<https://doi.org/10.53278/2306-9139-2021-2-17-5-12>
УДК 624.131.43

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПОРОД КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ

ACCORDING TO FORMATION OF PROPERTIES OF HYDROTHERMAL-METASOMATIC ROCKS AT THE KURIL-KAMCHATKA VOLCANIC ARC

© 2021 Ю. В. Фролова

© 2021 J. V. Frolova

*Геологический факультет Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119234, Россия*
Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, 119234 Moscow, Russia

ju_frolova@mail.ru

Аннотация: В статье рассматриваются основные закономерности формирования инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород, образующихся в недрах и на поверхности современных гидротермальных систем в областях активного вулканизма за счет переработки пород вулканического генезиса термальными водами. Анализируются условия образования и последовательные этапы становления различных типов гидротермально-метасоматических пород и соответствующие им тенденции в изменении физических и физико-механических свойств.

Abstract: The article discusses the main regularities of the formation of engineering-geological features of hydrothermal-metasomatic rocks formed inside and on the surface of modern hydrothermal systems in areas of active volcanism due to the processing of the initial rocks of volcanic genesis by thermal waters. The conditions and successive stages of formation of various types of hydrothermal-metasomatic rocks and their corresponding trends in changing physical and mechanical properties are analyzed.

Ключевые слова: гидротермально-метасоматические породы, физико-механические свойства, прочность, вторичные минералы, степень изменения, Курило-Камчатская вулканическая дуга.

Keywords: hydrothermal-metasomatic rocks, physical-mechanical properties, strength, secondary minerals, degree of alteration, Kuril-Kamchatka volcanic arc.

Введение

Важнейшими фундаментальными задачами грунтоведения являются разработка учения о формировании состава, строения, состояния и свойств всего глобального многообразия грунтов верхних горизонтов земной коры, включая грунты различных классов и генетических типов; создание частных и общей теорий формирования грунтов и их свойств, прогноз изменения свойств грунтов под воздействием природных и техногенных причин в будущем [1,7,8]. В этом плане породы гидротермально-метасоматического генезиса представляют собой весьма специфический и малоизученный объект.

Метасоматоз как геологический процесс по его роли в формировании земной коры стоит в одном ряду с гипергенезом, седиментогенезом, магматизмом и метаморфизмом. Под метасоматозом понимается

«всякое замещение горной породы с изменением химического состава», происходящее как в экзогенных, так и в эндогенных условиях, «при котором растворение старых минералов и отложение новых происходит почти одновременно, так что в течение процесса замещения порода все время сохраняет твердое состояние» [2]. Метасоматоз осуществляется под воздействием гидротермальных и надкритических растворов (эндогенный метасоматоз) или поверхностных и вадозных вод (экзогенный метасоматоз), как в прогрессивных так и регрессивных условиях общей направленности, в очень широком диапазоне температур и давления. Несмотря на то, что в общем случае метасоматические процессы могут быть как эндогенными, так и экзогенными, однако к собственно метасоматическим процессам принято относить процессы, связанные с эндоген-

ными силами Земли, а гипергенный метасоматоз выделять в самостоятельную группу [5].

Частным случаем метасоматоза является гидротермальный процесс, широко распространенный в вулканических районах и представляющий собой метасоматическое преобразование пород под воздействием горячих растворов (температура до 400–450°C), возникающих в связи с процессом остывания магмы, внедрившейся в земную кору на небольшой глубине. Растворы, взаимодействующие с вмещающими их породами называют гидротермальными растворами или флюидами, вне зависимости от того, в каком фазовом состоянии (жидком, паробразном или надкритическом) они находятся. Преобразования пород происходят в широком спектре термодинамических и гидрогеохимических условий, что приводит к большому разнообразию формирующихся гидротермально-метасоматических пород как по структурно-минералогическим характеристикам, так и по свойствам. При определенных условиях может измениться даже принадлежность породы к определенному классу или группе грунтов [10,11]. В свою очередь, изменение физико-механических свойств пород в процессе гидротермальной деятельности влечет за собой целый ряд геологических последствий, что отмечается многими специалистами для различных геотермальных районов мира: изменяется рельеф, активизируются эрозионные и обвально-оползневые процессы, происходят деформации поверхности, гидротермальные взрывы, меняется режим и местоположение поверхностных термопроявлений и пр. [11–13]. В связи с этим, происходящее в настоящее время активное освоение геотермальных районов, обусловленное развитием геотермальной энергетики и туризма, должно включать оценку инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в том числе, изучение физико-механических свойств вулканогенных, гидротермально-измененных и гидротермально-метасоматических пород.

Цель работы заключается в выявлении основных закономерностей формирования свойств пород гидротермально-метасоматического генезиса.

Объектом исследования являются породы гидротермально-метасоматического генезиса, образованные в результате переработки вулканогенных толщ в недрах и на поверхности гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в ходе их эволюции в плиоцен-четвертичное время. Основные преобразования пород происходят от поверхности до глубины в несколько сотен метров и первых километров за счет продолжительных гидротермально-метасоматических процессов, про-

исходящих под действием циркулирующих в массиве горячих флюидов с температурой до 300–400°C и выше. При разгрузке парогидротерм на дневной поверхности образуются термальные поля, в пределах которых исходные вулканогенные породы интенсивно изменены и превращены в гидротермальные глины или кремнистые породы (опалиты). С целью выявления основных закономерностей формирования состава и свойств гидротермально-метасоматических пород были рассмотрены последовательные ряды изменений — от исходных вулканогенных пород, вмещающих гидротермальные системы, до продуктов их полного преобразования, к которым относятся вторичные кварциты, пропилиты, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и иные.

Геологические и геотермические условия

Повышенный конвективный тепловой поток Курило-Камчатской вулканической дуги связан с ее расположением в пределах Тихоокеанского «огненного кольца» и тектонической позицией над зоной субдукции. В общем случае, геологические, гидрогеологические и геотермические условия региона благоприятны для формирования гидротермальных систем, однако пространственное распределение геотермических условий крайне неравномерно. Преобладающее число гидротермальных систем расположено в пределах Восточного вулканического пояса, включая Южную Камчатку, и на Большой Курильской гряде. Обычно они приурочены к местам пересечения разломов и располагаются группами, образуя геотермальный районы. В локальном плане большинство из них приурочены к вулканотектоническим депрессиям или сложнопостроенным вулканическим массивам четвертичного возраста, отличающимся многофазовым вулканизмом и наличием экзотических тел кислого состава [4].

Движение воды в гидротермальных системах определяется различием в плотности нагретой и холодной воды. В результате нагрева подземных вод (до 300–400°C и выше), с последующей дифференциацией по плотности вследствие разницы в температуре, устанавливается система их конвективного движения. По мере движения к поверхности термальные воды могут вскипать на различных глубинах, образуя зоны кипения, парообразования, с последующей конденсацией пара и формированием вторичных кислых растворов в приповерхностных горизонтах. За счет вышеперечисленных процессов, а также вследствие взаимодействия растворов с породами, происходит дифференциация их химического состава, возникают разные типы термальных вод, химический состав которых суще-

ственно отличается от первоначального состава глубинных гидротерм [6]. Достигая земной поверхности, восходящие потоки разгружаются в виде различных термопроявлений.

Фактический материал и методика исследования

Исследованы вмещающие породы девяти гидротермальных систем, две из которых расположены на Курильских о-вах (вулкан Баранского, о.Итуруп и Северо-Парамуширская, о. Парамушир), семь — на Камчатском полуострове (Паужетская, Камбальные термальные поля, Кошелевская, Мутновская, Больше-Банная, Гейзерная, Эссовская). Большая часть работ проводилась совместно с Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (в частности, с лабораторией геотермии). Образцы отбирались из керна скважин (максимальной глубиной до 1600 м), естественных обнажений и шурфов, пройденных на термальных полях. Всего исследовано более 1300 образцов.

Лабораторные исследования включали изучение структурно-минералогических особенностей пород (методами оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии) и определение показателей физических, прочностных и деформационных свойств. Для большей части образцов определялись следующие показатели: плотность, плотность твердых частиц, пористость общая и открытая, величина водопоглощения, магнитная восприимчивость, скорости распространения упругих волн, динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона, прочность на одноосное сжатие и растяжение, коэффициент размягчаемости. Экспериментальные исследования осуществлялись в соответствии с национальными стандартами. Подробная методика определений изложена в работах [3,9]. Исследования проведены с использованием оборудования, полученного в рамках реализации Программы развития Московского университета.

Характеристика исходных пород

Вмещающими породами гидротермальных систем Курило-Камчатской дуги являются вулканы неоген-четвертичного возраста, представленные эффузивными и вулканогенно-осадочными образованиями. Эти две группы пород кардинально отличаются по условиям формирования, структурно-пространственной организации и свойствам, несмотря на сходный вещественный состав.

Эффузивные породы образуются в результате остывания и кристаллизации лавы, в ходе которых формируются прочные кристаллизационные контакты между структурными элементами, в качестве которых выступают кристаллы основных породо-

образующих минералов (плагноклазы, пироксены, амфиболы, полевые шпаты, реже оливины). Помимо этого, микролиты основной массы прочно скреплены вулканическим стеклом, представляющим собой аморфную фазу. Это обеспечивает высокие значения плотности ($\rho=2.3-2.8$ г/см³), прочности ($R_c=50-250$ МПа) и деформационных характеристик ($V_p>4.0$ км/с; $E_d>30-50$ ГПа) (рис. 1). Эффузивные породы невлагоемкие, негигроскопичные, неразмягчаемые при водонасыщении. Следует отметить, что по своей природе физико-механические свойства эффузивных пород являются сингенетическими, то есть формируются одновременно с образованием породы и в дальнейшем меняются незначительно.

В отличие от эффузивов, вулканогенно-осадочные породы образуются в ходе продолжительной литификации изначально рыхлых пирокластических отложений, сформированных в результате эксплозивной деятельности вулканов. С течением времени пирокластический материал уплотняется, взаимодействует с поровыми растворами, цементируется. Между обломками формируются контакты цементационного типа. В качестве цемента обычно выступает глинисто-кремнеземистое вещество, при участии карбонатов, образующееся в результате раскристаллизации вулканического стекла в процессе регионального эпигенеза. Вулканогенно-осадочные породы крайне неоднородны по физико-механическим свойствам в зависимости от состава и размерности слагающих их обломков, типа и состава цемента, степени литификации. По своей природе их свойства являются эпигенетическими, поскольку формируются в ходе длительного процесса вулканогенно-осадочного литогенеза. Именно поэтому вулканогенно-осадочные породы неогенового возраста более уплотнены и литифицированы и, соответственно, характеризуются более высокими значениями свойств по сравнению с плейстоценовыми аналогами (см. рис. 1).

В целом, вулканогенно-осадочные породы перерабатываются легче и быстрее по сравнению с эффузивами, а показатели их плотностных, деформационных и прочностных свойств существенно ниже. Обобщенный ряд пород по мере повышения устойчивости к воздействию гидротерм выглядит следующим образом: туфы пемзо- и витрокластические → туфы кристалло- и литокластические → эффузивные породы пористые стекловатые → эффузивные породы массивные полнокристаллические (рис. 2).

Формирование гидротермально-метасоматических пород в пределах современных гидротермальных систем

В пределах гидротермальных систем вулканогенные породы подвергаются воздействию термальных

Рис. 1. Обобщенный ряд вулканогенных пород по мере повышения их устойчивости к воздействию гидротерм.

вод и пара, циркулирующих по порово-трещинному пространству, а также образующих малоподвижные поровые растворы, в результате чего они испытывают существенные изменения химического и минерального составов, структурно-текстурных

особенностей, морфологии порового пространства, вплоть до превращения в гидротермально-метасоматические породы — вторичные кварциты, пропилиты, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты, обладающие иными физическими и физико-механическими свойствами по сравнению с исходными вулканиитами (табл.).

Гидротермально-метасоматические реакции протекают постепенно по мере взаимодействия «раствор-порода». При этом скорость реакций, интенсивность изменения исходных пород, конечный продукт гидротермального процесса зависят от ряда факторов, главными среди которых являются особенности исходных пород, температура, кислотность-щелочность, химический и агрегатный состав термальных флюидов, давление, продолжительность взаимодействия флюида с вмещающими породами.

Процесс преобразования включает следующие процессы: (1) выщелачивание и разрушение первичных минералов; (2) кристаллизацию вторичных минералов в порах и трещинах; (3) метасоматическое замещение первичных минералов вторичными, более устойчивыми в изменившихся условиях. От

Рис. 2. Гистограммы распределения показателей свойств эффузивных и туфогенных пород: а — плотность, б — пористость, в — скорость распространения продольных волн, г — прочность на одноосное сжатие.

Таблица. Физические и физико-механические свойства гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона

Условия образования пород		Низкотемпературные (T<250°C)				Средне-высокотемпературные (T>250°C)		Вскипание гидротерм	
Порода / показатель свойств		Опалиты	Аргиллизиты	Низкотемпературные пропилиты			Среднетемпературные пропилиты	Вторичные кварциты	Кварц-адюляровые метасоматиты
				Цеолитовые пропилиты	Аргиллизированные трансильванские пропилиты	Трансильванские пропилиты			
Плотность ρ, г/см³		1.71 1.32–2.14	1.53 0.99–1.97	1.57 1.30–1.91	1.93 1.72–2.19	2.17 2.0–2.33	2.63 2.42–2.80	2.52 2.45–2.75	2.30 2.0–2.70
Плотность твердых частиц ρs, г/см³		2.53 2.3–2.86	2.61 2.33–2.82	2.63 2.56–2.73	2.80 2.64–2.91	2.82 2.72–2.88	2.77 2.64–2.89	2.85 2.77–2.93	2.74 2.62–2.85
Пористость п. %		35 23–51	43 21–66	41 28–50	31 23–41	24 19–28	6 0.4–16	13 9–15	16 10–23
Величина водопоглощения Wп.%		18 8–31	23 14–48	21 12–28	12 7–17	7 4–11	1 0.1–5	3 2–4	4 0.3–10
Скорость продольных волн. Vр км/с		2.35 1.35–3.55	2.1 1.35–3.2	0.95 0.6–1.65	2.1 1.05–2.8	3.3 2.65–3.7	5.05 3.8–6.0	4.3 3.85–5.15	4.4 3.85–5.0
Модуль упругости (динамический) Ед. ГПа		10.5 2.9–19.0	6.5 2.1–14.2	-	10.8 8.1–15.1	20.9 16.1–25.7	57.5 32.3–81.6	39.8 30.2–46.6	40.0 32.5–50.4
Коэффициент Пуассона μ, д.ед.		0.23 0.10–0.35	0.27 0.20–0.37	-	0.13 0.08–0.20	0.16 0.10–0.21	0.21 0.14–0.29	0.21 0.11–0.28	0.19 0.10–0.27
Прочность на одноосное сжатие. МПа	Rс	30 3–84	12 3–27	5 1–11	21 7–38	41 24–60	128 62–210	113 77–158	114 78–196
	Rсв	18 2–58	6 0.8–18	3 0.6–6	10 1–19	29 9–47	120 57–180	81 60–116	88 64–123
Коэффициент размягчаемости Кразм. МПа		0.69 0.24–1.0	0.41 0.11–0.63	0.53 0.18–0.83	0.50 0.21–0.73	0.73 0.48–0.94	0.77 0.57–1.0	0.75 0.62–0.99	0.79 0.62–1.0
Прочность на растяжение Rр. МПа		3.4 0.6–9	2.1 1.3–3.4	0.3 0.01–1.5	2.8 0.4–6	6.5 4–9.9	12 6–21	16	8 2–17
Кол-во образцов		124	41	39	41	21	162	9	27

Рис. 3. Обобщенная зависимость физико-механических свойств гидротермально-метасоматических пород от температуры гидротерм.

сочетания и кинетики этих процессов в большой степени зависит динамика изменения свойств пород.

Для каждой гидротермально-метасоматической породы рассмотрим последовательный ряд и стадии ее образования и показана динамика изменения свойств.

На начальном этапе гидротермальной переработки происходит раскристаллизация вулканического стекла, которое представляет собой аморфное вещество и является самым термодинамически неустойчивым компонентом. Оно содержит порядка 50–60% кремнезема, глинозем, железо, магний, щелочные и щелочноземельные металлы и ряд других элементов, которые при раскристаллизации могут участвовать в образовании самых различных вторичных минералов. Кроме того, при определенных условиях данные компоненты могут выщелачиваться, переноситься растворами и отлагаться в порово-трещинном пространстве в виде различных минеральных фаз. Соответственно, в эффузивных породах на первой стадии преобразуется вулканическое стекло, располагающееся в интерстициях между микролитами основной массы. В туфогенных породах в первую очередь изменяются пемзовые обломки и витрокласты. Одновременно с раскристаллизацией стекла начинаются преобразования кристаллов, но существенно в меньшей степени. Кристаллы, как правило, достаточно устойчивы к воздействию термальных растворов, однако они практически всегда содержат различные дефекты

в виде трещинок спайности, микропор, нарушений кристаллической решетки, газовой-жидких включений, включений вулканического стекла и иных. Изменения кристаллов начинаются в местах дефектов, постепенно распространяясь на окружающие участки и захватывая большие объемы. Таким образом, для начальной стадии преобразования характерно замещение большей части вулканического стекла и начальные изменения кристаллов. Общее количество вторичных минералов у слабоизмененных пород не превышает 25–30%. При этом свойства меняются в незначительной степени, и в основном они по-прежнему зависят от петрографических особенностей исходных пород.

На втором этапе, при усилении степени переработки, вулканическое стекло полностью замещается вторичными минералами (в туфах это витро- и пемзокласты, а также стекловатый базис литокласт). Кристаллы преобразованы частично, причем более устойчивыми являются кислые плагиоклазы и клинопироксены, а менее устойчивыми — основные плагиоклазы, оливин, ромбические пироксены. Встречающиеся в туфогенных породах зерна кварца преобразования не подвержены. Общее количество вторичных минералов у среднеизмененных пород колеблется в диапазоне от 25–30% до 70–75%. Свойства изменяются в значительной степени. При этом основными факторами, влияющими на свойства, являются тип, количество и форма выделения вторичных минералов, однако по-прежнему оказывают свое влияние и первичные петрографические особенности, поскольку сохраняются реликты исходных пород.

На заключительном этапе, при продолжительном воздействии термальных вод, происходит полная минеральная перестройка вулканитов и их превращение в гидротермально-метасоматические породы с новым минеральным составом, но как правило с псевдоморфной структурой, унаследованной от исходной породы. Так в гидротермально-метасоматических породах, образованных по эффузивам, сохраняются порфиновые структуры, а по туфогенным породам — обломочные. При этом микростроение пород может претерпевать кардинальные изменения. Свойства новообразованных гидротермально-метасоматических пород полностью определяются вторичными минералами — их составом, количественными соотношениями, формой выделения, а также структурными характеристиками и вторичной пористостью. Исходная структура обычно идентифицируется благодаря псевдоморфозам вторичных минералов по компонентам первичных пород, однако вследствие глубокой степени перекристаллизации (> 70%), пер-

вичные особенности практически не влияют на свойства новообразованных метасоматитов.

Хотя скорость минералогических преобразований и динамика изменения свойств в ходе гидротермально-метасоматических процессов различны для эффузивных и вулканогенно-осадочных пород, свойства образующихся в конечном итоге пород идентичны.

Одним из главных факторов, влияющих на особенности переработки пород и динамику изменения свойств, является температура гидротерм (рис. 3). Средне-высокотемпературные глубинные растворы ($T > 250^{\circ}\text{C}$), независимо от их химического состава, оказывают позитивное влияние на изменение показателей физико-механических свойств пород, вызывая уплотнение, упрочнение, снижение пористости и деформируемости. Это происходит, во-первых, вследствие выпадения из растворов и кристаллизации вторичных минералов в пустотном пространстве с закономерным снижением пористости, а во-вторых, за счет замещения первичных компонентов породы прочным кристаллическим агрегатом, состоящим из крепко сложенных зерен кварца, полевых шпатов, эпидота, слюды и некоторых других минералов с кристаллизационными и кристаллизационно-цементационными контактами между ними. В целом, гидротермально-метасоматические породы, образованные под действием глубинных высокотемпературных растворов (вторичные кварциты и среднетемпературные пропилиты), относятся к скальным грунтам — плотным и очень плотным, низко- и среднепористым, прочным и очень прочным, большей частью неразмягчаемым.

Динамика изменений свойств пород в результате воздействия низкотемпературных растворов ($T < 250^{\circ}\text{C}$) неоднозначна, хотя в целом превалирует тенденция снижения плотностных, прочностных и деформационных характеристик. Это обусловлено, во-первых, преобладанием процесса выщелачивания и формированием вторичной пористости, а во-вторых — составом вторичных минералов, среди которых большая роль принадлежит глинистым минералам и цеолитам. В результате, помимо фазовых контактов (кристаллизационно-цементационного типа), характерных для скальных грунтов, формируется некоторое число контактов переходного типа, которые существенно ослабляют породы. У пород, образованных под воздействием низкотемпературных растворов, прочность R_c не превышает 50 МПа, $V_p < 3,5$ км/с, плотность $\rho < 2,2$ г/см³, пористость $n > 20\%$. Низкотемпературные гидротермалиты, как правило, неводостойки — при взаимодействии с водой большинство из них размягчаются, а в некоторых случаях (при высоком содержании

глинистых минералов) даже размокают. Породы, сформированные под воздействием низкотемпературных гидротерм (опалиты, аргиллизиты, низкотемпературные пропилиты — цеолитовые, аргиллизированные, трансильванские), могут относиться как к скальным, так и к полускальным грунтам — средней плотности, сильнопористым, размягчаемым (см. табл.). На термальных полях в приповерхностном горизонте в результате процессов аргиллизации вулканогенные породы преобразуются в гидротермальные глины, относящиеся к группе дисперсных связных грунтов.

Особыми, с точки зрения термодинамических и геохимических условий, являются зоны фазового перехода «жидкость–пар», возникающие в гидротермальной системе на разных глубинах, где в результате процессов кипения, парообразования и последующей конденсации образуются разные типы термальных вод, что отражается на особенностях вторичного минералообразования и свойствах пород. Они фиксируются кварц-адуляровой минерализацией, которая обеспечивает высокую плотность ($\rho = 2.0\text{--}2.70$ г/см³), прочность (R_c ср >100 МПа) и деформационные характеристики (V_p ср >4 км/с; E_d ср ~ 40 ГПа) за счет прочной цементации новообразованных кварцевых зерен (см. табл.).

Заключение

Гидротермально-метасоматические породы, формирующиеся в результате переработки вулканогенных толщ в недрах и на поверхности гидротермальных систем в районах вулканической активности, отличаются большим разнообразием инженерно-геологических особенностей, вплоть до принадлежности к грунтам различных классов и групп — скальным, полускальным и связным дисперсным. Это обусловлено пространственно-временной изменчивостью термодинамических и гидрогеохимических условий

в гидротермальных системах, приводящей к различным сочетаниям, кинетике процессов выщелачивания, осаждения и замещения при взаимодействии «раствор-порода», многообразию структурно-минералогических преобразований, трансформации структурных связей и, как следствие, разнонаправленному изменению физико-механических свойств пород.

Исходные породы, представленные эффузивными и вулканогенно-осадочными генетическими типами, отличаются по скорости преобразований и динамике изменения свойств, однако в случае продолжительного взаимодействия «раствор-порода», в конечном итоге, это не отражается на инженерно-геологических особенностях формирующихся гидротермально-метасоматических пород.

Установлено, что средне-высокотемпературные глубинные растворы, независимо от их химического состава, вызывают «позитивные» изменения свойств с формированием плотных, прочных, слабodeформируемых пород, относящихся к группе скальных грунтов. Воздействие низкотемпературных растворов приводит к существенно различным сценариям, хотя в целом преобладает «негативная» тенденция в изменении свойств. Формирующиеся породы могут относиться к группам скальных, полускальных и дисперсных связных грунтов. Среди низкотемпературных разновидностей преобладают грунты средней плотности, сильнопористые, преимущественно малой, пониженной и низкой прочности, размягчаемые. «Негативные» инженерно-геологические характеристики низкотемпературных метасоматитов обусловлены преобладанием процесса выщелачивания, а также высоким содержанием глинистых и цеолитовых минералов, за счет которых, помимо характерных для скальных грунтов фазовых контактов, формируются контакты переходного типа, существенно ослабляющие породы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная геология России. Т.1. Грунты России / Под ред. В. Т. Трофимова, Е. А. Вознесенского, В. А. Королева М.: КДУ, 2011, 672 с.
2. Коржинский Д. С. Основы метасоматизма и метамагматизма. М.: Наука, 1993. 235 с.
3. Лабораторные работы по грунтоведению: уч. пособие / Под ред. В. Т. Трофимова и В. А. Королева, изд. 3-е испр. и доп. М.: КДУ, 2017, 654 с.
4. Леонов В. Л. Региональные структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2001, № 5, С. 32–47.
5. Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. В. А. Жарикова, В. Л. Русинова. М.: Научный мир, 1998, 492 с.
6. Набоко С. И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях М.: Изд-во АН СССР, 1963, 172 с.
7. Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы. М.: Недра, 1985, 332 с.
8. Трофимов В. Т. Теоретические аспекты инженерной геологии. М.: Геомаркетинг, 2019, 280 с.
9. Фролова Ю. В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения. М.: КДУ, 2015, 222 с.

- ISBN 978-5-906226-72-3.
10. Фролова Ю. В., Ладыгин В. М., Рычагов С. Н. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология, 2011, №1, С.48–64.
 11. Frolova J., Ladygin V., Rychagov S., Zukhubaya D. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc // Engineering Geology. Elsevier BV (Netherlands). 2014, Vol.183, P. 80–95, DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.10.011
 12. Huang S., Tian T. Study of environmental impact in geothermal development and utilization // Proceedings of the 7th Asian Geothermal Symposium. July 25–26, 2006, P.35–44.
 13. Lawless J. L., Brown P. R. L. Hydrothermal eruptions: mechanisms and implications for prediction // Proceedings 23th New Zealand Geothermal Workshop, 2001, P. 51–56.