

УДК 624.131.4

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД МУТНОВСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНА (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА) ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2008 Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992; e-mail: skalka@geol.msu.ru

Исследованы и проинтерпретированы петрофизические преобразования вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста Мутновского вулканического района под воздействием гидротермальных процессов. Установлено, что гидротермальные преобразования приводят к существенным изменениям физических и механических характеристик породы, однако тенденция изменения свойств бывает различной и зависит от ряда факторов. Пропилитизация пород вызывает их уплотнение, упрочнение, повышение значений упругих характеристик, снижение пористости, исчезновение гигроскопической влаги. Влияние низкотемпературных растворов на свойства вулканитов не столь однозначно - может происходить как снижение, так и повышение значений петрофизических характеристик. Показано резкое отличие по свойствам, структуре проницаемости, степени и характеру гидротермальной переработки между породами лавовой природы и вулканокластитами. Однако, вследствие интенсивного гидротермального воздействия первоначальные различия в свойствах между данными породами практически стираются.

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в течении многих лет проводятся петрофизические исследования вулканогенных пород, в том числе вмещающих гидротермальные системы и преобразованных под действием термальных вод. Петрофизические свойства - это комплекс физических и механических характеристик горной породы, которые определяются лабораторными методами на образцах, либо рассчитываются. К ним относятся плотностные, влажностные, акустические, тепловые, магнитные, электрические характеристики, также прочностные и деформационные показатели. Основными факторами, определяющими свойства горных пород являются их состав (химический, минеральный) и строение (структура, текстура, пористость, микротрещиноватость). Петрофизические особенности любой вулканогенной породы зависят от условий, в которых она была сформирована, то есть особенностей плавления и кристаллизации магмы, ее состава и последующих вторичных преобразований под влиянием различных геологических процессов - гипергенных, метасоматических, метаморфических. Таким образом, зная

зависимости свойств от геологических факторов, можно решать и обратные задачи - использовать петрофизические показатели для реконструкции геологических условий.

Исследования, проведенные авторами на ряде вулканических и гидротермальных объектов Камчатки, Курильских островов, Сибирской платформы, Кавказа, Исландии, Италии, а также привлечение данных по вулканам Шпицбергена, Новой Зеландии и других районов, показали целесообразность использования петрофизического анализа при изучении как вулканических массивов, так и гидротермальных систем (Ладыгин и др., 2004; Ладыгин, Фролова, 2006; Фролова и др., 1999; Фролова, Ладыгин, 2006; Frolova et al., 2001; Ladygin et al., 2000). Физические и механические характеристики несут количественную информацию о состоянии и однородности массивов горных пород, в том числе, вулканических массивов и гидротермальных систем, об их строении, пространственной изменчивости и о происходящих в них процессах. В частности, они информативны при изучении строения геотермального месторождения и выделения структурных элементов - коллекторов, экранирующих горизонтов (Структура..., 1993); помогают распознать отдельные лавовые потоки, экструзивные тела, дайки в

пределах вулканического массива. Петрофизические особенности горной породы могут служить одним из критериев при оценке динамики как вулканического, так и гидротермального процессов, изучении механизмов этих процессов, выявлении основных стадий развития. Определяемые на образцах петрофизические характеристики применяются при интерпретации материалов сейсмо-, гравиметрической, электро- и магниторазведки. Таким образом, полученные корреляционные взаимосвязи петрофизических характеристик и структурно-минералогических особенностей пород улучшают качество интерпретации геофизических данных. Знание о механических свойствах горных пород (прочность, крепость, деформируемость) необходимы при проведении буровых работ и строительстве инженерных сооружений. Некоторые физические характеристики горных пород (плотность, пористость, проницаемость, тепловые параметры) необходимы как вводные данные при численном моделировании геотермальных и вулканических процессов.

К настоящему времени авторами накоплен и обобщен обширный материал по петрофизическим свойствам пород Мутновского вулканического района Южной Камчатки, характеризующегося сложными геологическим строением и тектоническими условиями, петрографическим разнообразием слагающих пород, наличием современных вулканических и высокотемпературных гидротермальных процессов. Проведенный петрофизический анализ включает комплексное исследование физических и механических характеристик вулканических пород: их природы, корреляционных взаимосвязей, связей с геологическими и структурно-минералогическими факторами, закономерностей изменения под воздействием различных геологических процессов. В рамках данного исследования одним из актуальных вопросов являются петрофизические преобразования пород под воздействием гидротермальных процессов. «Под петрофизическими преобразованиями» мы понимаем изменение состава, строения и свойств горных пород в результате различных геологических процессов (в данном случае - гидротермальных).

Результаты проведенных петрофизических исследований, интерпретация полученных данных о свойствах пород, их сопоставление с геологическими и петрографическими особенностями может представлять интерес в связи с энергетическим освоением территории, в частности, планируемым расширением Мутновской ГеоТЭС, а также проектом научного бурения на Мутновском вулкане (Фролова, Ладыгин, 2006).

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В строении Мутновского вулканического

района принимает участие сложный комплекс пород - эффузивы контрастного состава от основных до кислых, экструзивные образования, вулканокластиты, осадочные породы (Действующие..., 1991). На востоке района в глубоких врезках речных долин обнажаются вулканогенно-осадочные дислоцированные отложения олигоцен-миоценового возраста, представленные конгломератами, песчаниками, алевролитами, туфами, эффузивами. Выше залегают плиоцен-нижнеплейстоценовые толщи - туфы и лавы базальтового, андезибазальтового и андезитового состава. Западная часть района полностью скрыта под чехлом средне-верхнеплейстоценовых вулканитов - лав, разнообразных туфов, игнимбриков, туфобрекчий, пемз, образование которых связано с формированием и последующей деятельностью вулканов Мутновского и Горелого. Среди пород этого возраста особо выделяются вулканиты дацитового и риолитового состава, слагающие значительную часть гор Двугорбого и Скалистого, а также формирующие многочисленные экструзивные купола. В позднем плейстоцене продолжалась активизация вулканов Мутновского и Горелого с излияниями лав базальтового и андезибазальтового состава (Современные..., 1998).

Породы разнообразны по возрасту, генезису, составу, структуре, вторичным преобразованиям, и соответственно, по физико-механическим свойствам.

Нами изучались вулканогенные породы неоген-четвертичного возраста - туфы, игнимбрики и эффузивы, отобранные из различных обнажений Мутновского района, а также из керна скважин, пробуренных на Мутновском рудном поле (рис. 1). В данной работе анализируются следующие петрофизические показатели: плотность породы (ρ), минеральная плотность (ρ_s), пористость (n), гигроскопическая влажность (W_g), водопоглощение (W_p), скорости распространения продольных волн (V_p), прочность на одноосное сжатие (R_c), коэффициент размягчения ($K_{разм}$), магнитная восприимчивость (χ). Определение свойств пород и изучение их петрографических особенностей проводилось по стандартным методикам (Практикум..., 1993). Ниже приводится петрофизическая характеристика пород; в таблице представлены свойства.

Туфы, основание г. Двугорбая (рис. 1, точка 1). В основании г. Двугорбой залегают туфы желтого, охристого, реже белого цвета, витрокластические, кристалло-витрокластические, лито-кристалло-витрокластические псаммито-мелкопсефитовой размерности. Исследования шлифов показали, что туфы претерпели интенсивные преобразования под действием термальных вод, заключающиеся в выщелачивании плагиоклазов, замещении тонкообломочного стекловатого базиса опалом,

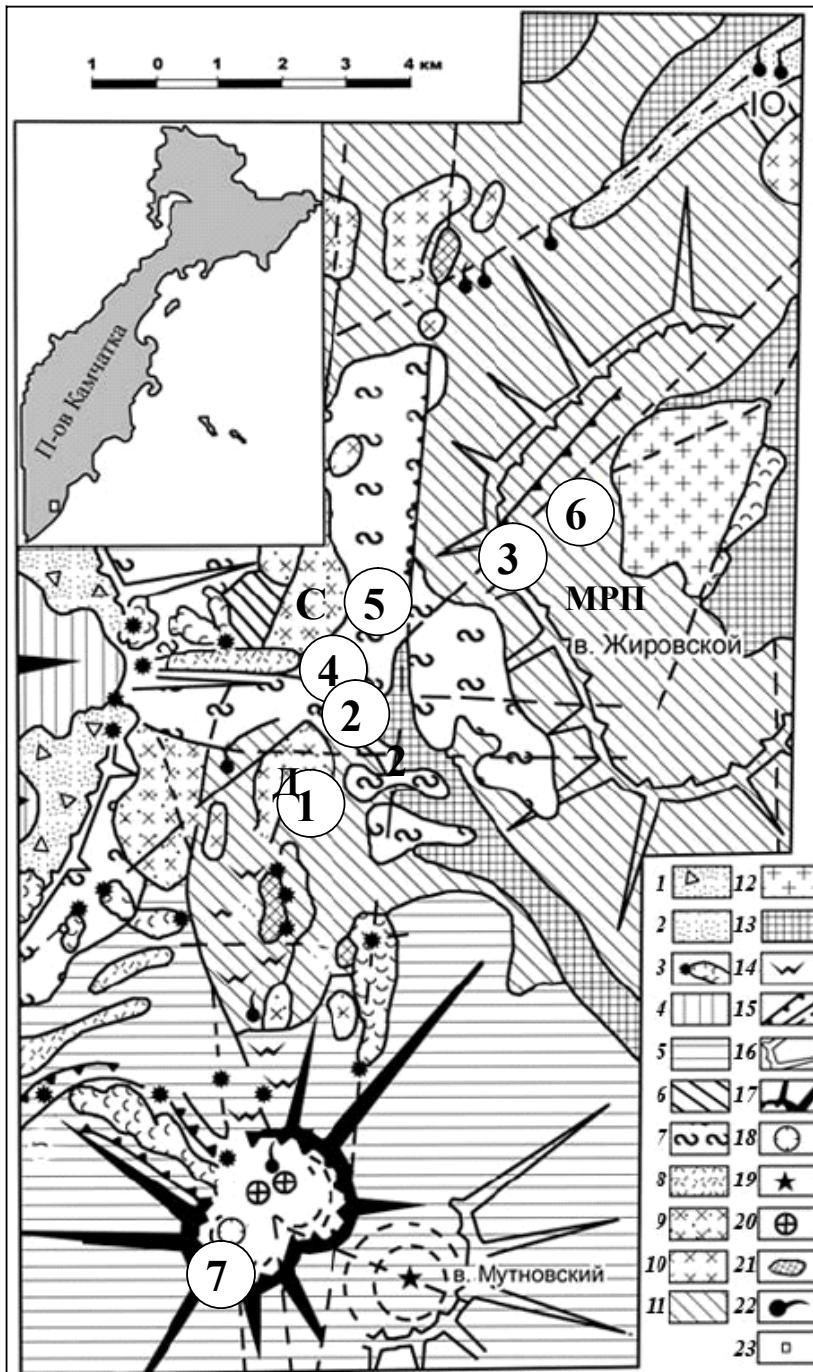


Рис. 1. Схема геологического строения Мутновско-Жировского геотермального района по (Вакин и др., 1976; Николаева, Бычков, 2007) с изменениями:

1 - аллювиально-пролювиальные и пирокластические отложения кальдеры вулкана Горелого (Q_4); 2 - аллювий речных долин (Q_4); 3 - шлаковые конусы и лавовые потоки базальтового состава ($Q_{1,4}$); 4 - базальты вулкана Горелого (Q_4); 5 - андезиты и андезибазальты Мутновского вулкана ($Q_{1,4}$); 6 - андезиты и андезидациты древней постройки вулкана Горелого ($Q_{1,3}$); 7 - игнимбриты и спекшиеся туфы андезидацитового состава ($Q_{2,3}$); 8 - экструзии андезидацитового и риолитового составов, связанные с образованием кальдеры вулкана Горелого ($Q_{2,3}$); 9 - экструзии и лавовые потоки андезидацитового и дацитового составов (Q_2); 10 - экструзии и лавовые потоки дацитового и риолитового составов (Q_1-N_2); 11 - базальты, андезибазальты алнейской серии (Q_1-N_3); 12 - интрузия диоритов (N_2); 13 - вулканогенно-осадочные отложения и эффузивы березовской, вилочинской и паратунской свит (P_3-N_1); 14 - гидротермально измененные породы; 15 - тектонические нарушения; 16 - кратеры и кальдеры древних вулканов; 17 - действующие вулканы; 18 - активная воронка Мутновского вулкана; 19 - вершина Мутновского вулкана; 20 - фумарольные поля: Донное и Верхнее кратера Мутновского вулкана; 21 - термальные поля; 22 - термальные источники; 23 - местоположение Мутновского вулканического района (на врезке).

Цифры на схеме - точки отбора образцов (описание приведено в тексте). Д - гора Двугорбая, С - гора Скалистая, МРП - Мутновское рудное поле.

каолинитом, алунином и гидроксидами железа в различных соотношениях. Степень изменения сильно варьирует. В одних случаях преобразования затронута только витрокластическая масса, тогда как кристаллокласты плагноклазов, пироксенов и литокласты остаются свежими. В других случаях наблюдается полное преобразование породы, и превращение ее в опалит с псевдоморфной структурой; поры заполняются халцедоном. Судя по минеральной ассоциации - это типичная зона сернокислотного выщелачивания гидротермальной системы, хотя в настоящее время на данном участке термопроялений нет.

Туфы очень неоднородны по свойствам. Из

всех разновидностей туфов наименее плотными ($\rho=0.86-1.19 \text{ г/см}^3$), высокопористыми ($n=52-65\%$) и низкопрочными (R_c - первые единицы МПа) являются неизмененные витрокластические туфы с пемзовыми обломками. Скорость распространения продольных волн не превышает 2.0 км/с. Поскольку в составе туфов нет вторичных глинистых минералов, они не гигроскопичны и не теряют прочность при водонасыщении.

Несколько более плотными ($\rho=1.42 \text{ г/см}^3$) являются лито-кристалло-витрокластические туфы, опалитизированные и ожелезненные. Опал образует псевдоморфозы по кристалло- и литокластам, наряду с окислами железа образует пленочный

Таблица. Петрофизические свойства пород Мутновского вулканического района

Порода	Характер гидро-термальной переработки	Место отбора образцов	Кол-во образцов	Плотность (ρ), г/см ³	Минеральная плотность (ρ_s), г/см ³	Пористость (n), %	Гигроскопическая влажность (W_g), %	Скорость распространения продольных волн (V_p), км/с	Прочность на одноосное сжатие (R_c), МПа	Коэффициент размягчаемости ($K_{разм}$)	Магнитная восприимчивость (χ) $\times 10^{-3}$ СИ
Туфы	В различной степени измененные под воздействием низко-температурных гидротерм	Борт р. Правой Фальшивой	11	<u>1.61</u> 1.4-1.93	<u>2.62</u> 2.39-2.76	<u>35</u> 19-49	<u>2.4</u> 0.1-3.6	<u>2.4</u> 1.7-3.05	<u>15</u> 3-35	<u>0.45</u> 0.21-0.64	<u>14</u> 6-29
		Основание г. Двугорбой	10	<u>1.49</u> 0.86-1.93	<u>2.57</u> 2.49-2.78	<u>41</u> 23-65	<u>0.7</u> 0.22-1.9	<u>2.6</u> 1.5-3.25	<u>21</u> 2-45	<u>0.67</u> 0.28-0.84	<u>7</u> 0.05-32
		термальное поле Дачное	9	<u>1.75</u> 1.38-1.95	<u>2.67</u> 2.49-2.96	<u>33</u> 23-44	<u>1.3</u> 0.1-3.5	<u>2.5</u> 1.9-2.95	<u>21</u> 7-36	<u>0.52</u> 0.32-0.74	<u>32</u> 13-46
		кальдера Жировская	12	<u>1.57</u> 1.36-1.89	<u>2.61</u> 2.1-2.8	<u>37</u> 10-49	<u>3.2</u> 0-5.3	<u>2.1</u> 1.35-3.35	<u>16</u> 6-53	<u>0.66</u> 0.37-0.98	<u>11</u> 0.2-33
Игнимбриты	Неизмененные	Район участка Дачный	8	<u>2.19</u> 1.7-2.34	<u>2.64</u> 2.60-2.65	<u>17</u> 10-35	0.1	<u>3.5</u> 1.75-4.5	<u>73</u> 48-102	<u>0.83</u> 0.71-1.0	<u>13</u> 7-33
Туфы, туфобрекчии	Низко- и средне-температурная пропилитизация	Мутновское рудное поле	127	<u>2.61</u> 2.32-2.78	<u>2.77</u> 2.67-2.94	<u>5</u> 1-12	<u>0.5</u> 0.1-1.5	<u>4.9</u> 3.4-6.0	<u>120</u> 33-262	<u>0.59</u> 0.23-0.97	<u>3</u> 0.1-34
Андези-базальты, андезиты			143	<u>2.65</u> 2.38-2.83	<u>2.77</u> 2.64-2.88	4 0.4-14	<u>0.3</u> 0.1-0.6	<u>5.2</u> 3.6-6.1	<u>149</u> 60-356	<u>0.76</u> 0.6-0.95	<u>17</u> 0.2-70
Базальты, андези-базальты	Неизмененные	ЮЗ стенка кратера Мутновского вулкана	110	<u>2.52</u> 2.14-2.88	<u>2.91</u> 2.84-2.97	<u>14</u> 2-26	<u>0.9</u> 0.2-2.1	<u>4.65</u> 3.85-5.5	<u>82</u> 16-185	н.о.	н.о.

Примечания: над чертой - среднее значение показателя, под чертой - минимальное и максимальное значения; точки отбора образцов показаны на рис. 1; "н.о." - свойства не определялись

цемент вокруг обломков (рис. 2а). Туфы, несмотря на высокую пористость ($n=35-40\%$), обладают некоторой акустической жесткостью ($V_p=2.65$ км/с) и прочностью 25 МПа. Жесткий опал-железистый цемент обеспечивает сохранность прочностных свойств туфов при их водонасыщении.

Наиболее плотными ($\rho=1.67-1.93$ г/см³) являются окварцованные туфы, в которых микрорезистивный кварц в ассоциации с алунитом развивается по базису, мозаичный кварц выполняет прожилки. Развитие кварцевого агрегата заметно повышает прочностные ($R_c=30-45$ МПа) и акустические ($V_p=3.1-3.3$ км/с) свойства породы, формирует жесткую структуру, устойчивую при водонасыщении. Примесь в микрозернистом кварцевом агрегате алунита оказывает на свойства противоположное влияние: V_p уменьшается до 2.7-2.8 км/с, прочность - до 10-20 МПа; снижается водопрочность породы.

В целом, измененные до глин и опала туфы образуют водонепроницаемый и теплоизоляционный слой (для глин теплопроводность составляет 0.12-3.1 Вт/(м×К), среднее 1.6 Вт/(м×К) по данным (Дортман, 1984), который может выполнять роль верхнего водоупора, так называемой «шапки» геотермального месторождения (Белоусов, Белоусова, 1985).

Туфы, борт р. Правой Фальшивой (рис. 1, точка 2). В левом борту реки изучено и опробовано обнажение туфов. Туфы разнообразны по цвету - от черного и темно-серого до зеленого, желтого и светло-желтого; по степени цементации - от крепко- до слабощементированных. Туфы псефитовой размерности - размер обломков до нескольких сантиметров; обломки представлены лито-, кристалло- и витрокластами. Туфы в различной степени преобразованы под действием термальных вод. Отобрана коллекция туфов - от неизмененных до интенсивно преобразованных.

Неизмененные туфы - темно-серые, по составу андезитовые (SiO₂ 54-57%), кристалло-литокластические; обломки плагиоклазов, пироксенов, андезитов свежие. Туфы слабо цементированы, цемент контактового типа (соприкосновения).

Гидротермально измененные туфы характеризуются ассоциацией вторичных минералов, среди которых смектит, опал, высококремнистые цеолиты, тридимит, что соответствует низкотемпературной зоне гидротермальной аргиллитизации. Вторичные минералы развиваются в основном по стекловатому тонкообломочному базису и в межобломочном поровом пространстве. Кристалло- и литокласты остаются свежими или изменяются незначительно. Кристаллы цеолитов в виде цепочек обрастают обломки, формируя пленочный цемент.

Неизмененные туфы обладают высокой пористостью ($n=48\%$), и низкими значениями плотности ($\rho=1.42$ г/см³) и прочности ($R_c=5-6$ МПа). Значение

минеральной плотности туфов ($\rho_s=2.71$ г/см³) соответствует андезитовому составу.

Аргиллитизированные туфы, в которых стекловатый тонкообломочный базис и витрокласты замещены глинистыми минералами (рис. 2б), также характеризуются высокой пористостью ($n=45-48\%$) и низкой плотностью ($\rho=1.40-1.47$ г/см³); они гигроскопичны ($W_g=2.5-3.5\%$) и влагоемки ($W_n=20\%$). Скорости распространения продольных волн варьируют в интервале 1.7-2.4 г/см³ и при водонасыщении, за счет разуплотнения глинистых контактов, снижаются примерно на 10%. Прочность аргиллитизированных туфов низкая 3-10 МПа; при водонасыщении они заметно разуплотняются - прочность снижается в 2-3 раза. В целом, по сравнению со свежими туфами, свойства меняются незначительно.

Более плотными ($\rho=1.59-1.93$ г/см³) являются туфы, в которых основными вторичными минералами являются высококремнистые цеолиты, образующие порово-пленочный цемент (рис. 2в, 2д), тридимит, опал. Частичное заполнение вторичными минералами межобломочного пространства способствует повышению показателя V_p до 2.65-3.05 км/с и заметному упрочнению туфов до 20-35 МПа.

Туфы, борт Жировской кальдеры (в районе Верхне-Мутновской ГеоТЭС) (рис. 1, точка 3). Борты кальдеры слагают нижнеплейстоценовые крупнообломочные туфы, в различной степени измененные под действием низкотемпературных термальных вод. Судя по минеральной ассоциации вторичных минералов, среди них выделяются туфы, испытавшие аргиллитизацию (смектит, высококремнистые цеолиты, опал) и туфы, подвергнувшиеся сернокислотному выщелачиванию (опал, кварц, гидроокислы железа).

Процесс аргиллитизации заключается в разложении вулканического стекла и постепенного его превращения в опал-глинистую массу. При этом в первую очередь преобразуется тонкообломочный стекловатый материал. Замещение более крупных обломков стекла происходит постепенно, начинаясь с краевых частей, а также стенок газовых пустот, заключенных внутри обломков. Плотность аргиллитизированных туфов составляет 1.36-1.67 г/см³, туфы гигроскопичны ($W_g=3.3-5.3\%$), влагоемки, характеризуются невысокими значениями V_p (1.4-2.2 км/с) и низкой прочностью ($R_c=6-15$ МПа). При водонасыщении они размягчаются ($K_{разм}=0.4-0.6$).

Процесс сернокислотного выщелачивания обычно протекает с высокой интенсивностью: он превратил туфы в опалиты - породы с псевдоморфной структурой, полностью замещенные опалом и гидрооксидами железа. Опалиты, несмотря на высокую пористость ($n=40-50\%$), обладают довольно высокими значениями V_p (2.1-3.4 км/с)

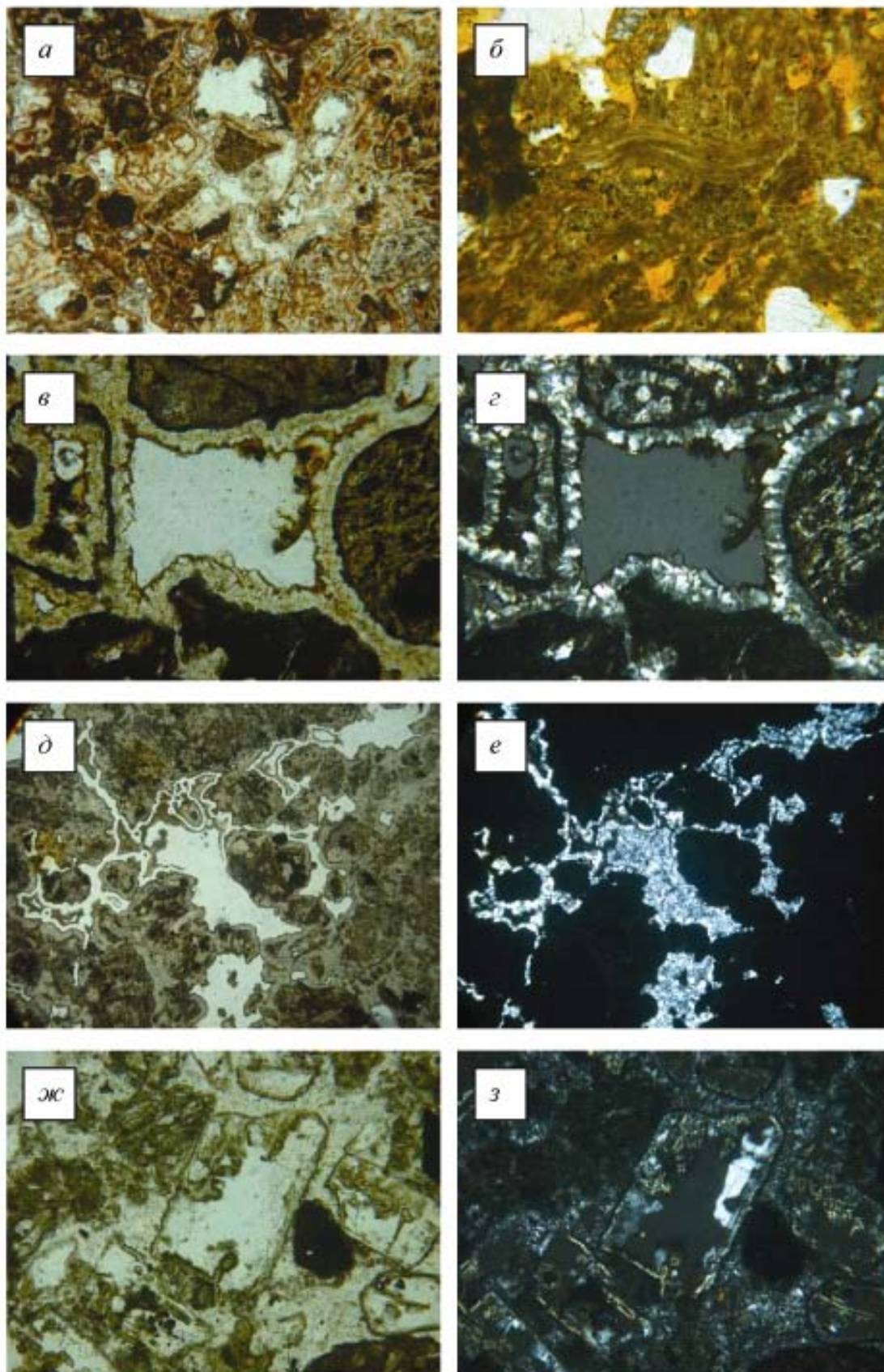


Рис. 2. Вторичные минералы в туфах: *а* - замещение туфа опалом и гидроксидами железа (ширина поля зрения 1 мм, Н1); *б* - замещение вулканического стекла смектитом (ширина поля зрения 3 мм, Н1); *в*, *г* - пленочный цеолитовый цемент (ширина поля зрения 1 мм, *в* - Н1, *г* - Н+); *д*, *е* - замещение туфа опалом, в порах - халцедон (ширина поля зрения 3 мм, *д* - Н1, *е* - Н+); *ж*, *з* - выщелачивание плагиоклаза (ширина поля зрения 3 мм, *ж* - Н1, *з* - Н+).

и прочности ($R_c=25-50$ МПа), что связано с формированием жесткого и прочного вторичного каркаса и заполнением пор халцедоном (рис. 2д, 2е). При сернокислотном выщелачивании происходит разрушение ферромагнитных минералов, что обуславливает характерную особенность опалитов - крайне низкие величины магнитной восприимчивости ($\chi=(0.2-1.4)\times 10^{-3}$ СИ). Другой петрофизической особенностью опалитов является отсутствие гигроскопической влаги.

Туфы, обнажение над Дачным термальным полем (рис. 1, точка 4). В бортах распадка над Дачным термальным полем наблюдаются выходы туфов - от зеленоватых, светло-желтых до белых, литокристаллокластических, псаммито-мелкопсефитовой размерности, различной степени цементации и изменения термальными водами. Предположительно туфы принадлежат зоне сернокислотного выщелачивания.

Неизмененные туфы - лито-кристаллокластические с тонкообломочным цементом порово-базального типа. Обломки представлены кристаллами свежих плагиоклазов, пироксенов, литокластами андезитов и более древних, регионально измененных вулкаников. Туфы высокопористые ($n=40-45\%$), плотность туфов варьирует в диапазоне $1.38-1.55$ г/см³, $V_p=2.1-2.35$ км/с, $R_c=9-12$ МПа.

Основными вторичными минералами гидротермально измененных туфов являются опал, тридимит, каолинит, алунит. Каолинит развивается по основной массе, кристаллы тридимита и алунита образуют цепочки вокруг обломков, частично заполняют межобломочное пространство, формируя пленочно-поровый цемент. Эти же минералы выполняют выщелаченные пустоты, замещают кристаллы плагиоклазов (рис. 2ж, 2з). В результате гидротермальных преобразований пористость туфов снижается до 25-35%, формируется более плотная структура ($\rho=1.77-1.95$ г/см³), прочность повышается до 25-35 МПа.

Игнимбриты, участок Дачный (рис. 1, точка 5). Мощные толщи игнимбритов обнажаются в бортах р. Фальшивой. Это серые, темно-серые породы массивного сложения с обломочной структурой псефитовой размерности. Они сложены обломками лав, кристаллов и вулканического стекла в виде фьямме с характерной ориентированной флюидальной структурой, сваренными в прочную породу. Игнимбриты - особенно важный объект для петрофизических исследований, т.к. они являются основанием сооружений Мутновской ГеоТЭС.

Вулканики неогенового возраста - базальты, андезиты, дациты, туфы, туфобрекчи (кern скважин Мутновского рудного поля - скважины 1, 2, 3, 4, 4а, 10, 13, глубина до 350 м; образцы представлены В.М. Округиным) (рис. 1, точка 6). Специфической чертой Мутновского рудного поля

является наличие в его пределах современной действующей гидротермальной системы. В скважинах, вскрывающих глубокие горизонты рудовмещающих зон, зафиксированы температуры до 203°C. Кроме того, на поверхности наблюдаются современные термальные площадки, с которыми связаны обширные поля аргиллизитов (Современные..., 1998). Поэтому породы, вскрытые скважинами, пробуренными на Мутновском рудном поле, рассматриваются в настоящей работе как гидротермально измененные. Основными вторичными минералами являются хлорит, кварц, серицит, цеолиты, кальцит, альбит, эпидот, пренит, сфен, соответствующие фациям низко- и среднетемпературных пропилитов по классификации (Коржинский, 1993). Нередко эти минералы полностью замещают исходную породу. Пропилитизированные вулканики - плотные ($\rho=2.4-2.8$ г/см³), низкопористые ($n<10\%$), негигроскопичные, с высокими значениями V_p (преобладающие значения 4.5-5.5 км/с), прочные (преобладающие значения $R_c>100$ МПа). Их подробное описание приведено в работе (Ладыгин и др., 2004).

Базальты, андезибазальты (Q_{2,3}), (юго-западная стенка кратера Мутновского вулкана; образцы В.В. Аверьева, Б.П. Мельникова) (рис. 1, точка 7). Изучены лавовые потоки базальтового, андезибазальтового состава, принимающие участие в строении юго-западной стенки кратера вулкана. Эффузивы, слагающие потоки характеризуются массивной, реже пузыристой текстурой, порфировой структурой. Преобладают базальты с интерсертальной структурой основной массы, в меньшей степени встречаются гиалобазальты и полнокристаллические разности. Породы не изменены вторичными процессами.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВОЙСТВ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД И ТУФОВ

Выявлено резкое отличие по свойствам, степени гидротермальной переработки и характеру проницаемости между породами лавовой природы и вулканокластитами (рис. 3). Для сравнения свойств выбраны разности четвертичного возраста, не измененные или слабоизмененные под действием термальных вод.

Туфы отличаются низкой плотностью (преобладающий диапазон изменения $\rho=1.3-1.9$ г/см³; у витрокластических туфов с пемзовыми обломками $0.8-1.0$ г/см³), высокой пористостью (преобладают значения в интервале 30-50%), малой прочностью (R_c первые единицы МПа - 30 МПа); они гигроскопичны ($W_g=2-3\%$), влагоемки, не водостойки - размягчаются при водонасыщении ($K_{разм}=0.4-0.5$) (рис. 3). Под действием термальных вод туфы быстро и интенсивно перерабатываются. Этому способствуют высокая первичная порис-

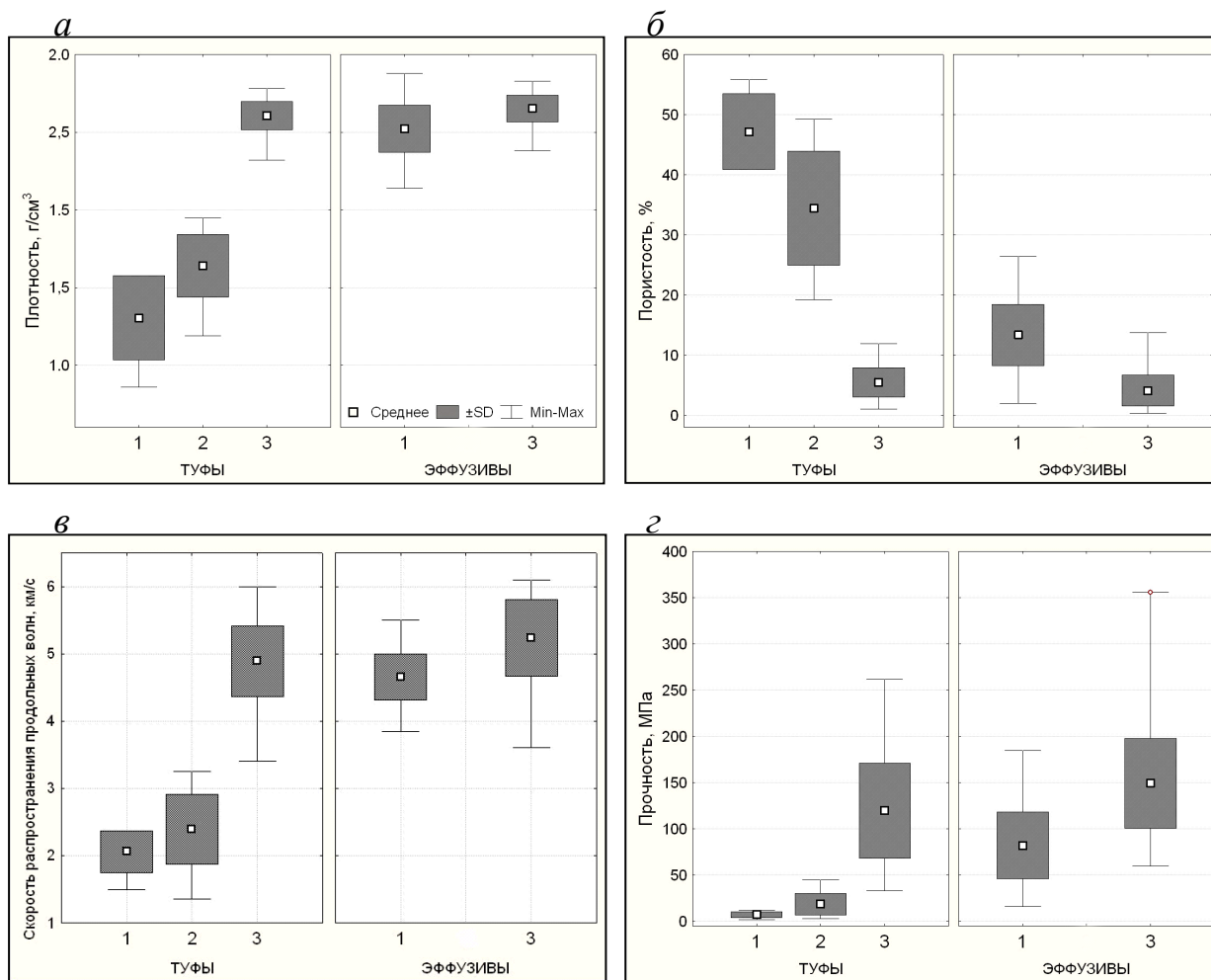


Рис. 3. Сравнительная характеристика свойств эффузивных пород и туфов. Изменение свойств под воздействием гидротерм. Диаграммы: а - плотность; б - пористость; в - скорость распространения продольных волн; з - прочность на одноосное сжатие. Цифрами на оси абсцисс обозначены: 1 - неизменные породы; 2 - низкотемпературные фации - сернокислотного выщелачивания, аргиллитизации, высококремнистых цеолитов; 3 - пропилитизированные породы

тость и проницаемость пород, наличие в их составе нестойкого, легко перерабатываемого витрокластического и пемзового материала, слабая цементация между обломками. В результате гидротермальной переработки существенно меняется минеральный состав пород и их петрофизические свойства.

Породы лавовой природы - плотные ($\rho=2.14-2.88 \text{ г/см}^3$), относительно низкопористые (преобладают значения $n=8-18\%$), прочные (преобладающие значения $R_c=50-120 \text{ МПа}$), что обусловлено существованием прочных кристаллизационных связей между структурными элементами, образующихся в процессе кристаллизации магмы (рис. 3). Эффузивы негигроскопичны, поскольку в их составе отсутствуют глинистые минералы. Вследствие низкой проницаемости эффузивные породы в меньшей степени подвержены преобразованиям под действием термальных вод. Главным фактором, снижающим физико-механические свойства эффузивов и повышающим проницаемость, является пористость и трещиноватость.

Промежуточное положение между эффузива-

ми и туфами по петрофизическим свойствам занимают игнимбриты. В целом это довольно плотные ($\rho=2.1-2.3 \text{ г/см}^3$), негигроскопичные, невлагоёмкие ($W_p=3-5\%$) образования, характеризующиеся достаточно высокими значениями скорости распространения продольных волн ($V_p=4.0-4.5 \text{ км/с}$) и прочности ($R_c=50-100 \text{ МПа}$). Свойства игнимбритов во многом зависят от степени спекания обломочного материала. При слабой степени спекания игнимбриты приближаются по строению и по свойствам к туфам, и обладают пониженными значениями упруго-плотностных ($\rho=1.7 \text{ г/см}^3$, $V_p=1.75 \text{ км/с}$) и прочностных свойств и высокой пористостью ($n=35\%$). Игнимбриты, образованные в результате сильного спекания (сваривания) горячего пирокластического материала характеризуются повышенными величинами петрофизических свойств. Их характерной особенностью является ориентированная флюидальная текстура, образованная включениями вулканического стекла в виде фьямме. Это обуславливает анизотропию упругих, прочностных,

тепловых характеристик игнимбритов, их проницаемости, что необходимо учитывать при выборе данных для моделирования, при расчетах устойчивости основания сооружения и т. д.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ПОРОД

Территория Мутновского вулканического района характеризуется многочисленными термопроявлениями. Наличие термальных вод в районе Мутновского вулкана привело к существенному перерождению вулканогенных пород, в первую очередь туфов, отличающихся высокой проницаемостью. Ниже приводится краткая характеристика гидротерм, распространенных в пределах Мутновского геотермального месторождения и соответствующие им гидротермальные зоны по (Словцов, 1994). На глубинах 700-1000 м фиксируется восходящий поток типичных для вулканических областей хлоридно-натровых углекислых вод с рН 6-9 и температурой 240-350°C. В результате их воздействия на вмещающие вулканогенные породы последние преобразуются в кварц-эпидот-хлоритовые породы (среднетемпературные пропилиты по классификации Д.С. Коржинского). В области двухфазной циркуляции пароконденсатных слабокислых (рН 5-6) растворов, с $T=180-200^{\circ}\text{C}$, распространенной в интервале глубин 150-800 м формируется кварц-вайрацит-пренитовая зона. По периферии этой зоны предполагается область циркуляции конденсатных сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатных щелочных (рН 9) растворов нисходящего потока с $T=150-240^{\circ}\text{C}$. Глубина их распространения 100-900 м. С этими водами связана иллит-хлорит-кальцитовая зона (зона низкотемпературных пропилитов). В приповерхностном горизонте (глубина до 10 м) выделяется монмориллонит-цеолитовая зона, соответствующая области циркуляции нагретых ($T < 150^{\circ}\text{C}$) грунтовых близнеитральных (рН 6-7) вод гидрокарбонатно-кальциевого состава. Монмориллонит-пиритовая с опалом зона приурочена к выходам гидротерм на поверхность в виде парогазовых струй с $T=98-110^{\circ}\text{C}$. Для термальных площадок характерны вторичные кислые (рН 2-3) сульфатно-натровые воды с $T=60-110^{\circ}\text{C}$. Данный тип вод вызывает сернокислотное выщелачивание вмещающих пород и превращение их в опалиты, опал-каолинитовые образования, нередко с алунитом и гидрооксидами железа.

Таким образом, под действием термальных вод различного состава, кислотности-щелочности и температуры, первичные минералы вулканогенных пород испытали выщелачивание и замещение разнообразными вторичными минералами. В ряде случаев претерпела изменение структура порового пространства. Отметим, что преобразование

структуры порового пространства может носить различный характер. С одной стороны первичные поры и трещины в вулканогенной породе заполняются вторичными минералами, выпадающими из термального раствора, что приводит к уплотнению пород, снижению проницаемости и замедлению гидротермальных процессов. С другой стороны, для гидротермального процесса характерно формирование вторичной пористости и трещиноватости. Вторичная пористость образуется в результате выщелачивания первичных минералов, замещения более плотных магматических минералов менее плотными гидротермальными. В качестве примеров можно привести замещение плагиоклазов ($\rho_s=2.6-2.75 \text{ г/см}^3$) цеолитами ($\rho_s=2.1-2.3 \text{ г/см}^3$), вулканического стекла (для базальтового стекла $\rho_s=2.75-2.85 \text{ г/см}^3$) - смектитом ($\rho_s=1.7-2.7 \text{ г/см}^3$), опалом ($\rho_s=1.9-2.5 \text{ г/см}^3$), темноцветных минералов ($\rho_s > 3 \text{ г/см}^3$) - хлоритом, кальцитом ($\rho_s=2.6-2.75 \text{ г/см}^3$). Следует отметить, что формирование вторичной пористости не всегда влечет за собой повышение проницаемости породы. Так, в случае замещения первичного вулканогенного вещества глинистыми минералами заметно повышается пористость породы, однако ее проницаемость при этом снижается: глинистые минералы, во-первых, характеризуются ультрапористостью, не эффективной для прохождения флюидов сквозь породу, во-вторых, набухают при водонасыщении, закрывая межобломочные поры и трещины. В результате дополнительно снижается проницаемость пород, изменяется динамика подземных вод, меняются условия взаимодействия флюид-порода.

Гидротермальные преобразования нередко приводят к полной переработке породы, при которой полностью утрачивается ее первично-магматическая структура. Однако обычно преобладают псевдоморфные структуры, когда вновь сформированные минералы повторяют форму первичных кристаллов и обломков.

Очевидно, что минеральные и структурные преобразования приводят к существенным изменениям физических и механических характеристик породы. В зависимости от первичных особенностей породы, состава и температуры воздействующих флюидов тенденция изменения свойств бывает различна.

Изменение свойств вулканогенных пород в результате пропилитизации ($T > 150^{\circ}\text{C}$). Структурно-минералогические преобразования, происходящие с породой в ходе пропилитизации, приводят к ее уплотнению, упрочнению, повышению значений упругих характеристик, снижению пористости, исчезновению гигроскопической влаги. Наиболее четко это проявляется для туфогенных пород (рис. 3 а-е). Изначально пористые, гигроскопичные, низкопрочные туфы превращаются в плотные,

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД МУТНОВСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО РАЙОНА

высокопрочные образования. Это происходит в первую очередь вследствие заполнения межобломочного пространства вторичными минералами, формирования жестких, прочных контактов между обломками, перекристаллизации тонкообломочного базиса во вторичный микроагрегат, состоящий из более плотных и прочных высокотемпературных минералов. В результате пористость туфов снижается с 30-50% до первых %, плотность увеличивается от 1.3-1.9 г/см³ до 2.5-2.6 г/см³, прочность повышается на порядок (рис. 4а), скорость распространения продольных

волн, характеризующая упругие свойства породы повышается в 2-3 раза (от 1.5-2.5 км/с до 4.5-5.5 км/с) (рис. 4б). Существенно снижается влагоемкость туфов, а гигроскопическая влажность, обусловленная присутствием в туфах низкотемпературных глинистых минералов, исчезает.

Аналогичная тенденция изменения свойств, хотя и менее ярко выраженная по сравнению с туфами, наблюдается для пород лавовой природы (рис. 3). Так, в процессе гидротермальной переработки эффузивов их пористость снижается примерно в 3 раза, и у преобразованных пород

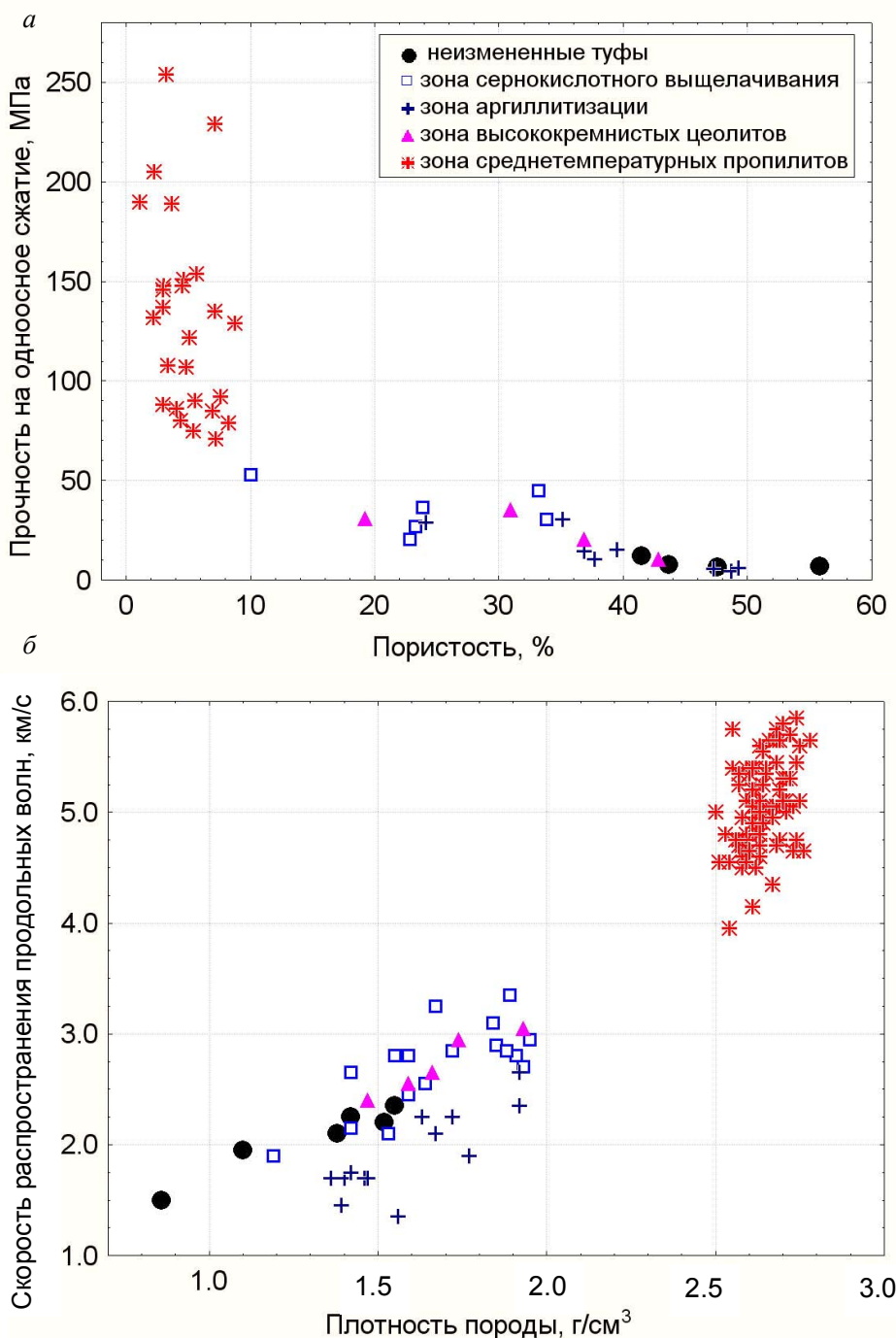


Рис. 4. Изменение свойств туфов при гидротермальной переработке. а - зависимость прочности от пористости; б - зависимость скорости распространения продольных волн от плотности

редко превышает 5%. Повышаются упругие и прочностные характеристики. Следует отметить, что упрочнение пород происходит несмотря на развитие вторичной микротрещиноватости. Поскольку трещины заполнены прочными минералами (кварц, эпидот, альбит, адуляр, кальцит), то они не представляют собой ослабленные зоны. Преобразования в зоне пропилитизации нередко настолько интенсивны, что порода полностью утрачивает свой первоначальный облик. В некоторых случаях порода приобретает псевдоморфную структуру, по которой можно распознать, являлась ли изначально эта порода эффузивом или туфом. Как видно на диаграмме (рис. 3) под действием пропилитизации первоначальные различия в свойствах между эффузивами и туфами практически стираются.

Преобразования вулканогенных пород под действием субповерхностных низкотемпературных гидротерм ($T < 150^\circ\text{C}$). Влияние низкотемпературных растворов на свойства вулканитов не однозначно (рис. 4). При гидротермальных процессах происходит, во-первых, метасоматическое замещение первичных минералов более устойчивыми вторичными образованиями, во-вторых, выщелачивание первичных минералов, и в-третьих, осаждение вторичных минералов в порах и трещинах. Изменение свойств пород во многом зависит от того, какой процесс преобладает - выщелачивание первичных минералов (рис. 2ж, 2з) или заполнение пор вторичными минералами (рис. 2в-е). При выщелачивании формируются более пористые породы, при осаждении вторичных минералов в поровом пространстве, напротив, породы уплотняются, снижается их пористость и проницаемость. Кроме того, на изменение свойств существенное влияние оказывает состав вторичных минералов.

Под действием сернокислотного выщелачивания, в результате развития опала, халцедона, тридимита (рис. 2д, 2е) существенно повышаются упругие и прочностные характеристики туфов (рис. 4). Если для исходных туфов значения V_p изменяются в диапазоне 1.5-2.0 км/с, то при замещении породы опалом, халцедоном и тридимитом они повышаются до 2.0-3.5 км/с, несмотря на то, что уплотнения породы при этом процессе практически не происходит. Прочность возрастает от менее 10 МПа у неизменных туфов до 30-50 МПа у преобразованных пород, т.е. в 3-5 раз. Опалиты также устойчивы при водонасыщении. Возрастание значений упругих и прочностных свойств опалитов связано с формированием жесткого и прочного кремнистого каркаса. Наличие среди продуктов сернокислотного выщелачивания каолинита, напротив, снижает упругие и прочностные характеристики.

Характерной особенностью пород зоны сернокислотного выщелачивания является крайне низкие величины магнитной восприимчивости

($\chi = (0.05-1.4) \times 10^{-3}$ СИ), что связано с разрушением ферромагнитных минералов кислыми термальными растворами.

Аргиллитизация приводит к эффекту, обратному опалитизации - несмотря на уплотнение породы значения V_p не только не повышаются, но нередко снижаются. В результате присутствия смектита породы становятся более гигроскопичными ($W_g = 2-5\%$) и неводопрочными, т.е. размягчаются при водонасыщении ($K_{разм} = 0.3-0.6$).

Следует особо подчеркнуть, что и при опалитизации, и при аргиллитизации нередко нарушается обычная петрофизическая закономерность, заключающаяся в том, что с увеличением плотности породы повышаются ее упругие и прочностные показатели. При опалитизации упругие и прочностные свойства значительно повышаются, несмотря на отсутствие уплотнения породы. В случае аргиллитизации происходит уплотнение породы, однако при этом снижаются упругие и прочностные свойства.

Высококремнистые цеолиты, которые, как правило, заполняют межобломочное пространство и формируют пленочно-поровый цемент (рис. 2в, 2з) вызывают уплотнение и упрочнение (R_c до 20-35 МПа) туфов, повышают значения V_p до 2.65-3.05 км/с (рис. 4).

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОД ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

В общем случае, основными факторами, определяющими характер петрофизических преобразований при гидротермальном процессе, являются, во-первых, особенности первичной породы; во-вторых, особенности гидротермального раствора и давление.

Особенности первичной породы во многом определяют ее поведение под воздействием термальных вод. К факторам, способствующим гидротермальному преобразованию относятся высокая пористость и проницаемость, наличие микротрещиноватости, слабая цементация, присутствие нестойких образований - вулканического стекла, пемзового материала. Факторами, замедляющими гидротермальное преобразование, являются низкая пористость и проницаемость, массивная текстура, полнокристаллические структуры, прочная цементация между зернами, кристаллами, обломками. Таким образом, пористые, слабосцементированные туфы с обломочной витрокластической структурой преобразуются более легко и интенсивно по сравнению с плотными и прочными породами лавовой природы.

Особенности гидротермального раствора (термодинамические параметры, химический

состав, кислотность-щелочность, продолжительность взаимодействия с породой) определяют вторичную минеральную ассоциацию, степень переработки породы, изменение структуры порового пространства, влияя, таким образом, на петрофизические свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование вулканогенных пород Мутновского района показали, что гидротермальные преобразования приводят к существенным изменениям физических и механических характеристик породы, однако тенденция изменения свойств бывает различна.

1. Породы лавовой природы и вулканокластиты резко отличаются по свойствам, характеру проницаемости и интенсивности гидротермальной переработки. Туфы характеризуются низкой плотностью и прочностью, высокой пористостью; они гигроскопичны, влагоемки, не водостойки - размягчаются при водонасыщении. Под действием термальных вод они быстро и интенсивно перерабатываются, что влечет за собой существенное изменение их свойств. Породы лавовой природы - более плотные и прочные, с высокими показателями упругих характеристик, водостойкие, негигроскопичные. Они более устойчивы к гидротермальным преобразованиям. Промежуточное положение между эффузивами и туфами по петрофизическим свойствам занимают игнимбриты.

2. Пропилитизация приводит к уплотнению и упрочнению породы, повышению значений упругих характеристик, снижению пористости, исчезновению гигроскопической влаги. Под воздействием интенсивной пропилитизации постепенно стираются первичные различия в свойствах между породами лавовой природы и вулканокластитами.

3. Влияние низкотемпературных растворов на свойства вулканитов не столь однозначно - может происходить как снижение, так и повышение значений петрофизических характеристик. Изменение свойств зависит от разных факторов - особенностей первичной породы, от того, какой процесс преобладает - выщелачивание первичных минералов или заполнение порового пространства вторичными минералами, от состава вторичных минералов.

4. В некоторых случаях петрофизические преобразования, вызванные 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. В случае аргиллитизации происходит уплотнение породы, однако при этом снижаются упругие и прочностные свойства.

Авторы выражают благодарность д.г.-м.н.

Рычагову С.Н. и к.г.-м.н. Бычкову А.Ю за обсуждение результатов исследований, конструктивные замечания и рекомендации по улучшению статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (07-05-00118-а и 08-05-00374-а).

Список литературы

- Белоусов В.И., Белоусова С.П.* Условия формирования верхнего водоупора и гидротермально измененных пород в районе Мутновского геотермального месторождения // Геотермия, действующие гидротермальные системы и рудообразование. Петропавловск-Камчатский, 1985. Вып. 3. С. 16-18.
- Вакин Е.А., Курсанов И.Т., Курсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического района // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 85-114.
- Действующие вулканы Камчатки / Под ред С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. 412 с.
- Дортман Н.Б.* Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Коржинский Д.С.* Основы метасоматизма и метамагматизма. М.: Наука, 1993. 235 с.
- Ладыгин В.М., Округин В.М., Фролова Ю.В.* Петрофизические свойства неоген-четвертичных пород района Мутновской геотермальной станции (Южная Камчатка). Труды Международного геотермального научно-технического семинара, Петропавловск-Камчатский, 9-15 августа 2004. CD-Rom.
- Ладыгин В.М., Фролова Ю.В.* Использование петрофизического анализа при решении вулканологических задач // III Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии, Улан-Уде 5-8 Сентября, 2006. Т. 1. С.42-46
- Николаева И.Ю., Бычков А.Ю.* Распределение бора между газовой и жидкой фазами гидротерм Мутновского вулкана // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. № 10. С. 34-43.
- Практикум по грунтоведению / Под ред. В.Т. Трофимова, В.А. Королева. М.: МГУ, 1993. 390 с.
- Словцов И.Б.* Минералого-геохимические критерии физико-химических условий в недрах геотермальных месторождений (на примере Мутновского геотермального месторождения, Камчатка). Автореф. дисс. канд. г.-м.н. М. 1994. 28 с.
- Современные гидротермальные системы и эпитептермальные золото-серебряные месторождения Камчатки // Российско-Японский полевой семинар «Минерало-рудообразование в островодужных вулcano-гидротермальных

- системах: от модели к эксплуатации», Петропавловск-Камчатский, 1998. 88 с.
- Структура гидротермальной системы / Отв. ред. В.И. Белоусов, И.С. Ломоносов. М.: Наука, 1993. 298 с.
- Фролова Ю.В., Голодковская Г.А., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона // Вест. Моск. ун-та. 1999. Сер. 4. Геология. № 3. С. 36-42.
- Фролова Ю.В., Ладыгин В.М. Комплексный петрофизический анализ: применение к задачам проекта научного бурения на Мутновском вулкане. International workshop: Mutnovsky Scientific Drilling Object «Exploring the magma-hydrothermal connection» 24-30 September, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 2006, P. 90-92.
- Frolova J.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N. Geothermal Reservoir Study through Petrophysical Data // GRC Transactions. 2001 V. 25. P. 401-403.
- Ladygin V., Frolova J., Rychagov S. Formation of composition and petrophysical properties of hydrothermally altered rocks in geothermal reservoir // Proceeding of the World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000. С. 2695-2699.

THE PETROPHYSICAL ALTERATIONS OF ROCKS FROM MUTNOVSKY VOLCANIC REGION (SOUTH KAMCHATKA) UNDER THE INFLUENCE OF HYDROTHERMAL PROCESSES

J.V. Frolova, V.M. Ladygin

*Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty;
Leninskie Gory, GSP-1, 119992 Moscow, Russia*

The paper describes petrophysical changes of Neogene-Quaternary volcanic rocks from Mutnovsky volcanic region under the action of hydrothermal processes. It was concluded that hydrothermal alterations lead to remarkable changes of physical and mechanical properties of rocks however the tendency of properties variation is different depending from a number of factors. Propylitization causes rocks consolidation, hardening, an increase of elastic properties, a decrease of porosity and disappearing of hygroscopic moisture. The influence of low-temperature fluids on the rocks is not so unequivocally. There can be a decrease as well as an increase of petrophysical properties. The sharp difference by properties, the structure of pore-space and the character and speed of hydrothermal alterations is observed between lavas and volcanoclastic rocks. However the primary differences between these rocks can disappear due to an intensive hydrothermal activity.