

8. Yeong C.L.Y., Torquato S., 1998b. Reconstructing random media. II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts. // Phys. Rev. E, 58: 224-233.
9. Yeong C.L.Y., Torquato S. Reconstructing random media. // Phys. Rev. E. 1998a. 57: 495-506.
10. Okabe H., Blunt M.J. Pore space reconstruction of vuggy carbonates using microtomography and multiple-point statistics. // Water Resour. Res., 2007, 43:0043-1397.
11. Tahmasebi P., Hezarkhani A., Sahimi M. Multi-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions. // Computational Geosciences, 2012, 16: 779-797.
12. Piasecki R. Microstructure reconstruction using entropic descriptors. // Proc. R. Soc. A. 2011. 467: 806 – 820.
13. Biswal B., Øren P.-E., Held R.J., Bakke S., Hilfer R. Towards precise prediction of transport properties from synthetic computer tomography of reconstructed porous media. // Phys. Rev. E. 2009. 80: 041301.
14. Biswal B., Øren P.-E., Held R.J., Bakke S., Hilfer R. Stochastic multiscale model of carbonate rocks. // Phys. Rev. E. 2007. 75: 061303
15. Jiao Y., Stillinger F.H., Torquato S., 2010. Geometrical ambiguity of pair statistics. II. Heterogeneous media. // Phys. Rev. E, 82: 011106.
16. Jiao Y., Stillinger F.H., Torquato S., 2009. A superior descriptor of random textures and its predictive capacity. // PNAS, 106: 17634.

Карсанина Марина Владимировна, ИДГ РАН. Тел.: 8-963-635-7997, e-mail: mary_o_kors@list.ru

2.17. Изменение вулканогенных пород кошелевского вулкана (ю. Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов (по экспериментальным данным)

Шанина Виолетта Валерьевна¹, Герке Кирилл Миронович², Бычков Андрей Юрьевич¹, Корост Дмитрий Вячеславович¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

²Институт динамики геосфер РАН

В настоящее время приоритетное значение имеет развитие возобновляемых источников энергии, одним из которых является тепло, содержащееся в недрах Земли. Это особенно актуально в областях развития активного вулканизма, где сложно добывать или доставлять и использовать традиционные источники энергии (Kelly, 2011; O'Sullivan, 2010). В середине прошлого века появляются экспериментальные работы, посвященные преобразованию пород под воздействием гидротермальных процессов, но до сих пор большинство исследований посвящены изменению минерального состава. Остается малоизученным изменение свойств пород в режиме реального времени, что особенно важно в районах действующих геотермальных электростанций и сказывается на безаварийной работе оборудования.

В нашей работе мы исследовали изменение состава, строения и свойств андезитов и базальтов Кошелевского вулкана (Ю. Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов посредством проведения лабораторных и натурных экспериментов. Лабораторные эксперименты продолжительностью 30 суток проводились при температуре 300 °С и давлении 86 бар в двух растворах, отличающихся кислотно-щелочными условиями. Для опытов использовались автоклавы, состоящие из титанового сплава ВТ-8, объемом 67-119 мл, в каждый из которых помещалось от 2 до 6 подготовленных образцов пород изученного состава и свойств. Температура проведения экспериментов была выбрана с учетом знаний о природных условиях гидротермальной системы Кошелевского вулкана (глубинная температура 291 °С, определена Na-K-Ca-геотермометром (Сережников и др., 1982)). Состав искусственного гидротермального раствора «щелочной» (pH=8,2) был выбран по литературным данным (Эллис, 1982). При создании «кислого» раствора (pH=5,5) в исходный «щелочной» добавляли щавелевую

кислоту для доведения содержания CO_2 до 10 моль/% (5,5 моль/кг), в условиях нагрева данная кислота разлагается с выделением CO_2 , содержание которого влияет на pH раствора. Натурные эксперименты длительностью год проводились на территории Нижне-Кошелевского термального поля, как в кипящих котлах с очень горячими (по классификации ГОСТ 17.1.1.02-77) водами с температурой от 42 до 100 °С, так и в чехле гидротермальных глин с такими же температурными условиями для изучения изменения пород при гидротермальных преобразованиях без активного участия растворов. В ходе лабораторных экспериментов было изучено 10 образцов вулканогенных пород, в ходе натурных – 40 в кипящих котлах и 33 в чехле гидротермальных глин.

По свойствам изученные породы делятся на три группы: 1) массивные андезиты (пробы НК-1/09-1, -1с, -2, -3) – самые плотные (2,45-2,51 г/см³), с минимальной плотностью твердой компоненты (2,68-2,76 г/см³) (табл. 1), что согласуется с их составом – наибольшим содержанием SiO_2 (62,7-64,1%), пористостью (6-11%) и гигроскопической влажностью (0,1-0,4%), с максимальной прочностью на одноосное сжатие (94-168 МПа); 2) пористые андезиты (SiO_2 53,10%, проба НК-100-3) и базальты (SiO_2 53,10%, НК-100-1) – средней: плотности (2,23-2,25 г/см³), пористости (21-24%), абсолютной проницаемости (2,98 мД) (табл. 2), гигроскопической влажности (0,4-0,5%) и прочности (39-55 МПа); 3) шлаки (НК-100-2, -102 и -110) – наименьшей плотности (0,97-1,73 г/см³) и прочности (7-12 МПа), максимальной: пористости (40-66%), количеству каналов у одной поры (5,76) по средним значениям, абсолютной проницаемости (3,94 мД) и гигроскопической влажности (0,5-0,6%), с минимальными скоростями прохождения упругих волн (продольных 2,65-3,30 км/с и поперечных 1,65-2,05 км/с).

С использованием компьютерной рентгеновской микротомографии было изучено 6 образцов вулканогенных пород. Исследование проводилось на сканере Skyscan1172 при напряжении 100 кВ и силе тока 100 мкА. Разрешение съемки для всех образцов составляло 6,71-7,01 мкм. В процессе

сканирования накапливается пакет изображений из сотен теневых проекций, из которых после математической реконструкции получается стек двухмерных изображений (рис. 2.17.1 а, б) (Stock, 2009). Для сегментации (бинаризация по среднему значению между пиками гистограммы интенсивности), получения объемных изображений (рис. 2.17.1 в, г) и некоторых количественных оценок, полученные картины рентгеновской плотности обрабатывались в программах компании SkyScan и ImageJ. С помощью специально разработанных программных комплексов (Герке, Корост, 2011) из отсегментированного пустотного пространства были выделены сеточные модели, где с помощью кластеризации вписанных сфер выделялись крупные образования – поры (pore bodies), и соединяющие их каналы (pore throats) (рис. 2.17.1 д-л). Помимо общей статистики распределения пор по размерам по выделенной модели рассчитывались абсолютные проницаемости и параметр пористости (табл. 2.17.2). Ввиду незначительной пористости андезита НК-1/09-1с (7,1%) и ультрамелкого характеристического размера пор, проведение количественных оценок пористости и проницаемости по 3D-моделям для подобных пород затруднено из-за слишком малой точности. В будущем для подобных образцов pore-scale моделирование предполагается проводить на реконструкциях, получаемых статистическими или последовательными методами (Vasilyev et al., 2012).

Таблица 2.17.1

Свойства исходных андезитов и базальтов Кошелевского вулкана

Проба	ρ , г/см ³	ρ_s , г/см ³	n, %	n _o , %	W _g , %	W _b , %	V _p , км/с	V _{pB} , км/с	V _s , км/с	μ	Ед, ГПа	R _c , МПа	$\square \cdot 10^3$ СИ
НК-1/09-1с	2,51	2,68	6,3	4,5	0,1	1,8	4,10	4,95	2,30	0,18	37,1	151	28,3
НК-1/09-1	2,50	2,69	7,2	4,6	0,2	1,8	3,95	5,05	2,30	0,23	34,9	168	29,4
НК-1/09-2	2,47	2,76	10,5	5,1	0,4	2,1	4,05	4,90	2,50	0,16	35,8	94	23,2
НК-1/09-3	2,45	2,70	9,3	4,9	0,3	2,0	3,85	4,95	2,25	0,23	31,9	122	25,0
НК-100-1	2,25	2,86	21,3	10,0	0,5	4,5	4,15	5,15	2,40	0,24	32,2	55	41,2

НК-100-3	2,23	2,93	23,8	11,6	0,4	5,2	4,05	5,15	2,35	0,26	29,6	39	49,0
НК-100-2	1,51	2,87	47,5	16,6	0,5	11,0	3,30	4,10	2,05	0,17	15,0		32,2
НК-102	0,97	2,87	66,2	49,7	0,5	51,4	2,75	2,65	1,65	0,16	6,6	7	10,1
НК-110	1,73	2,86	39,6	25,0	0,6	14,5	2,65	3,40	2,00	0,25	11,1	12	52,7

Примечание: ρ - плотность, г/см³; ρ_s - плотность твердой компоненты, г/см³; n - пористость, %; n_o - открытая пористость, %; W_g - гигроскопическая влажность, %; W_b - водопоглощение, %; V_p и V_{pv} - скорость прохождения продольных волн в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях, км/с; V_s - скорость прохождения поперечных волн, км/с; μ - коэффициент Пуассона; E_d - динамический модуль упругости, ГПа R_c - прочность на одноосное сжатие, МПа; $\chi \cdot 10^{-3}$ - магнитная восприимчивость, ед. СИ.

Таблица 2.17.2

Данные компьютерной рентгеновской микротомографии и выделенных pore-network моделей для исходных и измененных образцов пористых базальтов (НК-100-32 и -34) и шлака (НК-102-9 (исходная общая пористость 70,8 %, открытая - 52,6%) и -30)

Параметр	Исходные			Измененные			
	НК-102-30	НК-100-1-32	НК-100-1-34	НК-102-30	НК-100-1-32	НК-100-1-34	НК-102-9
Пористость (по 3D изображениям), %	37,0	8,2	5,6	32,7	9,5	5,6	38,0
Количество пор	184892	28790	40345	175066	36611	34829	130922
Количество каналов	535303	20183	21179	405744	27015	18047	279500
Среднее число соединений	5,76	1,37	1,03	4,61	1,45	1,02	4,24
Среднее отношение длины канала к его радиусу	18,9	14,6	13,9	18,5	14,8	13,9	20,7
Абсолютная проницаемость (мД)	3,94	2,98	0	3,35	4,19	0	2,01
Параметр пористости	3,9	251,9	0	5,1	156,8	0	6,8
Максимальный объем поры, мм ³	2,06	3,82	0,10	1,99	4,62	0,13	3,71
Средний объем поры, мм ³	0,004	0,002	0,0005	0,004	0,002	0,0006	0,003
Максимальный радиус пор, мм	0,36	0,39	0,16	0,36	0,43	0,17	0,59
Средний радиус пор, мм	0,038	0,027	0,020	0,037	0,027	0,021	0,029
Максимальный радиус каналов, мм	0,25	0,18	0,10	0,25	0,19	0,10	0,35
Средний радиус каналов, мм	0,016	0,016	0,011	0,016	0,015	0,011	0,011
Максимальная длина каналов, мм	3,09	4,07	1,15	3,08	4,17	1,08	3,33
Средняя длина каналов, мм	0,37	0,28	0,17	0,37	0,28	0,18	0,30
Пористость*, %	63,6	21,1	20,2	65,4	23,0	23,2	68,0
Открытая пористость*, %	48,8	11,6	10,0	46,1	17,9	22,8	

Примечание: *- общая пористость определялась по соотношению плотности твердой компоненты грунтов (ρ_s) и плотности пород в воздушно-сухом состоянии (ρ) по формуле: $n=(\rho_s-\rho)/\rho_s$; открытая пористость пород (n_o) рассчитывалась по формуле: $n_o=\rho*W$, где W - величина водопоглощения, %.

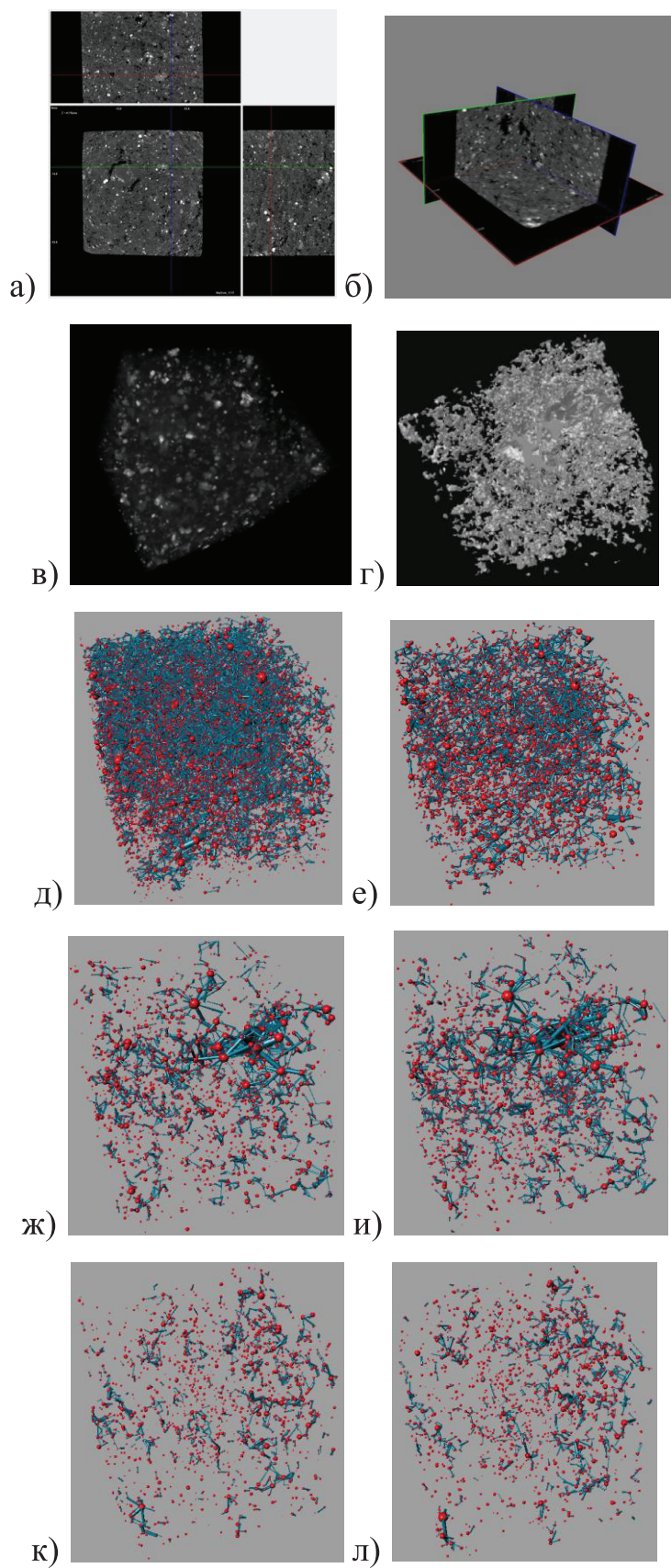


Рис. 2.17.1. Изображения образцов пород: в ортогональных сечениях (исходные: а) НК-100-1-34, б) НК-100-1-32); в) визуализация расположения тяжелых минералов в образце шлака НК-102-30; г) визуализация строения порового пространства образца базальта НК-100-1-32; сеточные модели пустотного пространства исходных (д, ж, к) и измененных (е, и, л) вулканогенных пород, образцы: НК-102-30 (д и е), НК-100-1-32 (ж и и), НК-100-1-34 (к и л)

В результате воздействия высокой температуры (300 °С), давления (86 бар) и разных по химическому составу растворов происходит изменение состава, строения и свойств исследованных пород. На открытой поверхности образцов и в крупных порах отмечается образование новых минералов: в щелочном растворе – незначительного количества хлорита, которого так мало, что это не отразилось на результатах количественного рентгеноструктурного анализа, в кислом – большого количества иллита (8-20%), монтмориллонита (2-35%) и актинолита, лучистые агрегаты которого способствовали закрытию пор и каналов, что отразилось в уменьшении открытой пористости пород и пористости, рассчитанной по 3D изображениям (шлак НК-102-30) (табл. 2.17.2). Изменение порового пространства сказывается на абсолютной проницаемости пород, в шлаках она уменьшается. Полученные по стандартным методикам оценки пористости (Лабораторные работы, 2008) выше расчетных значений по изображениям, так как физический объем образца превосходит размеры изображений, закладываемые для построения 3D моделей, а также часть микропористости находится за пределами разрешающей способности прибора, что отражается на получаемых заниженных значениях пористости. В шлаках существенно снизилось среднее число соединений пор и каналов, что и повлекло снижение абсолютной проницаемости пород. В результате лабораторных опытов тенденция изменения свойств исследованных пород Кошелевского вулкана аналогична наблюдаемой при натуральных экспериментах - при сохранении объемной плотности пород, существенно изменилась плотность твердой компоненты грунтов, последнее связано с новообразованными минералами, обогащенными железом. Наиболее существенное влияние на изменение свойств исследованных пород оказали

их первичные особенности. Плотные андезиты подверглись наименьшим преобразованиям, чему способствовала, в первую очередь, их низкая открытая пористость (до 5%), которая после гидротермального воздействия еще уменьшилась. Максимальные изменения наблюдаются в средней группе пород, что в первую очередь связано с увеличением открытой пористости на 60-80%, произошедшие преобразования структуры порового пространства сказались на ухудшении прочностных и деформационных свойств пород даже при неизменившейся плотности. Увеличение открытой пористости и уменьшение прочности пород на одноосное сжатие связано с увеличением трещиноватости из-за расклинивающего давления взаимодействующего раствора и эффекта Ребиндера, которому подвержены, прежде всего, ультратонкие микротрещины.

Натурные эксперименты, проведенные в глинистом чехле на территории Нижне-Кошелевского термального поля, больше соответствуют условиям диффузионного метасоматизма в застойных поровых растворах. Изменение свойств андезитов и базальтов за год - снижение плотности пород (может быть связано с тем, что выщелачивание и растворение минералов идут быстрее, чем образование новых, из-за отсутствия свободного пространства для их роста), сохранение акустических свойств пород (скорости распространения упругих волн), снижение магнитной восприимчивости за счет разрушения ферромагнитных минералов. Наблюдаемые изменения свойств в целом согласуются с результатами годовых экспериментов в кипящих котлах.

Большинство традиционных методов изучения проницаемости пород приводит к нарушению структуры исследуемой пористой среды, что особенно необходимо избегать в случае экспериментальных работ, когда проводится сравнение свойств исходных и измененных пород. В данной ситуации эффективно использовать расчеты абсолютной проницаемости, выполненные по данным рентгеновской микротомографии, также, как и проводить качественную оценку изменения порового пространства пород,

так как расчеты пористости по стандартной методике основаны на использовании данных о плотности твердой компоненты грунтов и в первую очередь отражают ее изменение. Компьютерная томография является единственным методом позволяющим изучить поровое пространство образцов пород до и после экспериментов без изменения его структуры и разрушения образца.

Литература

Герке К.М., Корост Д.В. Применение высокопроизводительных вычислительных методов для определения свойств пород-коллекторов // Научно-практическая конференция "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли". МГУ, Москва, 2011.

ГОСТ 17.1.1.02-77. Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов. М.: Главное управление гидрометеорологической службы при СМ СССР. 1977. 13 с.

Лабораторные работы по грунтоведению: Учеб. Пособие/ В.А. Королев, Е. Н. Самарин, С. К. Николаева и др.; Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. - М.: Высшая школа, 2008. – 519 с.

Эллис А. Дж. Исследованные геотермальные системы // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир. 1982. с. 497-577.

Kelly G. History and potential of renewable energy development in New Zealand // Renewable and Sustainable Energy Reviews 15. 2011. Pp. 2501–2509.

O'Sullivan M., Yeh A., Mannington W. Renewability of geothermal resources // Geothermics 39. 2010. Pp. 314–320.

Stock Stuart R. MicroComputed Tomography: methodology and applications. CRC Press Taylor & Francis Group. 2009. 336 p.

Vasilyev R.V., Gerke K.M., Karsanina M.V., Korost D.V. Sequential and gravitational algorithms for soil and other porous media modeling. Geophysical Research Abstracts Vol. 14, EGU2012-967.

Шанина Виолетта Валерьевна, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, аспирант, магистр. Тел.: 8-910-436-6119; 8(495)939-16-56, e-mail: viosha@mail.ru.

2.18. Использование томографии полноразмерного керна

Для определения емкостных свойств трещиноватого коллектора

Шалдыбин Михаил Викторович, Лопушняк Юрий Михайлович,

Жуковская Елена Анатольевна, Парначев Сергей Валерьевич

Открытое акционерное общество «Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ОАО «ТомскНИПИнефть»)

Одной из актуальных проблем при изучении керна нефтегазоносных отложений остается диагностика и распознавание структуры пустотного пространства горных пород, являющихся коллекторами нефти и газа. Пустоты в горных породах представлены такими объемами, которые геологами классифицируются как пористость (общая и эффективная), кавернозность, сообщаемость, трещиноватость (открытая и закрытая) и др. Используя методы компьютерной рентгеновской томографии керна, можно с высокой степенью достоверности диагностировать структуру пустотного пространства природного коллектора, который может содержать жидкие полезные ископаемые, представленные в данном случае углеводородами или водой.

С целью обнаружения и геометрической визуализации порово-проницаемой структуры коллектора были проанализированы карбонатные нефтемещающие горные породы одного из месторождений Томской области. По скважине томографии подверглось более 12 метров полноразмерного керна.