

УДК 624.131.4

Ю.В. Фролова¹, В.М. Ладыгин², С.Н. Рычагов³

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВУЛКАНОГЕННЫХ ПОРОД В ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ⁴

Гидротермально-магматические системы Курило-Камчатской островной дуги сформированы в толщах вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста. Термальные воды, воздействуя на вмещающие породы, приводят к их существенным изменениям и превращению в гидротермально-метасоматические породы — пропилиты, вторичные кварциты, цеолитовые образования, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и пр. Динамика изменения свойств пород при гидротермальном процессе зависит от ряда факторов, в том числе от особенностей первичной породы, *PT*-условий в системе, химического состава и pH флюида, фазового состояния флюида, продолжительности взаимодействия раствор—порода. Высокотемпературные глубинные растворы — независимо от состава раствора — вызывают уплотнение и упрочнение пород, повышение деформационных характеристик, снижение пористости и проницаемости, удаление гигроскопической влаги. Тенденция изменений свойств пород, вызванных воздействием низкотемпературных растворов более сложна и многообразна. Установлено, что при низкотемпературных гидротермальных процессах на изменение свойств пород существенно влияют химический состав и кислотность—щелочность термальных вод.

Ключевые слова: вулканогенные породы, гидротермальные преобразования, физические и физико-механические свойства, геотермальные месторождения, гидротермально-магматические системы, Курило-Камчатская островная дуга.

Hydrothermal-magmatic systems of Kuril-Kamchatka island arc are formed in Neogene-Quaternary volcanic rock. Thermal water acting to host rock leads to their alteration and transformation to hydrothermal-metasomatic rocks — propylites, secondary quartzites, zeolitic rocks, argillic rocks, opalites, quartz-adularia metasomatites etc. Dynamic of rock properties changes during hydrothermal process depends on a number of factors including peculiarities of primary rocks; temperature, pressure and composition of thermal fluids; fluid phase, and duration of fluid-rock interaction. Deep, high-temperature fluids cause consolidation and hardening, an increase of deformational properties, a decrease of porosity and permeability independently on fluid composition. The chemical composition and acidity-alkalinity of thermal fluids have a large influence on the alteration of rock properties for low temperature hydrothermal processes.

Key words: volcanic rocks, hydrothermal alterations, physical and physical-mechanical properties, geothermal fields, hydrothermal-magmatic systems, Kuril-Kamchatka island arc.

Введение. Во многих странах ведется активное исследование гидротермально-магматических систем (ГМС) и освоение приуроченных к ним геотермальных месторождений. При их изучении возникает множество вопросов, как прикладных, связанных с проблемами электро- и теплофикации, извлечения минеральных и рудных компонентов из термальных вод, так и научных, касающихся исследования условий формирования, эволюции, строения ГМС, динамики и механизмов геотермальных процессов, рудо- и минералообразования. Наиболее активные исследования проводятся в США, Исландии, Японии, Италии, Новой Зеландии, Индонезии, Китае, на Филиппинах и в ряде других стран [Bertani, 2010].

На территории нашей страны ГМС и разведанные геотермальные месторождения находятся в основном в пределах Курило-Камчатского региона.

При исследовании этих геологических объектов одна из важных задач — изучение вмещающих пород. Термальные воды, воздействуя на породы, приводят к значительным преобразованиям их минерального состава и структуры порового пространства, в результате чего существенно, а в некоторых случаях кардинально, меняются физические и механические свойства пород. Спектр термодинамических и физико-химических условий, в которых происходит преобразование, необычайно широк, что приводит к разнообразию новообразованных пород. В результате

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, *e-mail:* ju_frolova@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н., *e-mail:* skalka@geol.msu.ru

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, заведующий лабораторией геотермии, докт. геол.-минер. н., *e-mail:* volkan@kscnet.ru

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-05-00022а, 10-05-00009а).

вулканогенные породы (эффузивы, туфы, туффиты) превращаются в совершенно новые гидротермально-метасоматические породы — вторичные кварциты, разнообразные пропилиты, цеолитовые образования, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и т.д. При этом в зависимости от разных факторов изменение свойств может отличаться. В одних случаях происходит «улучшение» свойств породы, т.е. ее уплотнение, упрочнение, снижение пористости и проницаемости, в других случаях, наоборот, — разуплотнение, разупрочнение, появление вторичной пористости и проницаемости, появление гигроскопической влажности, повышение влагоемкости [Фролова и др., 2011]. Преобразование пород в свою очередь вызывает изменение структуры проницаемости вмещающей толщи, упругопластического состояния пород, напряженного состояния массива, что в свою очередь может привести к изменению гидрохимического, гидродинамического и температурного режимов системы.

Благодаря работам Д.С. Коржинского, В.А. Жарикова, Н.И. Наковника, А.А. Маракушева, С.И. Набоко, Б.И. Омеляненко, В.Л. Русинова, В.А. Ерошева-Шака, Г.А. Карпова, С.Ф. Главатских, А.Д. Коробова и др., а также зарубежных исследователей D. White, A. Steiner, A. Ellis, D. Coombs, H. Kristmannsdottir, A. Reyes, J.W. Lawless и др. накоплены обширные сведения об особенностях метасоматического, в частности гидротермального изменения горных пород. Однако несмотря на многообразие геохимических, минералогических и петрографических сведений о гидротермально измененных породах, данные об их физико-механических свойствах немногочисленны. Научные работы по изучению петрофизических характеристик пород ГМС и созданию петрофизической базы данных ведут ученые Геологической службы Исландии [Sigurdsson et al., 2000]. Отметим эксперименты немецких ученых из Научно-исследовательского геоцентра GeoForschungsZentrum (г. Потсдам), которые в специальной установке моделируют условия, соответствующие природной геотермальной системе, и ведут наблюдения за изменением петрофизических свойств горных пород [Milsch et al., 2010]. Изменение физико-механических свойств пород в зависимости от характера и типа гидротермально-метасоматических процессов на древних эндогенных месторождениях Урала и Центральной Сибири исследуют сотрудники Уральской государственной горно-геологической академии [Грязнов, 2003].

В течение многих лет авторы ведут работы на геотермальных месторождениях (ГТМ) Курило-Камчатского региона, включающие комплексное изучение физических и механических характеристик вмещающих пород и динамику их изменения под действием термальных вод [Фролова и др., 1999, 2011; Фролова, Ладыгин, 2008; Ladygin et al., 2000; Frolova et al., 2001, 2010; Структура..., 1993]. Обобщение и анализ данных, полученных на Паужетской, Мутновской,

Кошелевской, Эссовской, Северо-Парамуширской, Баранского ГМС, позволили выявить основные закономерности изменения свойств пород при гидротермальном процессе и показать главные факторы, контролирующие эти изменения. Полученные данные представляют интерес в связи с развитием геотермальной энергетики на территории Курило-Камчатского региона.

Геологические и геотермические условия. Курило-Камчатский регион находится в пределах одноименной вулканической островной дуги, расположенной в северо-западном сегменте Тихоокеанского огненного кольца. Огромные запасы геотермальной энергии региона связаны с повышенным тепловым потоком в зоне перехода океан—континент [Сугробов, 1982]. В общем случае геологические, гидрогеологические и геотермические условия Курило-Камчатской островной дуги благоприятны для формирования ГМС, особенно в пределах Центрально- и Восточно-Камчатского вулканических поясов и на Курильских островах. В этом регионе выделяется более 20 высоко- и низкотемпературных систем [Пилипенко, 1998]. Большая часть геотермальных площадей ассоциирует с плейстоценовыми и голоценовыми вулканами, расположенными вдоль региональных глубинных разломов, трассирующих названные выше вулканические пояса. Вмещающие толщи представлены вулканогенными породами неоген-четвертичного возраста — эффузивные и вулканогенно-обломочные. Ниже кратко охарактеризуем основные геотермальные месторождения и гидротермально-магматические системы региона.

Мутновское ГТМ — одно из наиболее перспективных и хорошо изученных месторождений Камчатки. Оно расположено в 70 км на юг от г. Петропавловск-Камчатский. В настоящее время здесь эксплуатируются две геотермальные станции мощностью 12 и 50 МВт_э, поставляющие электричество в общую энергетическую сеть полуострова. В строении Мутновско-Жировского геотермального (рудного) района принимает участие сложный комплекс вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород от олигоцен-миоценового до голоценового возраста [Действующие вулканы..., 1991]. Наличие в недрах системы термальных вод с температурой, достигающей 280 °С, привело к существенному перерождению пород и формированию зонального строения всей толщи. Снизу вверх выделяются следующие зоны: среднетемпературные пропилиты — кварц-эпидот-хлоритовые и кварц-вайрацит-пренитовые, низкотемпературные пропилиты (иллит, хлорит, кальцит), зона высококремнистых цеолитов и гидротермальных аргиллитов, зона сернокислотного выщелачивания (опал, каолинит, алуниит, кристобалит, тридимит, гидрооксиды железа) [Словцов, 1994]. Для определения физико-механических свойств пород нами исследовано 75 образцов из 4 скважин и 45 образцов из естественных обнажений.

Паужетское ГТМ расположено на юге Камчатки, на склоне Камбального хребта, в пределах крупной вулканотектонической депрессии. Здесь в 1967 г. была введена в строй первая в СССР Паужетская геотермальная станция, мощность которой в настоящее время составляет 11 МВт_э. Месторождение сформировано в толще туфов (N—Q), включающей лавовые потоки и дайки среднего и основного состава. Породы интенсивно изменены термальными водами с температурой до 180–220 °С. Толща пород месторождения имеет зональное строение. Снизу вверх выделяются зоны низкотемпературной пропилитизации (хлорит, кальцит, серицит), цеолитизации (ломонтит, хлорит, корренсит), высококремнистых цеолитов и аргиллизитов (клиноптилолит, морденит, гейландит, смектиты, опал). В разуплотненных зонах, по которым происходит подъем и вскипание гидротерм, образуются метасоматиты следующего состава: кварц + адуляр и кварц + адуляр + вайрацит + пренит. Система находится на регрессивной стадии развития, что выражается в наложении низкотемпературных минеральных ассоциаций на более ранние высокотемпературные [Структура..., 1993]. Исследовано около 200 гидротермально измененных образцов преимущественно туфов, в меньшей степени эффузивных разностей, отобранных из 6 скважин (глубина до 500 м) и из обнажения, расположенного вне зоны влияния гидротерм (21 образец).

Кошелевская ГМС занимает наиболее южное положение в пределах п-ова Камчатка и расположена в недрах одноименного вулкана. Термальные поля этой высокотемпературной системы в настоящее время активно изучают сотрудники лаборатории геотермии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В пределах Кошелевского вулканического массива известно несколько термальных полей, два из которых очень крупные: Верхне- и Нижне-Кошелевское. Температура в недрах системы достигает 250 °С на глубине 1100 м [Белоусов, Сугробов, 1976]. Вмещающая толща представлена эффузивными и вулканогенно-обломочными породами (N—Q). Изучено 30 образцов андезитов и туфов, характеризующих приповерхностные изменения, происходящие на термальных полях.

Эссовская ГМС находится в пределах Срединного хребта Камчатки. В геологическом строении региона принимают участие неоген-плейстоценовые вулканогенные породы — туфы и эффузивы. В регионе много горячих источников с температурой до 95 °С. Детальной информации о строении системы пока нет. Исследовано 23 образца туфов, отобранных из естественных обнажений.

Северо-Парамуширская ГМС приурочена к вулканическому хр. Вернадского и расположена в северной части о-ва Парамушир. В центре системы находится вулкан Эбеко, один из наиболее активных действующих

вулканов Курильских островов. Геологический разрез изучен до глубины 2500 м (скважина ГП-3) и представлен миоцен-плейстоценовыми туфами и туффитами (основная часть разреза) и лавами андезитового и андезитобазальтового состава [Рычагов и др., 2002]. В строении ГТС выделяются следующие гидротермальные зоны: среднетемпературных пропилитов (кварц-хлорит-эпидот-серицитовые), низко- и среднетемпературных пропилитов (кварц-адуляр-гидрослюдистые) и низкотемпературных опалитов (опал, кристобалит, тридимит, халцедон). Температура достигает 180–260 °С на глубине 1,5–2,5 км. Отдельно выделяются зоны «вскипания гидротерм», к которым приурочены кварц-адуляровые метасоматиты. Гидротермальная система находится на прогрессивной стадии развития [Рычагов и др., 2005]. Исследованы свойства 35 образцов из 4 скважин и 20 образцов, отобранных из обнажения, не попадающего в зону влияния гидротерм.

ГМС Баранского образовалась в недрах юго-западного склона вулкана Баранского и расположена в центральной части о-ва Итуруп. Это высокотемпературная система, находящаяся на прогрессивной стадии развития, с температурой, достигающей 300 °С на глубине 1200 м [Рычагов и др., 1994]. Вмещающая толща — плиоцен-плейстоценовые туфы и туффиты, переслаивающиеся с лавовыми потоками и про-рванные дайками. Считается, что источником тепла служит неглубоко залегающее субвулканическое тело. Весь разрез месторождения, изученный скважинами до глубины 1200 м, испытал воздействие термальных вод. В разрезе выделяются следующие зоны (снизу вверх): вторичных кварцитов, среднетемпературных пропилитов (хлорит, кварц, вайрацит, эпидот, альбит, серицит), низкотемпературных пропилитов (цеолиты, хлорит, кальцит), аргиллизированных пропилитов (смешанослойные глинистые минералы, кальцит), аргиллизации, а также зона сернокислотного выщелачивания (кремнистые минералы, каолинит, алунит). Зональность нарушена участками «вскипания гидротерм», в которых развиваются адуляр, кварц, вайрацит. Исследованы свойства 250 образцов из 11 скважин [Фролова и др., 1999; Ladygin et al., 2000].

Результаты и их обсуждение. Факторы, влияющие на изменения свойств при гидротермальном процессе. Характер и интенсивность петрофизических преобразований толщи пород под действием термальных вод зависит от многих факторов, главные из них — особенности первичной породы (состав, строение и свойства), *PT*-условия в системе, химический состав и рН флюида, фазовое состояние флюида (пар, жидкость), продолжительность взаимодействия флюид—порода. Ниже рассмотрим вклад каждого фактора в изменение свойств вмещающей толщи пород.

Особенности вмещающих пород. Направленность и интенсивность петрофизических преобразований во многом зависит от того, какая порода подвергается

изменению. К факторам, способствующим гидротермальной переработке, относятся высокая пористость и проницаемость, микротрещиноватость, слабая цементация, стекловатая структура, основной (базальтовый) состав вулканитов. К факторам, затрудняющим гидротермальную переработку, — плотная, массивная текстура, низкая пористость, полнокристаллические структуры, кислый состав вулканитов.

Вмещающие породы ГМС Курило-Камчатского региона представлены вулканитами, сложенными эффузивно-экструзивными и вулканогенно-обломочными (вулканокластическими) образованиями неоген-четвертичного возраста. При сравнении свойств этих двух групп пород выявлены значительные различия (рис. 1). Для сравнения выбраны только свежие или слабоизмененные разности.

Эффузивные и экструзивные породы образуются в процессе остывания и кристаллизации лавы, в ходе которых формируются прочные кристаллизационные контакты между кристаллами. Это делает породы плотными ($\rho=2,3\div 2,8$ г/см³) и прочными ($Rc=70\div 250$ МПа), обуславливает высокие значения акустических и деформационных свойств ($V_p > 4$ км/с, $E=30\div 50$ ГПа), относительно низкую пористость и проницаемость (за исключением краевых частей потоков). Обычно лавовые потоки четвертичного возраста формируют экранирующие горизонты в структуре ГМС, хотя в некоторых случаях они об-

разуют резервуары термальных вод трещинного типа. Происхождение трещиноватости различно. Зоны повышенной проницаемости могут быть связаны с системой первичных трещин, образующихся при остывании лавы, однако вклад этих трещин в формирование проницаемости обычно невелик. Высокая проницаемость свойственна лишь краевым частям лавовых потоков, часто имеющим глыбовое строение. Большей интенсивностью отличается вторичная трещиноватость. Она может иметь тектоническую природу, поскольку исследуемый регион находится в тектонически активной области. Кроме того, вторичные трещины (трещины гидроразрыва) образуются в результате гидротермальных процессов когда давление, создаваемое гидротермами превышает прочность пород.

Вулканокластиты (туфы, туффиты) характеризуются цементационными контактами между зернами, которые образуются в ходе литификации изначально рыхлых пирокластических отложений. По сравнению с эффузивными породами вулканокластиты отличаются пониженными значениями физических и физико-механических характеристик, высокой пористостью и проницаемостью. Замечено, что неогеновые вулканокластиты более литифицированы и характеризуются более высокими значениями упругоплотностных и прочностных свойств (средние значения: $\rho = 2,2$ г/см³, $n = 20\%$, $V_p = 2,4$ км/с, $Rc = 60$ МПа) по сравнению

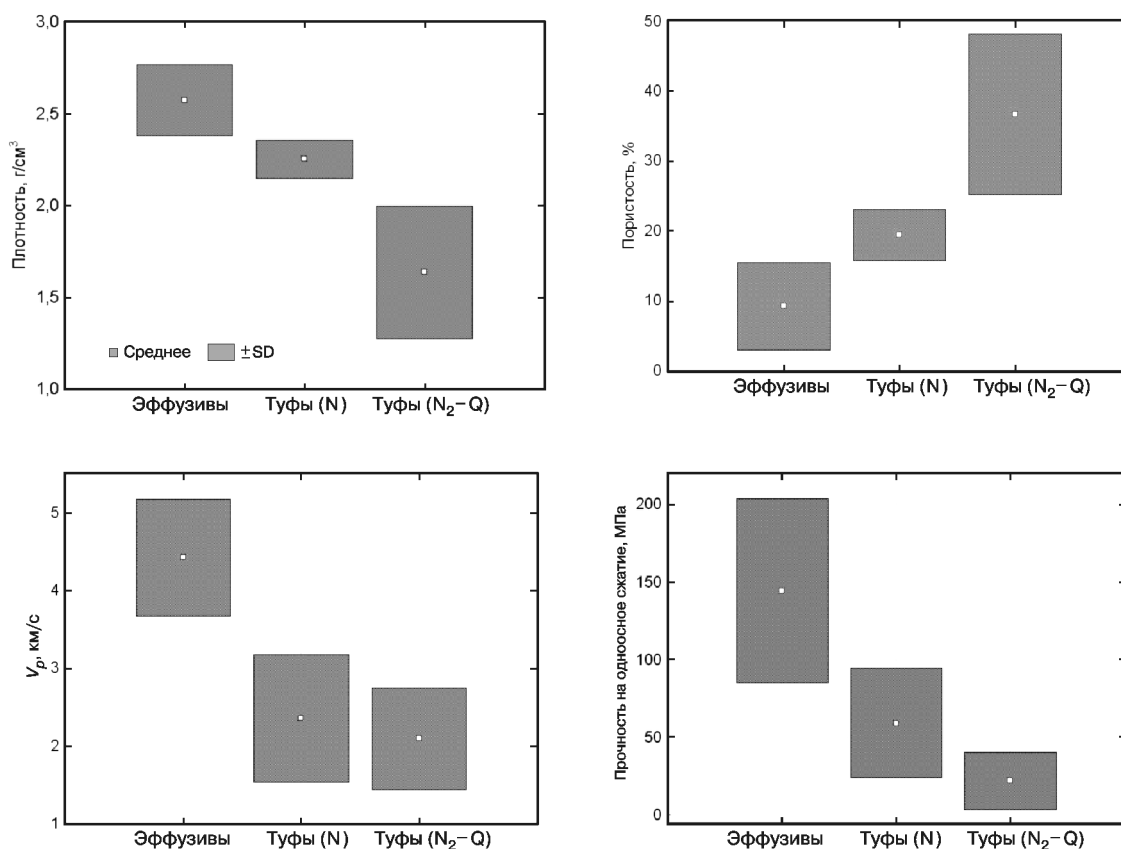


Рис. 1. Сравнительная характеристика свойств эффузивных пород и туфов.

На графиках: точка в центре — среднее значения показателя, прямоугольник — среднее квадратическое отклонение. Число образцов: эффузивные породы — 85; неогеновые туфы — 50; плиоцен-плейстоценовые туфы — 125

с плейстоценовыми (плиоцен-плейстоценовыми) породами (средние значения: $\rho=1,6 \text{ г/см}^3$, $n=40\%$, $V_p=2,1 \text{ км/с}$, $Rc=20 \text{ МПа}$) (рис. 1).

Туфы и туффиты представляют собой наиболее распространенный тип пород, слагающих геотермальные резервуары. Обычно они образуют резервуары порового или порово-трещинного типа, хотя в некоторых случаях слагают экранирующие горизонты. Наиболее изучена Паужетская ГМС, основной резервуар которой сложен слабосцементированными крупнообломочными туфами, а верхний водоупор — тонкообломочными туффитами. Последние, несмотря на высокую пористость ($n=30\div 50\%$), водонепроницаемы, так как поры характеризуются ультрамалыми размерами, что делает пористость неэффективной для флюидов. Поровые растворы реагируют с вмещающей толщей, постепенно преобразуя ее в аргиллизиты, но при этом практически не фильтруются сквозь толщу.

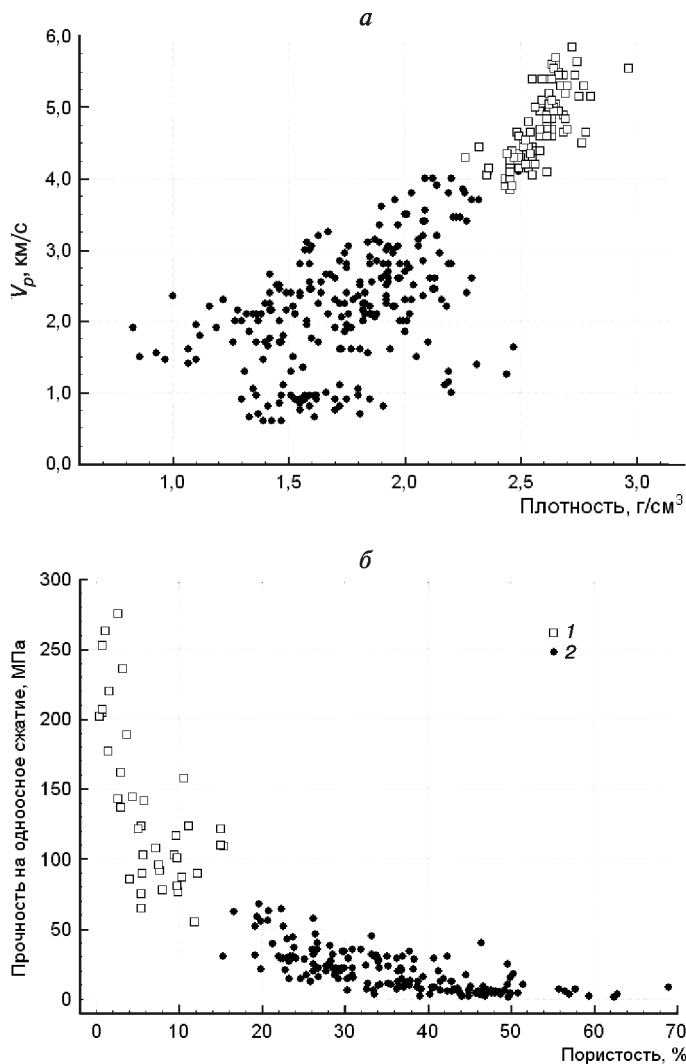


Рис. 2. Сравнительная характеристика туфов, измененных под действием высоко- и низкотемпературных термальных вод: а — график зависимости скорости продольных волн от плотности; б — график зависимости прочности на одноосное сжатие от пористости. 1 — низкотемпературные преобразования, 2 — высокотемпературные преобразования

Влияние *PT*-условий в системе. Температура и давление в гидротермальной системе кардинально влияют на изменение состава и свойств пород. Вулканогенные породы, измененные под действием низко- ($T < 150 \text{ }^\circ\text{C}$) и высокотемпературных ($T > 150 \text{ }^\circ\text{C}$) растворов, существенно различаются по свойствам (рис. 2). В частности, туфы, измененные под действием высокотемпературных глубинных растворов, отличаются плотным сложением ($\rho > 2,3 \text{ г/см}^3$, $n < 15\%$), высокими значениями прочности ($Rc > 50\div 70 \text{ МПа}$) и скорости упругих волн ($V_p > 4,0 \text{ км/с}$). У туфов, испытавших воздействие низкотемпературных близповерхностных растворов, прочность не превышает 50 МПа , $V_p < 4,0 \text{ км/с}$, плотность варьирует в интервале $1,0\text{--}2,0 \text{ г/см}^3$, пористость выше 20% . Низкотемпературные гидротермалиты, как правило, неводостойки — при взаимодействии с водой они размягчаются или размокают. Кроме того, низкотемпературные породы обычно гигроскопичны (W_r до $5\text{--}6\%$), тогда как высокотемпературные образования не содержат гигроскопической влаги.

Чтобы выстроить полную и последовательную картину гидротермальных преобразований, на каждом месторождении сначала были исследованы неизмененные породы, распространенные вне зоны влияния гидротерм, а затем породы, испытавшие гидротермальные преобразования.

Высокотемпературные глубинные растворы вызывают четкую последовательность изменения свойств — уплотнение, упрочнение, снижение пористости и проницаемости, удаление гигроскопической влаги. Изначально пористые, влагоемкие, гигроскопичные, низкопрочные туфы превращаются в плотные, высокопрочные образования. Эта тенденция наблюдается для всех основных типов растворов (хлоридно-натриевых, сульфатно-хлоридных, гидрокарбонатных), формирующихся в глубинных зонах ГМС. Упрочнение пород происходит вследствие заполнения межобломочного пространства вторичными минералами, формирования жестких, прочных контактов между обломками, перекристаллизации тонкообломочного базиса во вторичный микроагрегат, состоящий из более плотных и прочных минералов. Среди этих минералов большая роль принадлежит кварцу, эпидоту, прениту, альбиту.

В наибольшей степени повышение величин упругоплотностных и прочностных показателей проявляется при образовании среднетемпературных пропилитов и вторичных кварцитов. Такие преобразования наблюдаются на Мугновской, Баранского и Северо-Парамуширской ГМС (таблица). В частности, плотность туфов увеличивается от $1,1\text{--}1,7 \text{ г/см}^3$ у неизмененных пород до $2,3\text{--}2,6 \text{ г/см}^3$ у переработанных пород, прочность повышается на порядок (до 100 МПа и более), V_p повышается в $2\text{--}3$ раза (от $1,5\text{--}2,5$ до $4,5\text{--}5,5 \text{ км/с}$). При этом пористость туфов снижается с $30\text{--}50\%$ до нескольких процентов, существенно уменьшается водопоглощение туфов (от

25–40% до нескольких процентов), а гигроскопическая влажность исчезает.

Сравнительная характеристика свойств неизменных туфов и среднетемпературных пропилитов

Порода	ρ , г/см ³	W , %	V_p , км/с	R_c , МПа	Число образцов
<i>Северо-Парамуширская ГМС</i>					
Неизменные туфы	1,3* 1,1–1,5	39	1,4 1,3–1,7	6 3–10	20
Среднетемпературные пропилиты	2,6	<1	4,25 4,0–4,5	73 50–95	5
<i>Мутновская ГМС</i>					
Неизменные туфы	1,4 0,9–1,6	25	1,8 1,3–2,4	5 1–12	8
Среднетемпературные пропилиты	2,6 2,3–2,7	1	4,7 3,9–5,6	90 60–190	70
<i>ГМС вулкана Баранского</i>					
Неизменные туфы	1,5 1,2–1,7	23	1,7 1,4–1,9	20 5–35	10
Среднетемпературные пропилиты	2,3 2,1–2,7	5	3,8 3–5,2	75 40–130	28
Вторичные кварциты	2,5	3	4,3 4–4,5	115 90–160	7

* Над чертой — среднее значение, под чертой — минимальное и максимальное значения.

Эффузивные породы под влиянием высокотемпературных растворов также испытывают уплотнение и упрочнение, хотя и в меньшей степени, чем туфы. В некоторых случаях степень переработки может быть настолько высокой, что породы утрачивают свои первичные особенности. В этом случае разница в свойствах между эффузивными и вулканогенно-обломочными породами исчезает.

Динамика изменения свойств пород, вызванных воздействием *низкотемпературных растворов*, более сложна и многообразна. Это обусловлено рядом факторов. Низкотемпературные растворы формируются прежде всего в приповерхностных горизонтах ГМС; для этих горизонтов характерно интенсивное смешение восходящих парогидротерм с метеорными и близповерхностными кислыми водами, в результате чего здесь преобладают слабокислые или кислые воды разнообразного состава. Эти воды, в отличие от высокотемпературных, активно выщелачивают минералы, растворяют и переносят химические компоненты и т.д. Изменение свойств пород в этом случае во многом зависит от того, какой процесс превалирует: выщелачивание породы, залечивание пор и трещин или метасоматическое замещение первичных минералов более устойчивыми вторичными образованиями. При выщелачивании формируется вторичная пористость, породы разуплотняются; осаждение вторичных минералов в поровом пространстве приводит к обратному эффекту — породы уплотняются, снижаются их пористость и проницаемость; при замещении первичных

минералов на изменение свойств существенно влияет состав вторичных минералов. Таким образом, влияние низкотемпературных растворов на свойства вулканитов неоднозначно и требует подробного изучения, а также анализ геолого-структурных, петрологических, гидрогеохимических и других особенностей в каждом конкретном случае.

Химический состав термальных растворов. При низкотемпературных процессах существенное влияние на изменение свойств пород оказывают химический состав термальных вод и их кислотность—щелочность. В результате воздействия низкотемпературных вод с различными параметрами образуются разнообразные минералы — кремнистые образования (опал, тридимит, кристобалит, халцедон, кварц), глинистые минералы (каолинит, галлуазит, монтмориллонит, смешанослойные), цеолиты, алуит, которые поразному влияют на свойства породы.

Опалитовая зона. Опалиты образуются под действием сернокислотного выщелачивания вулканогенных пород, вызываемого субповерхностными низкотемпературными сульфатными (хлоридно-сульфатными) водами с рН 1–3. Они широко развиты и образуют плащеобразные покровы в пределах ГМС Мутновской, Северо-Парамуширской, Кошелевской и Баранского. Под действием сернокислотного выщелачивания происходит вынос основных породообразующих компонентов из вмещающих пород (как правило, за исключением Si), которые в итоге превращаются в пористые, монокремниевые образования. Минералы кремнезема формируют псевдоморфозы по первичным компонентам. Вулканическое стекло замещается криптокристаллическим агрегатом кристобалита. При этом вполне закономерно изменяются свойства пород, однако последовательность изменения свойств у туфов и эффузивов различна.

Слабосцементированные пористые туфы под действием опалитизации становятся более прочными, повышаются их упругие характеристики, несмотря на то что уплотнение не происходит и пористость остается высокой. Основная причина этого заключается в формировании жесткого кремнистого каркаса, пористого, но более прочного по сравнению со слабой первичной цементацией туфов. В частности, неизменные туфы Мутновской ГМС характеризуются следующими значениями показателей свойств: $\rho=0,9\div 1,5$ г/см³, $n=40\div 60\%$, $V_p=1,5\div 2,2$ км/с, $R_c\leq 10$ МПа. У пород, преобразованных в опалиты, эти свойства таковы: $\rho=1,5\div 1,9$ г/см³, $n=30\div 40\%$, $V_p=2,0\div 3,3$ км/с, $R_c=20\div 30$ МПа [Фролова, Ладыгин, 2008]. В некоторых случаях происходит осаждение кремнезема и заполнение пор тонкокристаллическим кварцем или халцедоном, что приводит к формированию более плотных ($n=10\%$) и прочных ($R_c=50$ МПа) пород. В ассоциации с опалитами часто образуются гематит и гидроксиды железа, придающие бурую, а иногда пеструю окраску и вызывающие некоторое увеличение плотности.

При опалитизации литифицированных плотных туфов и эффузивных пород наблюдается противоположное явление — снижение плотности, прочности, упругих характеристик, формирование вторичной пористости. В частности, для андезитов с термальных полей Кошелевской ГМС удалось выстроить последовательный ряд по степени изменения пород: от свежего андезита до полностью переработанной породы — белого, легкого пористого опалита [Фролова и др., 2010]. С увеличением степени переработки пород микролиты и вулканическое стекло преобразуются в криптокристаллический кристобалит (опал, тридимит). Фенокристаллы выщелачиваются и замещаются тонкокристаллическим агрегатом, состоящим из кристобалита, иногда с примесью каолинита. Каолинит характерен для промежуточных стадий переработки, тогда как конечный продукт изменения практически целиком сложен кристобалитом. Замещение носит псевдоморфный характер. Вследствие выщелачивания и выноса первичных компонентов

формируется вторичная пористость (андезиты 8%, опалиты 37%), уменьшается плотность твердой фазы (от 2,85 до 2,31 г/см³), снижаются значения упруго-плотностных свойств (рис. 3); прочность на одноосное сжатие уменьшается в 4 раза — со 120 до 30 МПа. Отмечается снижение значения коэффициента Пуассона от 0,31 до 0,14. Это происходит вследствие формирования «ажурной» кремнистой структуры, при нагружении которой поперечные деформации малы и которая имеет хрупкий характер разрушения. Магнитная восприимчивость при образовании опалитов уменьшается на три порядка (от десятков до долей ед. СИ·10⁻³), что вызвано разрушением рудных и темноцветных минералов, обладающих ферромагнитными и парамагнитными свойствами и формированием кремнистых минералов — диамагнетиков.

Каолинитовая зона. Повышение pH до 4–5 приводит к образованию каолинита, что вызывает снижение физико-механических свойств вулкаников ($R_c \sim 10$ МПа, $V_p = 1,5 \div 2,0$ км/с), образование гигроскопической влаги (1–5%), снижение проницаемости. В данных условиях основная масса туфов замещается каолинитом и опалом, кроме того, нередко присутствуют гидроксиды железа и диоктаэдрический монтмориллонит. Новообразованные минералы развиваются в основном по цементующей массе породы, оставляя обломки плагиоклазов и пироксенов относительно свежими. Туфы легкие ($\rho = 1,6 \div 1,7$ г/см³), высокопористые ($n = 35 \div 40\%$), с V_p около 2,0 км/с и невысокими значениями прочности ($R_c = 7 \div 20$ МПа). При прогрессирующем подкислении раствора каолинит растворяется и замещается галлуазитом, образуя полностью переработанную белую породу, очень легкую ($\rho = 1,35$ г/см³), высокопористую ($n = 47\%$), влагоемкую ($W = 21\%$), малопрочную ($R_c = 10$ МПа) и разупрочняющуюся на 50% при водонасыщении, с полностью отсутствующими магнитными свойствами.

Смектитовая зона. Под действием гидрокарбонатных вод с pH 5–6 образуются глинистые минералы группы смектита. Эта зона обнаружена на всех исследованных гидротермальных системах. Смектит псевдоморфно замещает первичные минералы, развивается по вулканическому стеклу, что приводит к снижению физико-механических свойств пород ($R_c = 10 \div 20$ МПа, $V_p = 2$ км/с) и появлению гигроскопической влаги ($W_r = 2 \div 6\%$). Аргиллизированные породы теряют прочность при взаимодействии с водой — размягчаются, в некоторых случаях размокают. Кроме того, смектиты существенно снижают проницаемость пород, несмотря на их высокую пористость ($n = 35 \div 50\%$). Нередко целые массивы вулканогенных пород превращаются в глинистые толщи, причем замещение носит псевдоморфный характер. Зона аргиллизации часто служит верхним экранирующим горизонтом ГМС.

Зона высококремнистых цеолитов. Повышение pH раствора до значений, характерных для щелочной

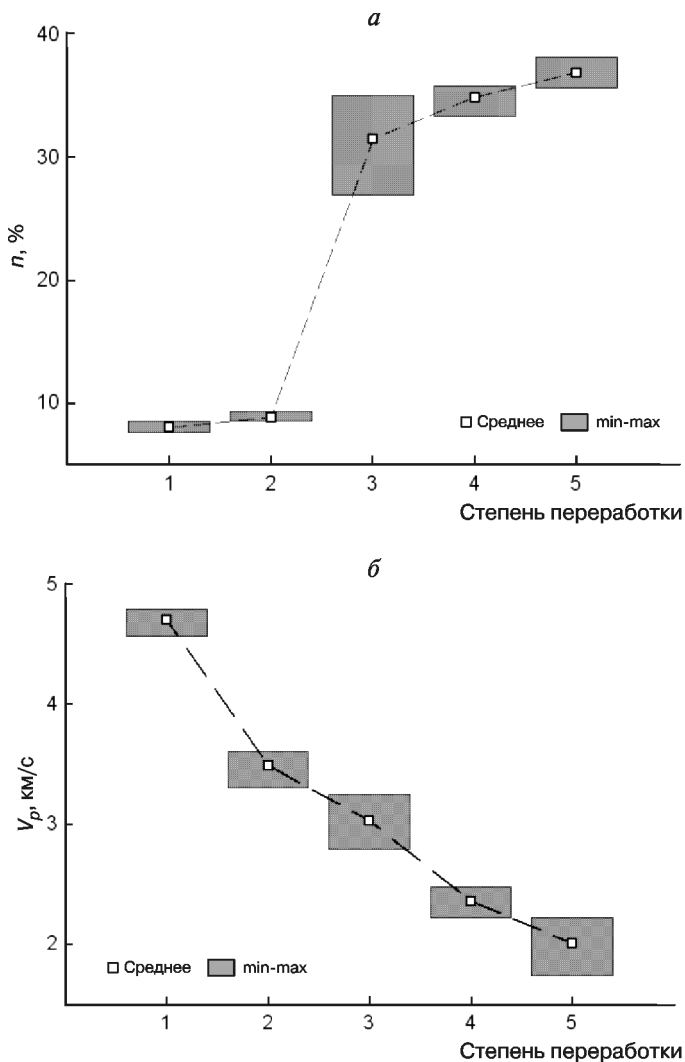


Рис. 3. Изменение свойств андезитов под действием сернокислотного выщелачивания на Верхнекошелевском термальном поле: а — пористость; б — скорость распространения продольных волн; 1 — свежие андезиты (SiO_2 55%); 2 — измененные андезиты (SiO_2 70%); 3–5 — опалиты (SiO_2 86–91%)

среды, приводит к формированию высококремнистых цеолитов в ассоциации со смектитами. Высококремнистые цеолиты (клиноптилолит, морденит, гейландит) часто образуют пленочный цемент в туфах, при этом межобломочное пространство остается пустым. Такие породы высокопористые, с низкими значениями плотности. Они могут быть проницаемыми, но присутствие смектита снижает проницаемость.

Зона цеолитовых пропилитов образуется под действием щелочных растворов с температурой около 200 °С. Эта зона широко развита на Паужетской ГМС, где наблюдается полная переработка туфов в хлорит(корренсит)-ломонтитовую породу с вторичной гранобластово-микроройкилитовой структурой. Это высокопористые ($n=35\div 40\%$), низкопрочные ($Rc < 10$ МПа) породы с аномально низкими значениями $V_p \sim 1$ км/с, что, по-видимому, обусловлено особым микропористым строением хлорит-ломонтитового матрикса породы со слабыми контактами между микрокристаллами, замедляющим время прохождения упругих волн.

В целом цеолитизация и аргиллизация способствуют снижению упруго-плотностных и прочностных показателей, а под действием сернокислотного выщелачивания — в результате развития кремнистых минералов — упругие и прочностные характеристики туфов, напротив, повышаются, несмотря на увеличение пористости.

Фазовое состояние флюида. Особыми с точки зрения термодинамического и геохимического режимов являются области фазового перехода жидкость—пар. Они могут быть приурочены к открытым тектоническим нарушениям, где происходит резкое падение литостатического давления, в результате чего гидротермы закипают; их кипение сопровождается резким снижением температуры. Также кипение может происходить по мере подъема гидротерм к поверхности (при пересечении точки кипения при данных давлении, температуре и составе раствора). Процесс кипения сопровождается потерей тепла и снижением температуры, отделением газовой составляющей, ошелачиванием раствора. Зоны «вскипания» образуются на различной глубине. Они фиксируются кварц-адуляровой, вайрацит-эпидот-кварц-адуляровой минеральными ассоциациями, в основе которых лежит тонко- и криптокристаллический, реже мозаичный кварц и почти всегда адуляр [Структура..., 1993]. Интенсивно окварцованные породы отличаются высокой плотностью ($\rho=2,3\div 2,4$ г/см³), большой прочностью ($Rc > 80-100$ МПа), высокими значениями $V_p=4,0\div 4,2$ км/с и отсутствием магнитных свойств, так как основной породообразующий минерал — кварц — диэлектрик. Между тем противоположное влияние на свойства оказывает наличие крупных пустот выщелачивания, характерных для этой зоны. В этом случае формирование вторичной пористости снижает плотностные ($\rho < 2$ г/см³), упру-

гие ($V_p \sim 3,0\div 3,5$ км/с) и прочностные ($Rc=40$ МПа) характеристики пород.

Продолжительность гидротермального процесса.

Изменчивость свойств пород в пределах ГМС зависит от продолжительности гидротермального процесса. Это видно при сравнении трех хорошо изученных ГМС — Паужетской, Мутновской и Баранского, функционирующих в течение разного времени и находящихся на разных стадиях развития [Рычагов и др., 2005]. ГМС Баранского наиболее молодая и находится на прогрессивной стадии развития. Гидротермальные зоны этой системы (особенно низкотемпературные) характеризуются широким диапазоном значений физико-механических показателей, что обусловлено значительным влиянием первичных петрографических неоднородностей, неравномерностью и незавершенностью гидротермальных преобразований. В пределах одной зоны могут встречаться как неизмененные, так и полностью переработанные породы, обладающие разными свойствами. Мутновская ГМС проходит экстремальную стадию развития. Гидротермальные зоны по петрофизическим показателям обособливаются в отдельные области. Паужетская ГМС — наиболее древняя из рассматриваемых систем. В настоящее время она находится на регрессивной стадии развития, для которой характерно наложение низкотемпературных преобразований на более ранние высокотемпературные. Регрессивному этапу развития соответствует более интенсивный и продолжительный процесс преобразования пород, в результате которого сформировались гидротермальные зоны, однородные по составу и свойствам. Таким образом, в ходе эволюции систем увеличивается разница в свойствах между зонами и возрастает однородность пород внутри каждой зоны.

Выводы. 1. Гидротермально-магматические системы Курило-Камчатской островной дуги сформированы в толщах вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста. Свойства вмещающих пород — эффузивных и вулканогенно-обломочных — изначально заметно различаются. Эффузивные породы характеризуются более высокими значениями плотностных, прочностных и деформационных характеристик; они менее пористые и проницаемые.

2. Спектр термодинамических и физико-химических условий, в которых происходят гидротермальные преобразования, необычайно широк, что приводит к разнообразию формирующихся пород. Вулканогенные породы превращаются в совершенно новые, гидротермально-метасоматические образования — монокварциты, разнообразные пропилиты, цеолитовые образования, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и т.д.

3. Термальные воды, воздействуя на вмещающие породы, приводят к существенным и разнонаправленным изменениям их свойств. Динамика изменения свойств пород при гидротермальном процессе зависит от ряда факторов, основные из них — осо-

бенности первичной породы, *PT*-условия в системе, химический состав и рН флюида, фазовое состояние флюида, продолжительность взаимодействия растворов—порода.

4. Высокотемпературные глубинные растворы, практически независимо от их состава, уплотняют, упрочняют, повышают деформационные характеристики, снижают пористость и проницаемость, удаляют гигроскопическую влагу. Такие изменения свойств наблюдаются как для эффузивных пород, так и для туфов, но у последних они проявляются сильнее. Это происходит вследствие заполнения межобломочного/межкристаллического пространства вторичными минералами, формирования жестких, прочных контак-

тов между зернами/кристаллами, перекристаллизации базиса во вторичный микроагрегат, состоящий из более плотных и прочных минералов.

5. Динамика изменения свойств пород, вызванного воздействием низкотемпературных растворов, сложнее и многообразнее; она может различаться для туфов и эффузивных пород. Существенно влияют на изменение свойств пород при низкотемпературных гидротермальных процессах химический состав и кислотность—щелочность термальных вод.

6. В ходе эволюции ГМС увеличивается дифференциация свойств между гидротермальными зонами и возрастает однородность пород внутри каждой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов В.И., Сугрбов В.М. Геологическая и гидрогеотермическая обстановка геотермальных районов и гидротермальных систем Камчатки // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 5–23.

Грязнов О.Н. Инженерная петрология метасоматитов // Зап. Горного института. 2003. Т. 53. С. 140–143.

Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М.: Наука, 1991. 412 с.

Пилипенко Г.Ф. Современные гидротермальные системы и термальные источники Камчатки // Современные гидротермальные системы и эпитептермальные золото-серебряные месторождения Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1998. С. 8–21.

Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф. и др. Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минерало-рудобразования в ее недрах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 1–19.

Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Гончаренко О.П. и др. Температурный режим вторичного минералообразования и структура температурного поля в недрах гидротермальной системы вулкана Баранского (о-в Итуруп) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 96–112.

Рычагов С.Н., Коробов А.Д., Главатских С.Ф. и др. Эволюция метасоматических процессов в структуре гидротермально-магматических систем островных дуг // Мат-лы междунар. полевого Курило-Камчатского семинара «Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма» 16 июля–6 августа 2005 г. Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 207–216.

Словцов И.Б. Минералого-геохимические критерии физико-химических условий в недрах геотермальных месторождений (на примере Мутновского геотермального месторождения, Камчатка): Автореф. канд. дисс. М., 1994. 28 с.

Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.

Сугрбов В.М. Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона // Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона. М.: Наука, 1982. С. 93–107.

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 // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 11. № 1. С. 158–170.

Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Лучко М.В., Зухубая Д.З. Преобразование вулканогенных пород под действием сернокислотного выщелачивания в приповерхностной зоне современных гидротермальных систем // Мат-лы Междунар. науч. конф. «Актуальные вопросы инженерной геологии и экологической геологии» 25–26 мая, 2010 г. М., 2010. С. 29–30.

Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 48–62.

Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report // Proceed. WGC 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010 / CD-ROM.

Frolova J., Ladygin V., Rychagov S. Geothermal reservoir study through petrophysical data // Geother. Res. Council Transactions. 2001. Vol. 25. P. 401–403.

Frolova J., Ladygin V., Rychagov S. Petrophysical alteration of volcanic rocks in hydrothermal systems of the Kuril-Kamchatka Island Arc // Ibid.

Ladygin V., Frolova J., Rychagov S. Formation of composition and petrophysical properties of hydrothermally altered rocks in geothermal reservoir // Proceed. WGC (Kyushu — Tohoku, Japan, May 28 — June 10). 2000. P. 2695–2699.

Milsch H., Spangenberg E., Raab S. et al. Effects of pressure, temperature, fluid-rock interactions, and phase changes on the physical properties of geothermal reservoir rocks: the experimental perspective // Proceed. WGC. Indonesia, Bali, 2010. CD-ROM.

Sigurdsson O., Gugmundsson A., Fridleifsson G.O. et al. Database on igneous rock properties in Icelandic geothermal systems. Status and unexpected results // Proceed. WGC (Kyushu—Tohoku, Japan, May 28 — June 10). 2000. P. 2881–2887.