

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 CO₂ до 1000 МПа и 800°C, для бинарной смеси H₂O-CO₂ – до 500 МПа и 600°C и для системы H₂O-CH₄ до 200 МПа и 425°C. Установлены закономерности изменения проницаемости пород и плотности флюида в интервале PТ-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

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
РАЗДЕЛ I ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ	12
Глава I.1. ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	12
Обзор экспериментальных работ	13
Понятия и определения проницаемости	14
Уравнение Дарси	14
Единицы измерения проницаемости.....	15
Физический смысл проницаемости.....	15
Жидкостная и газовая проницаемость	16
Флюидное и литостатическое давление (соотношение Терцаги).....	17
Глава I.2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД.....	19
Исследование проницаемости пород.....	19
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
Исследование микроструктуры пород.....	40
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
Глава 1.3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ	53
Магматические породы	80
Проницаемость гранитов.....	80
Проницаемость гранодиоритов и диоритов	81
Проницаемость базальтов	89
Метаморфические породы.....	90
Проницаемость гнейсов	90
Проницаемость амфиболитов	90
Проницаемость серпентинитов	91
Проницаемость мраморов	91
Осадочные породы	92
Проницаемость песчаников	92
Проницаемость известняков	93
Проницаемость доломитов.....	93
Проницаемость туфоалевролитов	93
Микроструктура и проницаемость микротрещинных фрагментов пород	94
Микротрещинная проницаемость в амфиболите (обр. 43639).....	94
Микротрещинная проницаемость в мраморе.....	97
Микротрещинная проницаемость в базальте.....	97
Микротрещинная проницаемость в известняке (обр. 83075).....	101
Результаты изучения проницаемости магматических, метаморфических и осадочных пород при высоких температурах и давлениях	105

Глава I.4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОТРЕЩИН НА ПОРИСТОСТЬ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД.....	108
Математические модели проницаемости.....	109
Двумерные сеточные модели проницаемости: результаты и обсуждение.....	124
Сопоставление результатов компьютерного моделирования и данных физических экспериментов при высоких PТ-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
Влияние наличия и эволюции микротрещин на проницаемость пород.....	155
РАЗДЕЛ II ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ФЛЮИДА.....	157
Глава II.1. СВОЙСТВА ФЛЮИДА В ОБЪЕМНОЙ ФАЗЕ.....	157
PVT-соотношения в системе CO₂.....	157
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 ₂	163
Уравнения состояния для CO ₂	165
Глава II.2. БИНАРНЫЕ СИСТЕМЫ.....	169
PVTx-соотношения в системе H₂O-CO₂.....	169
Актуальность детальных исследований системы H ₂ O-CO ₂	169
Экспериментальная часть. Техника эксперимента и методы.....	170
Экспериментальные результаты.....	172

Плотность смеси H_2O-CO_2	172
PVT-соотношения в системе H_2O-CH_4	176
Экспериментальная часть. Аппаратура для измерений объемных свойств смеси H_2O-CH_4	176
Экспериментальные результаты	180
Обсуждение результатов	182
Выводы	184
Глава II.3. ФЛЮИД В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ	185
Смещение равновесия в результате СПЭ	185
Введение	185
Экспериментальная часть	186
Экспериментальные данные	186
Обсуждение данных	187
Выводы	189
Соотношение концентраций H_2O-CO_2 в порах и свободном объеме	189
Заключение	197
Архив	197
Глава II.4. ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД ДЛЯ МАЛОПЛОТНОГО ФЛЮИДА	200
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
РАЗДЕЛ III ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД И ДВИЖЕНИЕ ФЛЮИДОВ В ТЕХНОГЕННЫХ И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ	210
Глава III.1. ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОРОД И РЫХЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ФЛЮИДОВ В ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ	210
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 ГЦС (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
Глава III.2. ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ГРАНИТОИДНЫМИ ИНТРУЗИЯМИ	232
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 Иульгин (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
Глава III.3. ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ГЛУБИННЫХ ЗОН КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ И ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ.....	254
Современное состояние и строение земной коры по данным магнитотеллурического зондирования и экспериментального исследования проницаемости пород	254
Проницаемость пород при метаморфических процессах по данным исследований керн 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
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	274
ЛИТЕРАТУРА	277