

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Ю.В. Фролова¹, В.М. Ладыгин¹, С.Н. Рычагов²

¹ Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, e-mail: skalka@geol.msu.ru

² Институт Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, e-mail: rychnsn@kscnet.ru

Введение. В течение двух десятилетий авторами проводятся исследования петрофизических свойств гидротермально измененных вулканогенных пород Курило-Камчатского региона. Под “петрофизическими свойствами” понимаются физические и механические характеристики горных пород – плотность, пористость, проницаемость, водопоглощение, упругие и прочностные показатели, магнитные и тепловые характеристики, определяемые лабораторными методами [Трофимов, Королев, 1994]. Показано, что в пределах гидротермальных систем под действием термальных вод различной температуры, кислотности-щелочности, химического состава породы испытывают значительные преобразования минерального состава и структуры порового пространства, в результате которых существенно, а в некоторых случаях радикально, меняются их свойства. В зависимости от разных факторов тенденция изменения свойств может быть различна. В одних случаях происходит “улучшение” свойств породы, т.е. ее уплотнение, упрочнение, снижение пористости и проницаемости, в других случаях наблюдается “ухудшение” свойств – разуплотнение, разупрочнение, появление вторичной пористости и проницаемости, появление гигроскопической влажности, повышение влагоемкости [Структура..., 1993; Фролова и др. 1999, 2008; Ladygin et. al., 2000]. Классическим примером кардинальных петрофизических изменений является превращение массивов вулканогенных пород (базальтов, туфов) в пластичные глинистые толщи, которые нередко встречаются на термальных полях. В качестве противоположного примера можно привести превращение слаболитифицированных высокопористых туфов в прочные и плотные высокотемпературные пропилиты и вторичные кварциты. В общем случае, петрофизические преобразования пород вызывают ряд изменений в гидротермальной системе: меняется структура проницаемости вмещающей толщи, напряженное состояние массива, упруго-пластичное состояние пород, а это в свою очередь отражается на гидрохимическом и термодинамическом режимах системы.

По результатам изучения петрофизических преобразований на разных гидротермальных системах (ГТС) Курило-Камчатского региона (Паужетская, Мутновская, Кошелевская, Эссовская, Северо-Парамуширская, вулкана Баранского) выявлены основные факторы, контролируемые изменение свойств при гидротермальном процессе. К ним относятся особенности первичной породы, РТ-условия в системе, химический состав и рН флюида, фазовое состояние флюида (пар, жидкость, кипение), продолжительность взаимодействия флюид-порода. Ниже рассматривается вклад каждого фактора в изменение свойств вулканогенных пород.

Особенности первичной породы. Характер и интенсивность петрофизических преобразований во многом зависит от того, какая порода подвергается изменению. Факторами, способствующими гидротермальной переработке являются высокая пористость и проницаемость, микротрещиноватость, слабая цементация, стекловатая структура, основной (базальтовый) состав вулканитов. К факторам, затрудняющим гидротермальную переработку, относятся плотные, массивные текстуры, низкая пористость, полнокристаллические структуры, кислый состав вулканитов.

Вмещающими породами гидротермальных систем Курило-Камчатского региона являются вулканиты, представленные субвулканическими, вулканическими и вулканокластическими породами неоген-четвертичного возраста. При сравнении свойств этих пород выявились значительные различия (рис. 1).

Эффузивные и экструзивные породы (базальты, андезиты), как правило, плотные ($\rho_{\text{сред}}=2,6 \text{ г/см}^3$) и прочные ($R_{\text{ср}}=150 \text{ МПа}$), с высокими значениями деформационных свойств ($V_{\text{р ср}}=4,55 \text{ км/с}$), низкой пористостью ($n_{\text{ср}}=8\%$) и проницаемостью. Вследствие малой проницаемости они отличаются низкой скоростью гидротермальной переработки. Обычно лавовые потоки формируют экранирующие горизонты в структуре ГТС, хотя в некоторых

случаях они образуют резервуары термальных вод трещинного типа. Происхождение трещиноватости может быть различно. Это могут быть первичные петрогенетические трещины, образованные под действием напряжений, возникающих при остывании лавового потока. Однако больший вклад в проницаемость ГТС вносит вторичная трещиноватость, имеющая тектоническую природу. Эта трещиноватость весьма интенсивна, поскольку исследуемый регион находится в тектонически активной области.

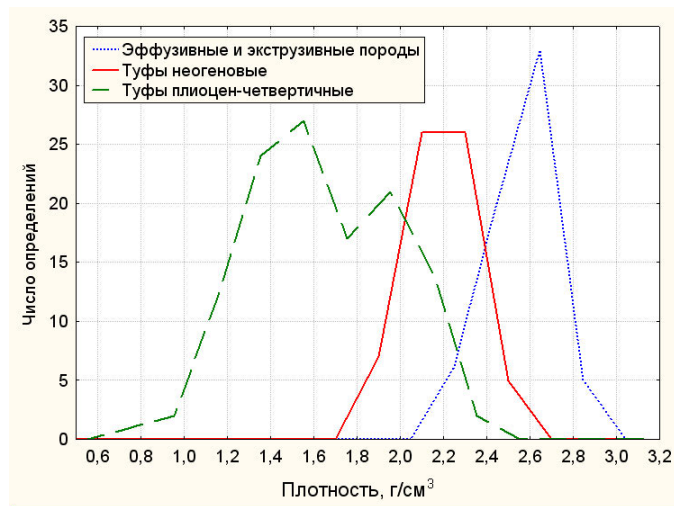


Рис. 1. Сравнительная характеристика вулканогенных и вулканогенно-обломочных пород Курило-Камчатского региона. Гистограмма плотности.

Вулканокластиты (туфы, туффиты, гиалокластиты) отличаются пониженными значениями физико-механических характеристик, высокой пористостью и проницаемостью. Вследствие высокой проницаемости они интенсивно перерабатываются термальными водами. При этом неогеновые вулканокластиты (средние значения показателей: $\rho=2,2$ г/см³;

$n=20\%$; $V_p=2,4$ км/с, $R_c=45$ МПа) обладают более высокими показателями свойств, по сравнению с четвертичными породами (средние значения показателей: $\rho=1,6$ г/см³; $n=38\%$; $V_p=2,15$ км/с, $R_c=23$ МПа), что связано с более высокой степенью литификации первых. Вулканокластиты представляют собой наиболее распространенный тип пород, слагающих геотермальный резервуар. Обычно они образуют резервуары порового или порово-трещинного типа, хотя в некоторых случаях они слагают экранирующие горизонты. Наиболее изученным примером является Паужетское геотермальное месторождение, основной резервуар которого сложен слабосцементированными крупнообломочными туфами, а верхний водоупор (“шапка”) - тонкообломочными аргиллитизированными туфами. Последние, несмотря на высокую пористость ($n=30-50\%$) образуют водонепроницаемый слой. Причина в том, что поры характеризуются ультра-малым размером и заполнены связанной водой, что делает пористость не эффективной для флюидов. Пласт содержит поровые растворы, но фильтрации воды практически не происходит.

Изначальная разница в свойствах пород приводит к различным тенденциям изменений этих показателей под воздействием термальных вод.

РТ-условия в системе. Температура и давление в системе кардинально влияют на изменение свойств пород. Проиллюстрируем это на примере Мутновской ГТС. Туфы, измененные в приповерхностных условиях под действием низкотемпературных термальных вод ($T < 100-150$ °C) характеризуются пониженными значениями свойств (рис.2). Так, скорость распространения продольных волн (V_p) не превышает 3,0 км/с, плотность (ρ) - менее 2,0 г/см³, прочность (R_c) не превышает 50 МПа, пористость (n) более 20%; они, как правило, содержат гигроскопическую влагу до 5%. И напротив, туфы, измененные под действием высокотемпературных вод ($T > 200$ °C) на глубине нескольких сотен метров являются плотными ($\rho > 2,5$ г/см³), прочными ($R_c > 70$ МПа), с высокими значениями $V_p > 4$ км/с и низкой пористостью ($n < 10\%$); гигроскопическая влага исчезает (Фролова, Ладыгин, 2008). Аналогичные зависимости наблюдаются и на других ГТС.

Таким образом, *высокотемпературные флюиды* вызывают четкую тенденцию петрофизических изменений – уплотнение, упрочнение, снижение пористости и проницаемости, удаление гигроскопической влаги. Эта тенденция наблюдается независимо от состава раствора. Она является результатом развития высокотемпературных вторичных минералов, заполняющих поры и трещины, замещающих базис и фенокристаллы породы. Контакты между зернами становятся более крепкими и прочными, исчезает межобломочная/межзерновая микропористость, характерная для неизменных вулканитов – все это усиливает цементацию породы.

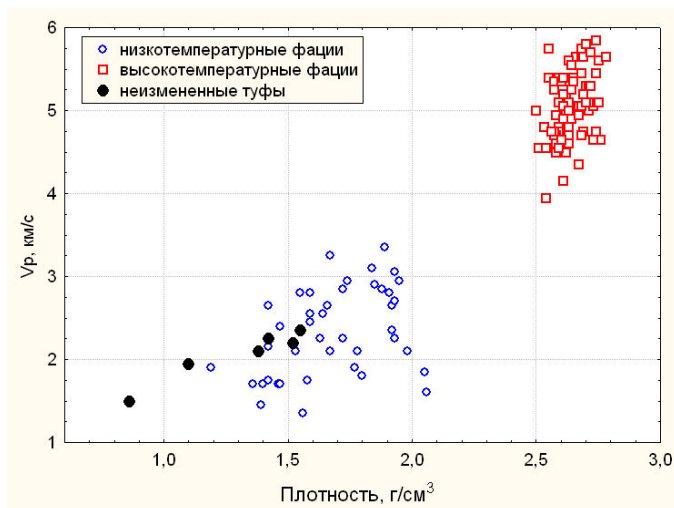


Рис. 2. Сравнительная характеристика туфов Мутновской ГТС, измененных под действием низко- и высокотемпературных термальных вод. График зависимости скорости распространения продольных волн от плотности.

вторичными. Выщелачивание увеличивает пористость, снижая плотность и физико-механические свойства породы. Заполнение пор приводит к обратному эффекту в изменении свойств.

Кроме того, изменение свойств зависит от состава вторичных минералов, среди которых наиболее распространены опал, тридимит, кристобалит, халцедон, каолинит, алуниит, монтмориллонит, высококремнистые цеолиты. Между тем, различные минеральные ассоциации являются результатом воздействия термальных вод различного химического состава и кислотности-щелочности, т.е. здесь проявляется влияние следующего фактора – химического состава флюида. В частности, опалиты формируются под воздействием сернокислотного выщелачивания, вызываемого кислыми сульфатными водами с pH 2-3. Образующиеся при этом кремнистые минералы - опал, халцедон, кварц, тридимит, кристобалит формируют жесткую структуру и повышают механические свойства породы, несмотря на высокую пористость и низкую плотность. Повышение pH флюида до 4-5 обычно приводит к образованию алуниита и глинистых минералов группы каолинита, в результате чего снижаются прочностные и деформационные свойства породы, появляется гигроскопическая влажность, снижается проницаемость. Под действием углекислых флюидов с pH 5-6 формируются смектиты, составляющие основу зоны гидротермальных аргиллитов. Замещая первичные минералы, смектиты вызывают заметное снижение механических свойств; кроме того, образующиеся аргиллитизированные породы неустойчивы при взаимодействии с водой вследствие размокания и набухания. Смектиты, как правило, заполняют поры и трещины и резко снижают проницаемость всей толщи пород, формируя водонепроницаемый слой.

Следует отметить, что в некоторых случаях петрофизические преобразования, вызванные низкотемпературными термальными водами, не подчиняются обычной закономерности, заключающейся в повышении упруго-прочностных свойств при уплотнении породы. В частности, при опалитизации упругие и прочностные свойства значительно повышаются, несмотря на отсутствие уплотнения породы и высокую пористость. В случае аргиллитизации, напротив, происходит уплотнение породы, однако при этом снижаются упругие и прочностные свойства, приобретаются пластические свойства. Гигроскопия низкотемпературных пород изменяется в широких пределах и зависит от состава вторичных минералов: опалиты не гигроскопичны, наиболее гигроскопичны – аргиллитизированные породы со смектитом.

Полученные данные свидетельствуют о том, что тенденция изменения свойств пород под действием низкотемпературных флюидов носит сложный характер и должна тщательно изучаться в каждом конкретном случае.

Продолжительность гидротермального процесса. Проведено сравнение трех гидротермальных систем - Паужетской, Мутновской и вулкана Баранского, функционирующих в течение разного времени и находящихся на разных стадиях развития. Из рассматриваемых систем Паужетская ГТС является наиболее древней, в настоящее время на регрессивной стадии развития, Мутновская ГТС проходит экстремальную стадию развития, ГТС вулкана Баранского является наиболее молодой, на прогрессивной стадии развития [Рычагов и др., 2005]. Гидротермальные зоны Паужетской системы интенсивно переработаны и поэтому в петрофизическом плане однородны. Первоначально различные породы, слагающие ГТС,

интенсивно изменялись в течение продолжительного времени и постепенно трансформировались в однородные горизонты. Таким образом, к настоящему времени система достигла определенной стабильности в петрофизическом преобразовании. Похожая картина наблюдается для Мутновской ГТС, где гидротермальные зоны также обособлены. Иная картина характерна для ГТС вулкана Баранского. Гидротермальные зоны (особенно низкотемпературные) неоднородны – они характеризуются широким разбросом значений петрофизических характеристик. Это обусловлено различной степенью гидротермальной переработки пород; гидротермальные преобразования в настоящее время не закончены.

Выводы.

1. Термальные воды приводят к заметным петрофизическим преобразованиям вмещающих пород, что в свою очередь изменяет структуру проницаемости ГТС и отражается на ее гидрохимическом и термодинамическом режимах.

2. Петрофизические преобразования носят разнонаправленный характер. Основными факторами, контролирующими изменение свойств при гидротермальном процессе, являются особенности первичной породы, РТ-условия в системе, химический состав и рН флюида, фазовое состояние флюида, продолжительность взаимодействия флюид-порода;

3. Выявлено резкое отличие по свойствам, степени гидротермальной переработки и характеру проницаемости между эффузивными и экструзивными породами - с одной стороны, и вулканогенно-обломочными породами - с другой стороны. Изначальная разница в свойствах пород приводит к различным тенденциям изменений этих показателей под воздействием термальных вод.

4. Высокотемпературные флюиды, независимо от состава раствора, вызывают четкую тенденцию петрофизических изменений – уплотнение, упрочнение, снижение пористости и проницаемости, удаление гигроскопической влаги. Петрофизические изменения, вызванные воздействием низкотемпературных растворов более сложны и многообразны. Они зависят от того, какой процесс преобладает – выщелачивание породы, отложение вторичных минералов в порах и трещинах или замещение первичных минералов.

5. Изменение свойств пород зависит от продолжительности гидротермального процесса. В целом, гидротермальные системы характеризуются неоднородностью и избирательностью переработки, и как следствие, петрофизической неоднородностью всей структуры. Однако при продолжительном воздействии термальных вод в структуре ГТС постепенно формируются петрофизически однородные зоны, и система становится более стабильной.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-00118-а, 08-05-00374-а).

Список литературы

Рычагов С.Н., Коробов А.Д., Главатских и др. Эволюция метасоматических процессов в структуре гидротермально-магматических систем островных дуг // Материалы международного полевого Курило-Камчатского семинара “Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма” 16 июля-6 августа 2005, С. 207-216.

Структура гидротермальной системы. Коллективная монография. М.: Наука, 1993. 300 с

Трофимов В.Т., Королев В.А. Методы изучения физических свойств грунтов. В кн.: Практикум по грунтоведению, 1993. С. 168-214.

Фролова Ю.В., Голодковская Г.А., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона // Вестн. Моск. ун-та. Сер 4. Геология, 1999. № 3. С. 36-42.

Фролова Ю.В., Ладыгин В.М. Петрофизические преобразования пород Мутновского вулканического района (Южная Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле № 1(выпуск 11), 2008. С. 158-170.

Ladygin V., Frolova J, and Rychagov S. Formation of composition and petrophysical properties of hydrothermally altered rocks in geothermal reservoir // Proceedings of the World Geothermal Congress, 2000. Japan. P. 2695-2699.