</b> .....	<b>19</b>
<b>Исследование проницаемости пород</b> .....	<b>19</b>
Метод стационарного потока .....	19
Метод затухания импульса .....	21
Метод синусоидальной осцилляции порового давления .....	22
Экспериментальная аппаратура.....	24
Описание экспериментальной установки .....	24
Подготовка и проведение эксперимента .....	26
Погрешность экспериментальных данных .....	27
Уплотнение керна металлической трубкой.....	28
Масштабный эффект.....	33

Сопоставимость данных по воде и газу.....	38
Влияние процесса «растворение–переотложение» на проницаемость пород.....	39
<b>Исследование микроструктуры пород.....</b>	<b>40</b>
Исследования под оптическим микроскопом.....	40
Исследования под сканирующим электронным микроскопом.....	41
Ячейка для ненагруженного образца.....	42
Ячейка для нагруженного образца .....	42
Подготовка и проведение эксперимента.....	43
Обработка первичного материала.....	46
Измерение давления.....	49
Измерение температуры.....	50
<b>Глава 1.3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ .....</b>	<b>53</b>
<b>Магматические породы .....</b>	<b>80</b>
Проницаемость гранитов.....	80
Проницаемость гранодиоритов и диоритов .....	81
Проницаемость базальтов .....	89
<b>Метаморфические породы.....</b>	<b>90</b>
Проницаемость гнейсов .....	90
Проницаемость амфиболитов .....	90
Проницаемость серпентинитов .....	91
Проницаемость мраморов .....	91
<b>Осадочные породы .....</b>	<b>92</b>
Проницаемость песчаников .....	92
Проницаемость известняков .....	93
Проницаемость доломитов.....	93
Проницаемость туфоалевролитов .....	93
<b>Микроструктура и проницаемость микротрещинных фрагментов пород .....</b>	<b>94</b>
Микротрещинная проницаемость в амфиболите (обр. 43639).....	94
Микротрещинная проницаемость в мраморе.....	97
Микротрещинная проницаемость в базальте .....	97
Микротрещинная проницаемость в известняке (обр. 83075).....	101
<b>Результаты изучения проницаемости магматических, метаморфических и осадочных пород при высоких температурах и давлениях .....</b>	<b>105</b>

<b>Глава I.4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОТРЕЩИН НА ПОРИСТОСТЬ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД.....</b>	<b>108</b>
Математические модели проницаемости.....	109
Двумерные сеточные модели проницаемости: результаты и обсуждение.....	124
Сопоставление результатов компьютерного моделирования и данных физических экспериментов при высоких РТ-параметрах.....	136
Барическая зависимость проницаемости пород с мультимодальной порово-трещинной структурой.....	138
Идея зависимости.....	140
Структура породы.....	143
Уравнение гиперболического аресинуса.....	145
Экспериментальные данные различных авторов.....	146
Расчет по уравнению и отклонение расчетных данных от экспериментальных.....	148
Физический смысл коэффициентов уравнения (I.69).....	148
Предсказательные возможности уравнения.....	153
<b>Влияние наличия и эволюции микротрещин на проницаемость пород.....</b>	<b>155</b>

## **РАЗДЕЛ II ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ФЛЮИДА..... 157**

<b>Глава II.1. СВОЙСТВА ФЛЮИДА В ОБЪЕМНОЙ ФАЗЕ.....</b>	<b>157</b>
<b>РVT-соотношения в системе CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>157</b>
Введение.....	157
Экспериментальная часть.....	158
Измерение мольных объемов.....	158
Измерение давления.....	160
Определение рабочей температуры пьезометра.....	161
Воспроизводимость объема пьезометра.....	161
Экспериментальные результаты.....	163
Измерения объема CO <sub>2</sub> .....	163
Уравнения состояния для CO <sub>2</sub> .....	165
<b>Глава II.2. БИНАРНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>169</b>
<b>РVTx-соотношения в системе H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>169</b>
Актуальность детальных исследований системы H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> .....	169
Экспериментальная часть. Техника эксперимента и методы.....	170
Экспериментальные результаты.....	172

Плотность смеси $H_2O-CO_2$ .....	172
<b>PVT-соотношения в системе <math>H_2O-CH_4</math> .....</b>	<b>176</b>
Экспериментальная часть. Аппаратура для измерений объемных свойств смеси $H_2O-CH_4$ .....	176
Экспериментальные результаты .....	180
Обсуждение результатов.....	182
<b>Выводы .....</b>	<b>184</b>
<b>Глава II.3. ФЛЮИД В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ.....</b>	<b>185</b>
<b>Смещение равновесия в результате СПЭ .....</b>	<b>185</b>
Введение.....	185
Экспериментальная часть.....	186
Экспериментальные данные .....	186
Обсуждение данных.....	187
<b>Выводы.....</b>	<b>189</b>
<b>Соотношение концентраций <math>H_2O-CO_2</math> в порах     и свободном объеме.....</b>	<b>189</b>
Заключение .....	197
Архив.....	197
<b>Глава II.4. ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД     ДЛЯ МАЛОПЛОТНОГО ФЛЮИДА .....</b>	<b>200</b>
Уравнение Клинкенберга .....	200
Расчет длин свободного пробега молекул $H_2O$ , $CO_2$ , $CH_4$ и Ar.....	201
Сопоставление проницаемости по воде и газу .....	205
Бинарная газовая смесь.....	207
Высокотемпературная константа Клинкенберга .....	208
Выводы .....	208
<b>РАЗДЕЛ III ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД И ДВИЖЕНИЕ     ФЛЮИДОВ В ТЕХНОГЕННЫХ     И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ.....</b>	<b>210</b>
<b>Глава III.1. ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД     И РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ     ФЛЮИДОВ В ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ .....</b>	<b>210</b>
Проницаемость почв и рыхлых отложений на Орловском экологическом полигоне (Восточное Забайкалье).....	210
Исследование эволюции проницаемости пород в связи с проблемой извлечения геотермальной энергии на примере Тарумовской ГЭС (Дагестан).....	217

Влияние сейсмической вибрации на непроницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных и токсичных отходов .....	221
Термогравитационная конвективная ячейка для моделирования взаимодействия раствор–порода в режиме фильтрации.....	228
<b>Глава III.2. ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ГРАНИТОИДНЫМИ ИНТРУЗИЯМИ .....</b>	
<b>232</b>	<b>232</b>
Эволюция проницаемости пород при формировании скарнового месторождения Тастау (Сев. Прибалхашье) .....	232
Эволюция порово-трещинного пространства гранитной интрузии при формировании грейзенового месторождения Акчагау (Казахстан).....	236
Движение флюидов по данным об изотопном составе кислорода и проницаемости пород при формировании грейзенового месторождения Иультин (Чукотка).....	240
Экспериментальное моделирование инфильтрационных известковых скарнов .....	243
Проницаемость пород при формировании рудных зон месторождений Казахстана .....	247
Взаимосвязь рудоотложения и проницаемости пород, вмещающих гидротермальное жильное Pb-Zn оруденение (Осетия).....	250
<b>Глава III.3. ПРЕНИЦАЕМОСТЬ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ГЛУБИННЫХ ЗОН КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ И ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ.....</b>	
<b>254</b>	<b>254</b>
Современное состояние и строение земной коры по данным магнитотеллурического зондирования и экспериментального исследования проницаемости пород .....	254
Проницаемость пород при метаморфических процессах по данным исследований ядра архейских пород Кольской сверхглубокой скважины и их поверхностные аналоги .....	259
Проницаемость пород океанической коры и формирование гидротерм в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта.....	261
Оценка возможных потоков в зонах спрединга по проницаемости серпентинитов.....	265
Проницаемость континентальной земной коры .....	267
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>274</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>277</b>