

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи



Фролова Юлия Владимировна

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ
ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПОРОД
(НА ПРИМЕРЕ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ)**

Специальность:

1.6.7 - Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты:

Бычков Андрей Юрьевич,

доктор геолого-минералогических наук, доцент,
профессор РАН, ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени
М.В. Ломоносова», геологический факультет,
кафедра геохимии, профессор

Петров Владислав Александрович,

доктор геолого-минералогических наук,
член-корреспондент РАН,
ФГБУН «Институт геологии рудных
месторождений, петрографии, минералогии и
геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН)»,
директор

Фоменко Игорь Константинович,

доктор геолого-минералогических наук,
ФГБОУ ВО «Российский государственный
геологоразведочный университет имени Серго
Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ),
гидрогеологический факультет, кафедра
инженерной геологии, профессор

Защита диссертации состоится 26 мая 2022 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1(МГУ.04.01) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д. 1, главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/434724652/>

Автореферат разослан 18 марта 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Н.А. Харитонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей фундаментальной задачей инженерной геологии и ее научного направления – грунтоведения, является разработка учения о формировании состава, строения, состояния и свойств всего глобального многообразия грунтов верхних горизонтов земной коры. В этом плане породы гидротермально-метасоматического генезиса представляют собой весьма специфический и малоизученный инженерно-геологический объект.

Метасоматоз по его масштабу и роли в формировании земной коры находится в одном ряду с литогенезом, магматизмом и метаморфизмом. Его частным случаем является гидротермальный процесс, широко распространенный в вулканических областях и представляющий собой преобразование горных пород под действием горячих флюидов с температурой до 300-400°C и выше, локализованный в пределах гидротермальных систем (ГТС). Термальные флюиды в значительной степени изменяют химико-минеральный состав и структурно-текстурные характеристики вмещающих пород, что отражается на их физических и физико-механических свойствах. Широкий спектр термодинамических и гидрогеохимических условий приводит к большому разнообразию формирующихся гидротермальных метасоматитов, среди которых наиболее распространены вторичные кварциты, пропилиты, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и иные породы, крайне различные по своим инженерно-геологическим характеристикам. В свою очередь, изменение физико-механических свойств пород влечет за собой ряд геологических последствий, в том числе и опасных, на что указывают многие специалисты для различных геотермальных районов мира.

Помимо инженерно-геологических задач, знания о свойствах, представляющих собой количественные показатели физического и механического состояния горных пород, и понимание динамики их изменения во времени и пространстве, способствуют решению более общих фундаментальных геологических проблем, касающихся условий образования, эволюции и строения гидротермальных систем, механизмов эпи- и мезотермального минерало- и рудообразования и иных.

Применяемый в диссертационной работе комплексный подход к исследованию гидротермально-метасоматического процесса, заключающийся в совместном анализе минералого-петрографических и инженерно-геологических

данных, позволяет получать качественно новую информацию о гидротермальных системах и образующихся в их недрах геотермальных месторождениях.

Степень разработанности. К настоящему времени накоплен большой объем данных о гидротермально-метасоматических породах, охватывающий минералого-геохимические и петрологические аспекты. Что касается инженерно-геологической информации, то несмотря на значительное число научных работ по отдельным гидротермальным системам и геотермальным районам мира, практически отсутствуют обобщающие работы, в которых были бы сформулированы общие закономерности изменения свойств пород под действием гидротермальных процессов и оценено их влияние на весь комплекс инженерно-геологических условий территории.

В представленной диссертации на основе обобщения частных закономерностей, полученных при изучении отдельных гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов, установлены общие закономерности формирования инженерно-геологических особенностей гидротермально-метасоматических пород и показана роль гидротермальных преобразований в изменении всего комплекса инженерно-геологических условий геотермальных районов.

Закономерности, выявленные для гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги, могут быть экстраполированы на аналогичные районы других вулканических областей. Тем самым проведенные исследования вносят существенный вклад в область знаний о гидротермально-метасоматических породах в целом и их инженерно-геологических особенностях, в частности.

Цель работы: установление закономерностей формирования инженерно-геологических особенностей пород гидротермально-метасоматического генезиса в вулканических областях.

Главные задачи, поставленные в работе:

1. Выявить закономерности формирования состава, строения и свойств пород в недрах и на поверхности гидротермальных систем Курило-Камчатского региона в процессе их эволюции в четвертичное время.
2. Установить основные факторы и создать обобщенную модель формирования свойств гидротермально-метасоматических пород, систематизирующую информацию об исходных породах, условиях и стадиях их

преобразования, динамике изменения свойств и инженерно-геологических особенностях новообразованных пород.

3. Рассмотреть особенности изменения состава, строения и свойств пород в разрезе современных гидротермальных систем и выявить принципиальные отличия от региональных вулканогенно-осадочных толщ.

4. Обосновать роль гидротермальных преобразований как важнейшего фактора формирования инженерно-геологических условий геотермальных районов.

Объектом исследования являются породы гидротермально-метасоматического генезиса, образованные в результате переработки вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста в недрах и на поверхности гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги. В диссертации рассматриваются последовательные ряды изменений – от исходных вулканогенно-осадочных и эффузивных пород, вмещающих гидротермальные системы, до продуктов их полного преобразования, к которым относятся вторичные кварциты, пропилиты, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты и иные.

Фактический материал был собран автором в результате многолетних исследований на гидротермальных системах Камчатки и Курильских островов, значительная часть которых проходила в рамках совместных работ с лабораторией геотермии ИВиС ДВО РАН. Автор лично участвовала в полевых работах на Паужетской, Кошелевской, Мутновской, Эссовской, Баранского, Гейзерной, Больше-Банной ГТС и Камбальных термальных полях (т/п). В собранной коллекции каменного материала представлены образцы вулканогенных пород и продуктов их гидротермально-метасоматического изменения, отобранные из керна скважин, шурфов и коренных обнажений. Часть образцов была предоставлена коллегами (С.Н. Рычаговым, В.М. Ладыгиным, М.С. Черновым). В общей сложности исследовано более 1300 образцов.

Личный вклад автора определяется участием на всех этапах исследований, включая полевые работы (маршрутные исследования, сбор коллекции образцов, первичная обработка материалов), лабораторные испытания (пробоподготовка, определение показателей физических и физико-механических свойств, описание шлифов, совместные в операторами микрозондовые исследования), обработку, анализ и обобщение данных, в результате которых был получен большой объем новой информации и установлены соответствующие закономерности.

Научная новизна

1. На основе обобщения и анализа представительного объема полевых и экспериментальных данных выявлены основные закономерности формирования состава, строения и свойств пород в недрах гидротермальных систем Курило-Камчатского региона в процессе их эволюции в четвертичное время:

а) Установлены последовательные стадии структурно-минералогических преобразований эффузивных и вулканогенно-осадочных пород при различных термодинамических и гидрогеохимических условиях, на каждой из которой впервые показана динамика изменения физико-механических свойств.

б) Впервые всесторонне охарактеризованы инженерно-геологические особенности различных типов гидротермально-метасоматических пород - опалитов, аргиллизитов, низко- и среднетемпературных пропилитов, вторичных кварцитов, кварц-адуляровых метасоматитов.

в) Разработана новая инженерно-геологическая классификация гидротермально-метасоматических пород вулканических областей.

2. Выявлена неизвестная ранее зависимость динамики изменения физико-механических свойств пород при гидротермально-метасоматических процессах от ряда геологических факторов. Показано, что средне-высокотемпературные глубинные растворы ($T \geq 250^\circ\text{C}$) преобразуют как эффузивные, так и вулканогенно-осадочные породы в плотные, прочные, слабдеформируемые гидротермальные метасоматиты, относящиеся к скальным грунтам, тогда как низкотемпературные растворы ($T < 200-250^\circ\text{C}$) приводят к формированию скальных, полускальных и дисперсных грунтов с пониженными показателями свойств относительно исходных пород.

3. Предложена оригинальная модель формирования физико-механических свойств гидротермально-метасоматических пород, в которой обобщена и систематизирована информация об исходных породах, условиях и стадиях их преобразования, динамике изменения свойств и инженерно-геологических особенностях новообразованных пород.

4. На примере опорных разрезов Курило-Камчатской вулканической дуги впервые доказан зональный характер изменения физико-механических свойств пород в разрезе современных гидротермальных систем, кардинально отличающийся от их плавного повышения с глубиной в региональных вулканогенно-осадочных толщах.

5. Впервые установлено, что в ходе эволюции гидротермальной системы происходит дифференциация пород по свойствам в соответствии с формирующимися гидротермально-метасоматическими зонами.

6. Впервые обоснована роль гидротермальных преобразований пород как одного из важнейших факторов формирования инженерно-геологических условий геотермальных районов.

Теоретическая и практическая значимость работы. В XXI веке возросла мировая потребность в использовании альтернативных источников тепла и электроэнергии, одним из которых является геотермальная энергия. В настоящее время практическое использование геотермальных ресурсов приняло промышленные масштабы: в 30 странах ведется эксплуатация геотермальных месторождений для получения электроэнергии; в 88 странах термальные воды используют для отопления жилых зданий, промышленных комплексов и целых районов.

В России наиболее благоприятными регионами для развития геотермальной энергетики являются Камчатка и Курильские острова, на территории которых разведаны десятки геотермальных месторождений, построено несколько тепловых и электрических станций, функционируют рекреационные зоны и тепличные хозяйства, проложены туристические маршруты. Вполне закономерно, что хозяйственное и туристическое освоение геотермальных районов предполагает изучение их инженерно-геологических условий, включая оценку физико-механических свойств распространенных на соответствующих территориях горных пород, динамику их изменения вследствие гидротермальных преобразований и возникающие в связи с этим геологические процессы.

Созданная автором база данных, содержащая информацию об инженерно-геологических характеристиках вулканогенных пород и продуктов их гидротермальной переработки, является основой для решения ряда теоретических и практических задач инженерной геологии, возникающих при освоении геотермальных районов. Выявленные специфические инженерно-геологические особенности гидротермально-измененных толщ, в составе которых одновременно могут присутствовать скальные, полускальные и дисперсные грунты, должны быть приняты во внимание при выборе методики изучения грунтов, и в целом, при проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений в геотермальных районах.

Повышенная вероятность возникновения опасных геологических процессов, связанных с гидротермальной переработкой пород, должна учитываться при планировании инженерно-хозяйственной деятельности и туристических маршрутов. Для надежного моделирования и прогноза развития этих процессов необходимы данные о физико-механических свойствах исходных вулканогенных, гидротермально измененных и гидротермально-метасоматических пород, информация об их пространственном расположении в разрезах гидротермальных систем и динамике изменения свойств.

Таким образом, полученные данные и выявленные закономерности представляют теоретическую значимость, а также имеют практический выход в связи с инженерно-хозяйственным освоением и туристическим развитием геотермальных районов.

Методология и методы исследования. В основу исследований положен историко-геологический методологический подход, предложенный и обоснованный для целей грунтоведения *М.М.Филатовым (1938)* и развиваемый впоследствии многими учеными, согласно которому инженерно-геологические особенности горных пород определяются их генезисом и всей совокупностью постгенетических процессов. В связи с этим в диссертационной работе рассматриваются последовательные ряды гидротермальных преобразований пород при различных условиях и анализируется соответствующая им динамика изменения свойств.

Исследования проводились в соответствии со стандартным алгоритмом действий, применяемым в геологических науках: полевые работы с отбором образцов → лабораторные исследования → создание базы данных → обработка, анализ и синтез данных → выявление частных и общих закономерностей → теоретическое обобщение.

В рамках полевых работ проводились маршрутные исследования с отбором образцов, представляющих собой последовательные ряды пород по степени изменения. Лабораторные исследования включали изучение структурно-минералогических особенностей пород (оптическая и электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, компьютерная микротомография) и определение показателей физических, деформационных и прочностных свойств (*Фролова, 2015*).

Основные защищаемые положения:

1. В результате преобразования вулканогенных толщ в пределах гидротермальных систем формируются новые типы грунтов гидротермально-метасоматического генезиса: плотные, прочные скальные разновидности в недрах систем (вторичные кварциты, пропилиты, кварц-адуляровые метасоматиты), полускальные в приповерхностных горизонтах (аргиллизированные пропилиты, аргиллизиты) и дисперсные на термальных полях (гидротермальные глины). Многообразие их инженерно-геологических особенностей обусловлено пространственно-временной изменчивостью термодинамических и гидрогеохимических условий в системе, приводящей к различному сочетанию процессов выщелачивания, осаждения и замещения при взаимодействии «раствор-порода», разнообразию структурно-минералогических преобразований, трансформации структурных связей и различной динамике изменения свойств пород.

2. Основным фактором динамики изменения физико-механических свойств пород при гидротермальном метасоматозе является температура растворов: средне-высокотемпературные глубинные растворы ($T > 250^{\circ}\text{C}$) преобразуют как эффузивные, так и вулканогенно-осадочные породы в новые виды скальных грунтов с высокими прочностными и деформационными характеристиками за счет новообразованных жестких фазовых контактов; низкотемпературные растворы ($T < 200-250^{\circ}\text{C}$) приводят к формированию метасоматитов с пониженными физико-механическими характеристиками, соответствующим скальным, полускальным или дисперсным грунтам в зависимости от соотношения долей фазовых контактов и образованных при участии глинистых минералов контактов переходного типа.

3. Для вулканогенно-осадочных толщ, локализованных в пределах гидротермальных систем, в отличие от региональных разрезов, характеризующихся относительно плавным увеличением физико-механических свойств пород с глубиной по мере повышения литостатического давления, установлен зональный характер изменения свойств, формирующийся в соответствии с минералогической зональностью и степенью переработки пород.

4. Масштабные преобразования пород в геотермальных районах влияют на все компоненты их инженерно-геологических условий, наиболее контрастно проявляясь в изменениях состава и свойств пород, рельефа, местоположения и режима термопроявлений и активизации геологических процессов (эрозионных, обвально-оползневых), связанных в своем развитии в парагенетические ряды.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность научных результатов подтверждается применением стандартных методик инженерно-геологических исследований; использованием для лабораторных испытаний современного оборудования, проходящего ежегодные метрологические поверки, в том числе приобретенного в рамках реализации Программы развития Московского университета; представительным количеством исследованных образцов (более 1300); использованием классических методов статистической обработки экспериментальных данных (ПО «STATISTICA-10).

Основные теоретические положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на отечественных и международных конференциях: 32-м и 33-м Международном геологическом конгрессе, IGC (Флоренция, Италия 2004; Осло, Норвегия, 2008); Всемирном геотермальном конгрессе, WGC (Япония 2000; Турция, 2005; Индонезия, 2010; Австралия (публикация), 2015; Исландия, 2020+1); Генеральной Ассамблее Европейского Союза Наук о Земле, EGU (Ницца, Франция, 2004); Десятом Международном симпозиуме «Взаимодействие вода-порода», WRI-10 (Италия, 2001); 3-6-ой, 8-10-ой, 16-ой, 18-19-ой Ежегодной Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» (Москва, 2001, 2003-05, 2007-09, 2015, 2017, 2018); Седьмом Северном симпозиуме по петрофизике, NSP-7 (Акуйрейри, Исландия, 2002); Международном геотермальном научно-техническом семинаре (Петропавловск-Камчатский, 2004); Международном полевом Курило-Камчатском семинаре «Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма» (Петропавловск-Камчатский, 2005); Международной конференции по извлечению минеральных ресурсов из геотермальных растворов, MEGB (Тусон, США, 2006); Совете по геотермальным ресурсам, GRC (Сан-Диего, США, 2006); Международном семинаре по проекту научного бурения на Мутновском вулкане (Петропавловск-Камчатский, 2006); IV Всероссийском симпозиуме по вулканологии и палеовулканологии (Петропавловск-Камчатский, 2009); Международной научной конференции «Актуальные вопросы инженерной и экологической геологии» (Москва, 2010); XII Конгрессе Международной ассоциации инженер-геологов, IAEG XII Congress (Турин, Италия, 2014); Сергеевских чтениях «Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе» (Москва, 2014); Международном семинаре «Вулканические породы и грунты», VR&S-2015 (о. Искья, Италия, 2015); Третьем Российском совещании по глинам и глинистым минералам, ГЛИНЫ-2015 (Москва, 2015); Ежегодной научной

конференции, посвященной Дню Вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (Петропавловск-Камчатский, 2016-2021); Шестнадцатом Международном симпозиуме «Взаимодействие вода-порода», WRI-16 (Томск, 2019 - публикация); Международной конференции «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» (Москва, 2021).

Публикации автора по теме диссертации. Автором лично и в соавторстве опубликовано более 120 работ. Основные идеи и положения диссертации изложены в 84 научных статьях, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, автором опубликовано 29 статей. Во всех работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основополагающий вклад, включая непосредственное участие в сборе полевых материалов, выполнении лабораторных исследований, обработке, анализе и обобщении данных, подготовке текстов. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в журналах, индексируемых в международных базах SCOPUS, WoS, RSCI: «Bulletin of Engineering Geology and the Environment», «Engineering Geology», «Вестник Московского университета. Серия 4. Геология» / «Moscow University Geology Bulletin», «Инженерная геология», «Вулканология и сейсмология» / «Journal of Volcanology and Seismology», «Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология», «Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле», «Физика Земли».

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность всему коллективу кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ за помощь и поддержку на всем протяжении подготовки диссертационной работы. Глубокая благодарность заведующему кафедры профессору В.Т. Трофимову за создание благоприятной рабочей обстановки; профессорам В.А. Королеву, Е.А. Вознесенскому, Е.Н. Самарину за ценные советы, замечания и рекомендации; к.г.-м.н. С.К. Николаевой и к.г.-м.н. В.В. Фуниковой за помощь в решении организационных вопросов. Особую благодарность за многолетнее плодотворное сотрудничество, научное общение, совместные полевые работы на уникальных объектах Камчатки и надежную поддержку во всех научных начинаниях автор выражает к.г.-м.н. В.М. Ладыгину – наставнику и учителю, который в большой мере способствовал становлению автора в специальности. Отдельная благодарность профессору Г.А. Голодковской - научному руководителю кандидатской

диссертации автора, опыт общения с которой был бесценным для формирования научного мировоззрения. Автор благодарит профессора кафедры минералогии Э.М. Спиридонова за консультации и профессиональные советы при обсуждении результатов исследований. Автор признательна д.г.-м.н. А.Ю. Озерову за вдохновение, помощь и моральную поддержку при подготовке диссертационного труда.

Искреннюю благодарность автор выражает коллегам за совместные экспедиционные исследования в непростых условиях Камчатки и Курильских островов: д.г.-м.н. С.Н. Рычагову и всем сотрудникам лаборатории геотермии ИВиС ДВО РАН; коллективу геологов Саратовского государственного университета, в том числе, проф. А.Д. Коробову; сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии к.г.-м.н. М.С.Чернову, И.П. Гвоздевой, И.Е. Большакову, а также студентам, принимавшим участие в полевых работах. Благодарность д.г.-м.н. Н.С. Жатнуеву, к.г.-м.н. Г.П. Королевой, к.г.-м.н. С.Ф. Главатских, Р.А.Кузнецову. Благодарность исландским коллегам Х. Френзсону и В. Стефанссону за совместные научные исследования на гидротермальных системах Исландии.

За проведение аналитических определений автор благодарна проф. В.Н. Соколову и к.г.-м.н. М.С. Чернову (электронная микроскопия); к.г.-м.н. В.Г. Шлыкову, к.г.-м.н. В.В. Крупской, В.Л. Косорукову, С.А. Гараниной, С.В. Закусину (рентгеновская дифрактометрия); М.В. Коптевой-Дворниковой (определение плотности твердых частиц).

С большой теплотой автор благодарит родителей - к.г.-м.н. Е.И. Зубковскую и к.т.н. В.Н. Васильева, способствующих выбору научного геологического пути и незыблемую поддержку на всем его протяжении.

Финансовая поддержка полевых и лабораторных исследований по теме диссертации частично осуществлялась за счет грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№№ 03-05-64842-а, 07-05-00118-а, 13-05-00530-а, 04-05-79066-к, 09-05-10023-к, 13-05-10047-к, 14-05-10042 к, 16-05-00501 а), по которым автор была руководителем или исполнителем.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит два тома. Том 1 (диссертация) изложен на 382 страницах и состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 458 наименований. Текст содержит 32 таблицы и 118 рисунков. Том 2 (приложение к диссертации) имеет общий объем 122 страницы и состоит из 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждаются актуальность и научная новизна работы, формулируются цель и основные задачи исследований, приводятся сведения об объекте и фактическом материале, описывается методика исследований, конкретизируется личный вклад автора, обосновывается практическая значимость работы. В главе 1 рассматриваются современные представления о гидротермально-метасоматических процессах в вулканических областях, их влиянии на свойства пород, и в целом, на инженерно-геологические условия территорий. В главе 2 описывается фактический материал и методика исследований; приводится краткий обзор геологических и геотермических условий Курило-Камчатского региона и характеристика исследованных гидротермальных систем. В главе 3 рассматриваются условия и последовательные ряды превращения эффузивных и вулканогенно-осадочных пород в различные типы гидротермальных метасоматитов; анализируется соответствующая им динамика изменения свойств; приводится инженерно-геологическая характеристика и классификация гидротермально-метасоматических пород. В главе 4 рассматриваются основные факторы, определяющие динамику изменения свойств пород при гидротермально-метасоматических процессах, и приводится обобщенная модель формирования свойств гидротермально-метасоматических пород. В главе 5 показаны принципиальные отличия изменчивости свойств в разрезах региональных вулканогенно-осадочных и гидротермально измененных толщ. В главе 6 анализируется влияние гидротермальных преобразований на все компоненты инженерно-геологических условий соответствующих территорий. Заключение содержит основные результаты исследования и установленные закономерности.

ГЛАВА 1. Современные представления о гидротермально-метасоматических процессах в вулканических областях и их влиянии на инженерно-геологические условия территорий

К настоящему времени, начиная с основополагающих работ Д.С. Коржинского и впоследствии благодаря исследованиям многих ученых, накоплен большой объем минералого-геохимических и петрологических данных о метасоматических породах, в том числе, о гидротермальных метасоматитах, формирующихся в вулканических областях, широкие возможности изучения которых открылись при освоении геотермальных месторождений во второй половине прошлого столетия.

Существенно меньшее количество работ затрагивают вопросы изменения физических и физико-механических свойств горных пород при гидротермально-метасоматических процессах, хотя их решение сопряжено с целым комплексом фундаментальных, научно-технических и прикладных задач в различных областях геологии. Среди них немаловажную роль играют задачи инженерно-геологической направленности, возникающие в связи с инженерно-хозяйственным и туристическим освоением геотермальных районов. В ряде работ рассматриваются особенности изменения физико-механических свойств пород под действием гидротермально-метасоматических процессов: одни исследователи указывают на их снижение (*Potro, Hurlimann, 2009; Rigopoulos et al., 2010; Coggan et al., 2013; Farquharson et al., 2019*), другие приводят данные о различной динамике их изменения в зависимости от разных факторов (*Фролова и др., 1999; Sigurdsson et al., 2000; Bozkurtoglu et al., 2006; Luts et al., 2011; Wyering et al., 2012; Siratovich et al., 2012*).

Серия работ посвящена влиянию гидротермальной аргиллизации на свойства вулканогенных пород, поскольку данный процесс широко проявлен в верхних горизонтах земной коры, попадающих в зону влияния инженерных сооружений, а кроме того, он способствует активизации различных экзогенных геологических процессов (*Frolova et al., 2006; Lutz et al., 2011; Lynne et al. 2013; Pola et al., 2014; Mielke et al. 2015; Фролова, Чернов, 2015; Navelot et al. 2016*).

Многие специалисты для различных геотермальных районов мира отмечают, что гидротермальная переработка пород и изменение их физико-механических свойств вызывают ряд геологических последствий, среди которых деформации поверхности (*Rouwet et al., 2014; Басманов и др., 2016*), активизация обвально-оползневых процессов (*Reid et al., 2001; Huang and Tian, 2006; Suemnicht et al., 2007; Пунегина и др., 2008; Двигало, Мелекесцев, 2009; Pioquinto et al., 2010; Kiryukhin et al., 2010, 2012; Kristianto et al., 2013; Zerkal, Gvozdeva, 2013, 2016, 2019; Della Seta et al., 2015; Gvozdeva, Frolova, Zerkal et al., 2015; Marmoni et al., 2017*), миграция и изменение режима термопроявлений (*Трухин, Петрова, 1976; Кирюхин, Рычкова, Дубинина, 2015*), гидротермальные взрывы (*Hedengvist and Henley, 1985; Жатнуев, 1991; Browne, Lawless, 2001; Montanaro et al., 2015; Shulyupin et al., 2016*) и иные.

Критический анализ опубликованных материалов показал, что несмотря на значительное число научных работ по отдельным ГТС или отдельным геологическим процессам, практически отсутствуют обобщающие теоретические работы, в которых были бы сформулированы общие

закономерности изменения свойств пород при гидротермально-метасоматических процессах и оценено влияние последних на весь комплекс инженерно-геологических условий геотермальных районов.

ГЛАВА 2. Характеристика исследованных гидротермальных систем

Изучением гидротермальных систем Курило-Камчатской дуги, включающим геологические, гидрогеологические и геотермические исследования, в разное время занимались *Б.И.Пийп, В.В.Аверьев, В.И.Сугробов, С.И.Набоко, Т.И.Устинова, Е.А.Вакин, И.Т.Кирсанов, В.В.Иванов, В.И.Белоусов, А.И.Сережников, В.И.Кононов, Б.Г.Поляк, Г.Ф.Пилипенко, Ю.П.Трухин, В.С.Знаменский, В.Л.Леонов, С.Н.Рычагов, Н.С.Жатнуев, Ю.А.Таран, В.А.Кирюхин, О.В.Чудаев, Е.Г.Калачева* и многие другие специалисты.

Минералого-петрографические и геохимические исследования проводили *С.И.Набоко, Г.М.Власов, М.М.Василевский, К.К.Зеленов, Г.А.Карпов, М.Л.Лебедев, В.Д.Пампура, В.А.Ерощев-Шак, В.В. Петрова, С.Ф.Главатских, С.Н.Рычагов, А.Д.Коробов, И.Б.Словцов, А.Ю.Бычков, С.Б.Бортникова, Л.П.Вергасова* и др.

Преобладающее число ГТС сосредоточено в пределах Восточно-Камчатского вулканического пояса (включая Южную Камчатку) и на Большой Курильской гряде; в меньшей степени гидротермальная активность проявлена в пределах Центрально-Камчатского вулканического пояса. Они сформированы в толщах вулканогенных пород неоген-четвертичного возраста, которые под действием термальных флюидов трансформируются в гидротермально-метасоматические новообразования.

Исследования проводились на девяти ГТС, две из которых находятся на Курильских островах, семь - на полуострове Камчатка (рис.1).

В диссертационной работе приведена их подробная характеристика, включая данные о геологическом строении, геотермических, гидрогеологических условиях, вторичном минералообразовании и инженерно-геологических особенностях вмещающих пород.

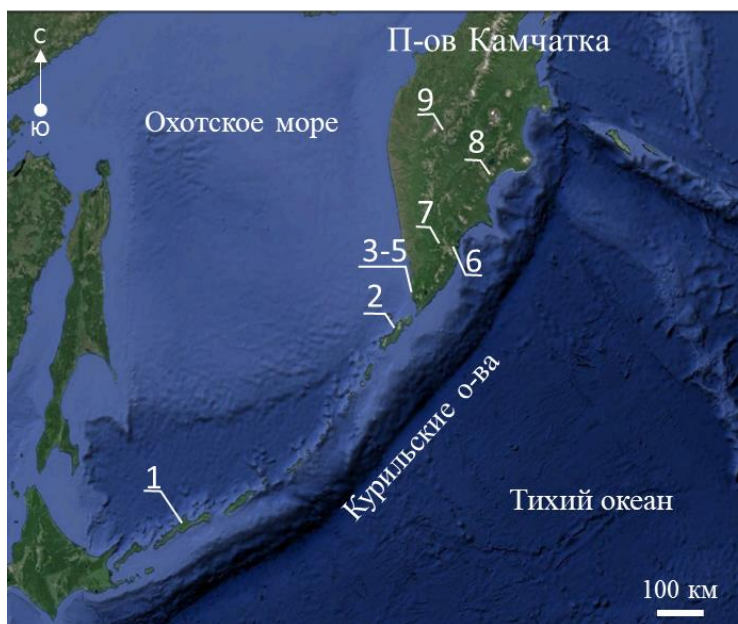


Рисунок 1 – Схема расположения исследованных гидротермальных систем и термальных полей:

- 1 – Баранского;
- 2 – Северо-Парамуширская;
- 3 – Паужетская;
- 4 – Камбальные т/п;
- 5 – Кошелевские т/п;
- 6 – Мутновская;
- 7 – Больше-Банная;
- 8 – Гейзерная;
- 9 – Эссовская

ГЛАВА 3. Закономерности формирования состава, строения и свойств гидротермально-метасоматических пород в вулканических областях

На основе обобщения и систематизации данных, полученных при исследовании отдельных ГТС, выявлены общие закономерности формирования состава, строения и свойств гидротермально-метасоматических пород в вулканических областях.

Инженерно-геологическая характеристика исходных пород.

Вмещающими породами гидротермальных систем являются эффузивные и вулканогенно-осадочные образования, которые принадлежат к различным генетическим группам, принципиально отличаясь по условиям образования, а соответственно и по инженерно-геологическим особенностям (Фролова и др., 2011a; Frolova et al., 2014) (рис.2). В пространственном отношении они образуют единые толщи, первостепенная роль в которых обычно принадлежит вулканогенно-осадочным породам, а эффузивные образования слагают отдельные горизонты.

Для эффузивных пород (базальты, андезибазальты, андезиты) характерны прочные фазовые (кристаллизационные) контакты между основными породообразующими минералами, которые образуются при остывании и кристаллизации лавы; кроме того, микролиты основной массы прочно скреплены вулканическим стеклом. В связи с этим все эффузивные породы представляют собой скальные грунты, среди которых преобладают очень плотные, слабо-, реже среднепористые, прочные и очень прочные разновидности

(по ГОСТ 25100-2020). Они невлагоемкие, негигроскопичные, неразмягчаемые при водонасыщении. По своей природе их физико-механические свойства являются сингенетическими, то есть формируются одновременно с образованием породы и в дальнейшем меняются незначительно.

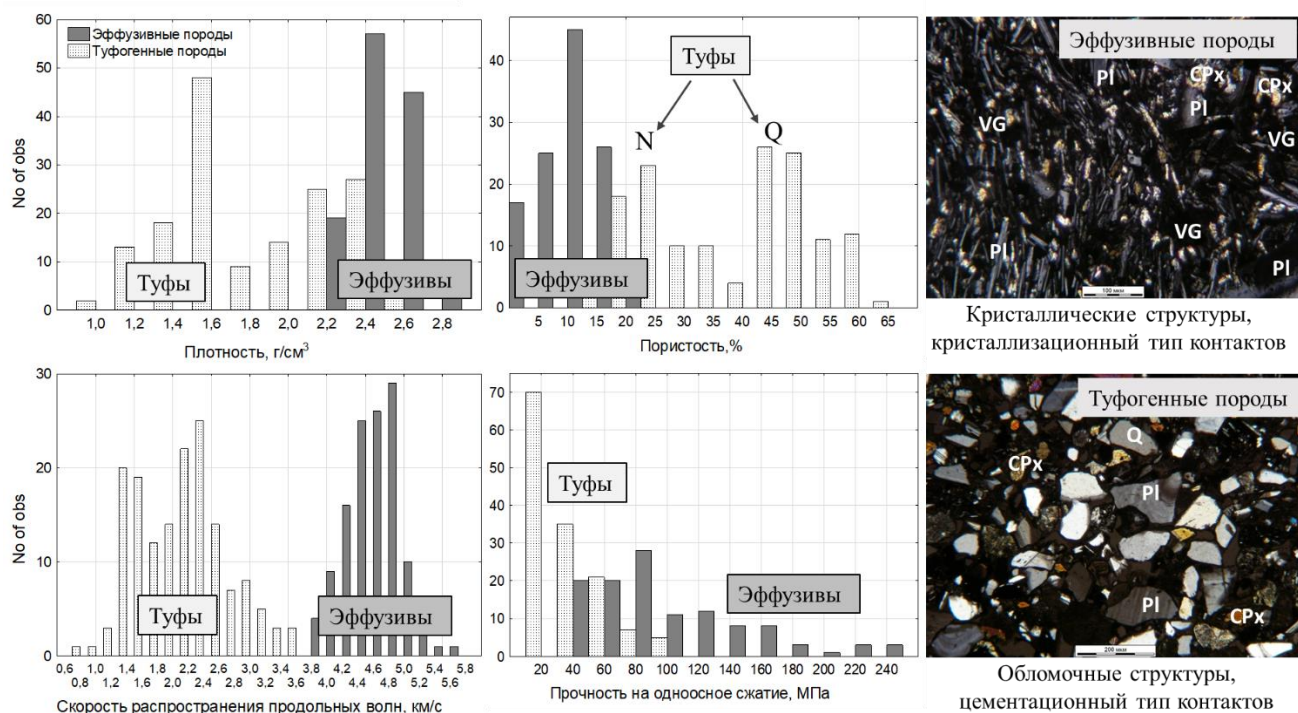


Рисунок 2 – Сравнительная инженерно-геологическая характеристика эффузивных и туфогенных пород (слева – гистограммы распределения свойств, справа – микрофотографии шлифов)

Формирование свойств *вулканогенно-осадочных пород* принципиально отличается от эффузивов и может происходить различными путями. Ряд пород образуются в результате сваривания или спекания горячего вулканогенно-обломочного материала и уже изначально представляют собой сцементированные породы, относящиеся к классу скальных грунтов (Фролова, 2007). Другие вулканокластиты первоначально представляют собой рыхлый обломочный материал, который в ходе вулканогенно-осадочного литогенеза уплотняется и цементируется, постепенно превращаясь в консолидированную породу (скальный грунт). Свойства таких пород являются эпигенетическими.

Среди вулканогенно-осадочных пород наиболее распространены туфы и туффиты. Их инженерно-геологические особенности формируются в течение продолжительного времени за счет уплотнения рыхлого пирокластического материала, его взаимодействия с поровыми растворами и образования фазовых контактов цементационного типа между обломками. В качестве цемента обычно

выступает глинисто-кремнеземистое вещество, образующееся при раскристаллизации вулканического стекла, также в его составе участвуют карбонаты. Цемент прежде всего образуется на контактах между обломками в виде скрепляющих их опалово-глинистых «мостиков». Постепенно он «разъедает» краевые части обломков и разрастается, покрывая их поверхность в виде «рубашек», трансформируясь в цемент пленочного типа, а в дальнейшем полностью заполняет пустоты, образуя цемент порового типа. В итоге рыхлые пирокластические отложения превращаются в сцементированные породы – туфы, туффиты.

Туфогенные породы крайне неоднородны по физико-механическим свойствам в зависимости от состава и размерности слагающих их обломков, типа и состава цемента, степени литификации (Фролова, 2007, 2008). Вулканокластиты неогенового возраста в целом более уплотнены и литифицированы и характеризуются более высокими значениями физико-механических свойств по сравнению с плейстоценовыми (плиоцен-плейстоценовыми) аналогами (см. рис.2) (Фролова и др., 2011-б).

Среди туфогенных пород преобладают скальные грунты средней плотности, средне- и сильнопористые, малой и средней прочности, однако встречаются и полускальные грунты. Туфогенные породы обычно влагоемкие, гигроскопичные и размягчаемые при водонасыщении.

По сравнению с эффузивами, они отличаются пониженными физико-механическими характеристиками (Фролова и др., 2011- а, б) (см. рис.2). По-видимому, свойственные эффузивным породам кристаллизационные контакты, образующиеся между минералами в процессе кристаллизации лавы, обладают существенно большей прочностью по сравнению с цементационными контактами, формирующимися в туфогенных породах в ходе вулканогенно-осадочного литогенеза в течение продолжительного времени.

Изменение свойств пород при гидротермально-метасоматических процессах. В пределах гидротермальных систем преобразованиями охвачены большие объемы пород - от поверхности до глубины в несколько сотен метров и первых километров. Процесс преобразования включает: 1) разрушение первичных минералов и избирательный вынос слагающих их химических компонентов; 2) кристаллизацию вторичных минералов в порах и трещинах; 3) метасоматическое замещение первичных минералов вторичными. В зависимости от температуры, давления и состава растворов формируется определенная ассоциация вторичных минералов, устойчивых в новых

изменившихся условиях. Помимо минерального состава, изменяются структурно-текстурные характеристики пород, в том числе, объем порового пространства, причем как в сторону его увеличения при выщелачивании, так и в сторону уменьшения при отложении минералов в пустотах. Все эти факторы приводят к закономерному изменению физических и физико-механических свойств пород (Фролова и др., 2011-а; Frolova et al., 2014; Фролова, 2021).

В диссертационной работе для каждого типа гидротермально-метасоматических пород рассмотрены условия их формирования, прослежена последовательность и стадии структурно-минералогических преобразований и соответствующая им динамика изменения свойств.

В ряду гидротермально-метасоматических преобразований пород с долей условности можно выделить три стадии изменения. *На первом этапе* замещается большая часть вулканического стекла и начинаются преобразования кристаллов, в первую очередь, в местах их дефектов. Общее количество новообразованных минералов в слабоизмененных породах не превышает 25-30%. При этом свойства меняются в незначительной степени и в основном они зависят от первичных петрографических особенностей.

На втором этапе, при более продолжительной и интенсивной переработке, вулканическое стекло полностью замещается вторичными минералами. Кристаллы преобразованы частично, причем в первую очередь перерабатываются основные плагиоклазы, оливины и ромбические пироксены, тогда как кислые плагиоклазы и клинопироксены более устойчивы. Встречающиеся в туффитах зерна кварца преобразованиям не подвержены. Общее количество вторичных минералов у среднеизмененных пород колеблется в диапазоне от 25-30 до 70%. Свойства пород на данном этапе изменяются в значительной степени по сравнению с исходными. Основными факторами, влияющими на динамику их изменения, являются тип, количество и форма выделения вторичных минералов, но также сохраняют свое влияние и первичные петрографические особенности.

На третьем этапе, при продолжительном воздействии термальных вод, происходит полная минеральная перестройка и превращение вулканогенных пород в гидротермальные метасоматиты с новым минеральным составом, но как правило с псевдоморфной структурой, унаследованной от исходной породы. В отличие от макроструктуры, микростроение кардинально изменяется: основную массу гидротермальных метасоматитов составляют микрокристаллические агрегаты вторичных минералов, состав, количественное соотношение, форма выделения

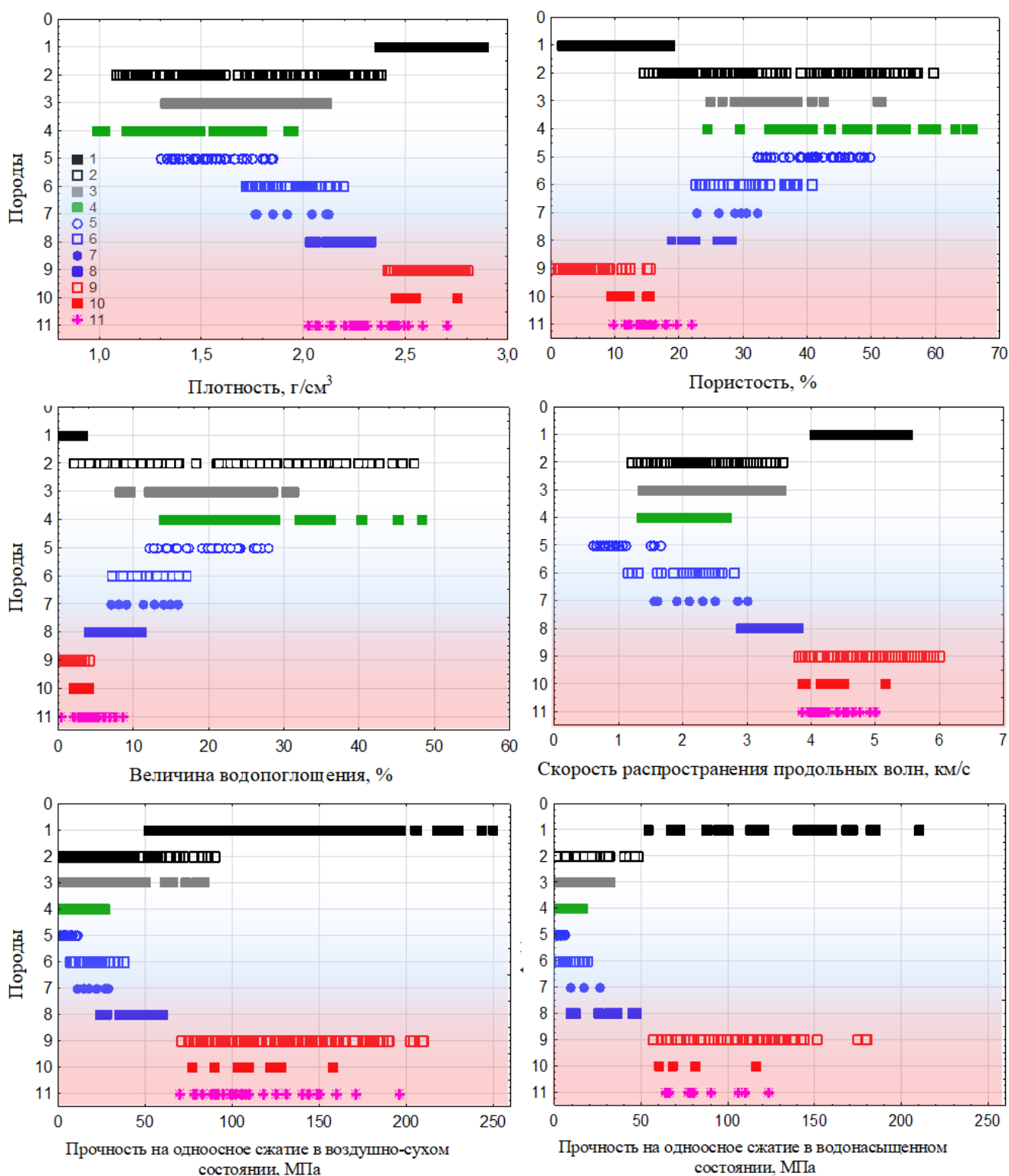
которых и характер новообразованных структурных связей определяют физико-механические свойства пород. На данном этапе, вследствие глубокой перекристаллизации ($>70\%$), могут происходить кардинальные изменения инженерно-геологических особенностей пород, вплоть до изменения их принадлежности к определенным группам и классам грунтов.

В итоге выявлены инженерно-геологические особенности пород гидротермально-метасоматического генезиса (рис.3).

Образующиеся в недрах *вторичные кварциты и среднетемпературные пропилиты*, а также *кварц-адуляровые метасоматиты* зон фазового перехода «жидкость-пар», принадлежат к группе скальных грунтов и являются плотными и очень плотными, низко- и среднепористыми, прочными и очень прочными, большей частью неразмягчаемыми. Высокие показатели прочностных и деформационных свойств обусловлены наличием прочных фазовых контактов кристаллизационного типа между новообразованными в процессе метасоматоза зернами кварца, полевых шпатов, эпидота и некоторых других вторичных минералов, составляющих гранобластовую основную массу данных пород.

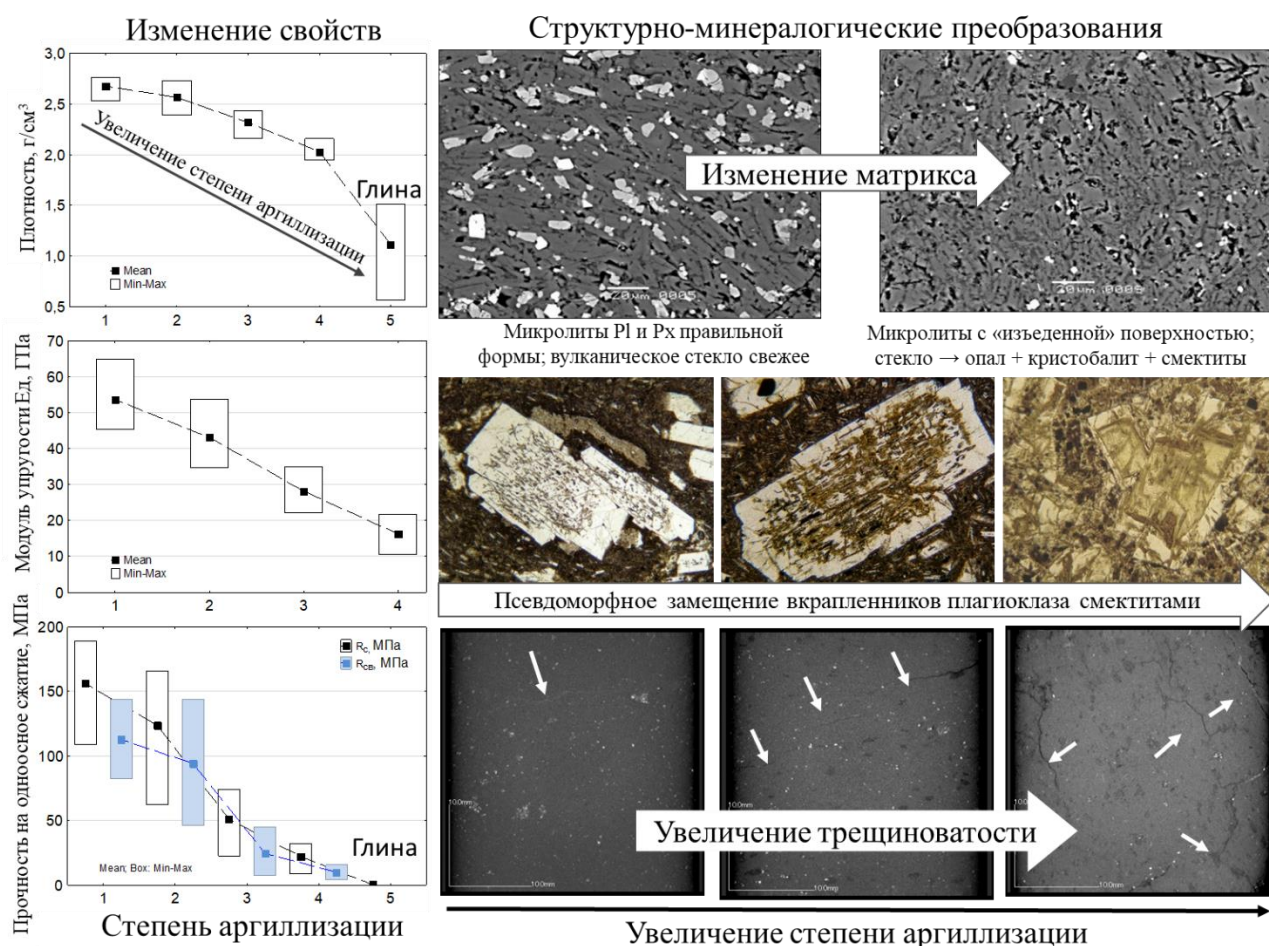
Низкотемпературные пропилиты, хотя и входят в группу скальных грунтов, но отличаются существенно меньшими значениями плотности, прочности и деформационных характеристик и повышенными пористостью и влагоемкостью. Это обусловлено формированием менее прочных минералов (цеолитов, карбонатов, хлорита, гидрослюд и иных) с более слабыми контактами между ними, а кроме того, преобладанием процесса выщелачивания и образованием ослабляющих породу вторичных пустот.

Аргиллизированные пропилиты и аргиллизиты относятся преимущественно к полускальным грунтам - средней плотности, сильнопористым, размягчаемым. Их инженерно-геологические особенности обусловлены наличием смешанных типов контактов между структурными элементами, среди которых преобладают фазовые, но присутствуют и более слабые контакты переходного типа, образованные глинистыми минералами (сметтиты, смешанослойные гидрослюда-сметтит, хлорит-сметтит), которые в значительной степени ухудшают показатели физико-механических свойств (рис.4).



Обозначения по оси ординат: 1, 2 – неизменные породы: эффузивные (1), вулканогенно-осадочные (2); 3-11 – гидротермально-метасоматические породы: 3 – опалиты, 4 – аргиллизиты, 5 – аргиллизированные цеолитовые пропилиты, 6 – аргиллизированные трансильванские пропилиты, 7 – цеолитовые пропилиты, 8 – трансильванские пропилиты, 9 – среднетемпературные пропилиты, 10 – вторичные кварциты, 11 – кварц-адуляровые метасоматиты.

Рисунок 3 – Сравнительная характеристика свойств исходных и гидротермально-метасоматических пород



По оси абсцисс цифрами обозначена степень изменения пород: 1 – неизменные, 2 – слабоизмененные, 3 – среднеизмененные, 4 – сильноизмененные, 5 – глины

Рисунок 4 – Структурно-минералогические преобразования и динамика изменения свойств андезибазальтов под действием гидротермальной аргиллизации

Особую группу образуют *опалиты*, формирующиеся в приповерхностных условиях под действием сернокислотного выщелачивания, которые несмотря на высокую пористость и малую плотность относятся к скальным грунтам средней и малой прочности (рис.5). Относительно повышенные прочностные и деформационные характеристики обусловлены наличием жесткого кремнистого «каркаса», в строении которого участвуют низкотемпературные полиморфные модификации кремнезема (опал, кристобалит, тридимит, кварц). Примеси каолинита и алунита негативно сказываются на физико-механических свойствах.

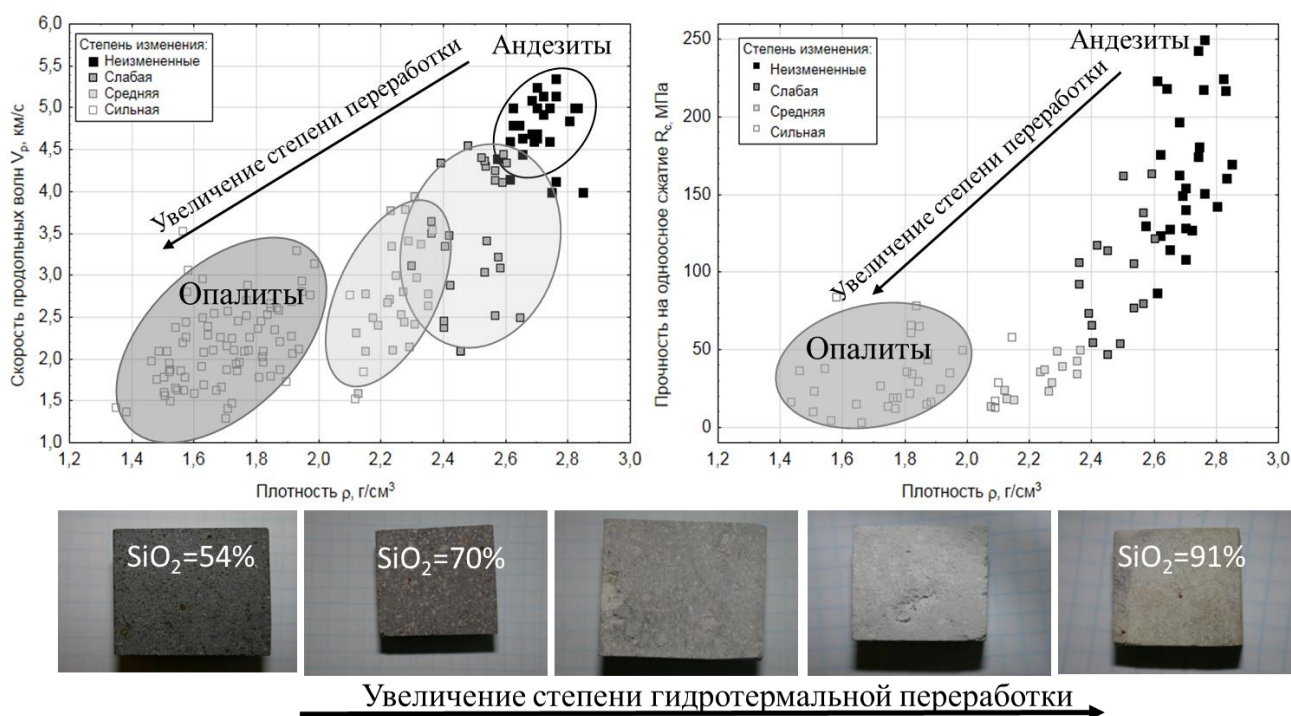


Рисунок 5 – Динамика изменения свойств андезитов-андезибазальтов под действием сернокислотного выщелачивания при превращении в опалиты

Наиболее сложными и неблагоприятными в инженерно-геологическом плане новообразованиями являются *гидротермальные глины*, образующиеся в результате полной переработки вулканических пород в приповерхностной зоне термальных полей. Вследствие высокой динамичности и изменчивости протекающих процессов формируются пространственно-неоднородные толщи гигроскопичных, пластичных, повышенно-сжимаемых, в некоторых случаях набухающих глинистых грунтов, для которых характерны сильная изменчивость минерального состава даже в пределах небольших объемов пород, сонахождение минералов с разными условиями формирования, большое количество кремнистых минералов, «пропитывающих» глину, включения неразложившихся реликтов исходных пород, что в конечном итоге отражается на их свойствах (Фролова, Чернов, 2015; Чернов и др., 2016).

Вышеперечисленные особенности отражены в разработанной инженерно-геологической классификации гидротермально-метасоматических пород.

На основе изложенного материала сформулировано первое защищаемое положение (см.стр.9).

ГЛАВА 4. Основные факторы и обобщенная модель формирования свойств гидротермально-метасоматических пород

Динамика изменения свойств пород при гидротермальном процессе может быть разнонаправленной в зависимости от ряда факторов, среди которых особенности первичной породы, параметры флюидов (температура, химический состав, агрегатное состояние) и продолжительность взаимодействия «раствор-порода» (Фролова и др., 2011-а,б).

Особенности исходных пород влияют в первую очередь на скорость и интенсивность гидротермальных преобразований. К факторам, способствующим гидротермальной переработке, относятся высокая пористость и проницаемость, микротрещиноватость, слабая цементация, обломочные структуры, наличие вулканического стекла. Факторами, повышающими устойчивость пород, являются плотные массивные текстуры, низкая пористость, полнокристаллические структуры, прочные кристаллизационные контакты.

Установлен обобщенный ряд по мере повышения устойчивости пород к воздействию гидротерм: туфы пемзо- и витрокластические → туфы кристалло- и литокластические → эффузивные породы пористые стекловатые → эффузивные породы массивные полнокристаллические.

Наиболее подвержены изменениям пемзовые и витрокластические туфы за счет их высокой пористости (>30-40%) и большого содержания вулканического стекла. Более устойчивыми являются кристалло- и литокластические туфы. Поскольку туфы часто характеризуются смешанным составом обломков, то степень их изменения зависит от количественного соотношения витро-, пемзо-, кристалло – и литокластов, повышаясь при увеличении содержания первых двух компонентов и снижаясь при преобладании обломков кристаллов и пород.

Эффузивные породы более устойчивы по сравнению с туфогенными, причем максимальной устойчивостью обладают полнокристаллические массивные породы, тогда как наличие пор и трещин, а также большого количества вулканического стекла способствуют активизации гидротермальной переработки.

В том случае, когда гидротермальный процесс протекает с высокой интенсивностью и в течение продолжительного времени, разница в свойствах исходных пород постепенно нивелируется, и в конечном итоге инженерно-геологические особенности образующихся гидротермально-метасоматических пород не зависят от особенностей протолита.

Температура гидротерм. Средне-высокотемпературные глубинные растворы ($T \geq 250^\circ\text{C}$), независимо от их химического состава, вызывают уплотнение и упрочнение пород, повышение деформационных характеристик, снижение пористости, проницаемости, гигроскопичности. Это обусловлено формированием прочной цементации, обеспеченной зернами метасоматического кварца, полевых шпатов, при участии эпидота, цеолитов и некоторых других вторичных силикатов, крепко скрепленных за счет контактов кристаллизационного типа (рис.6).

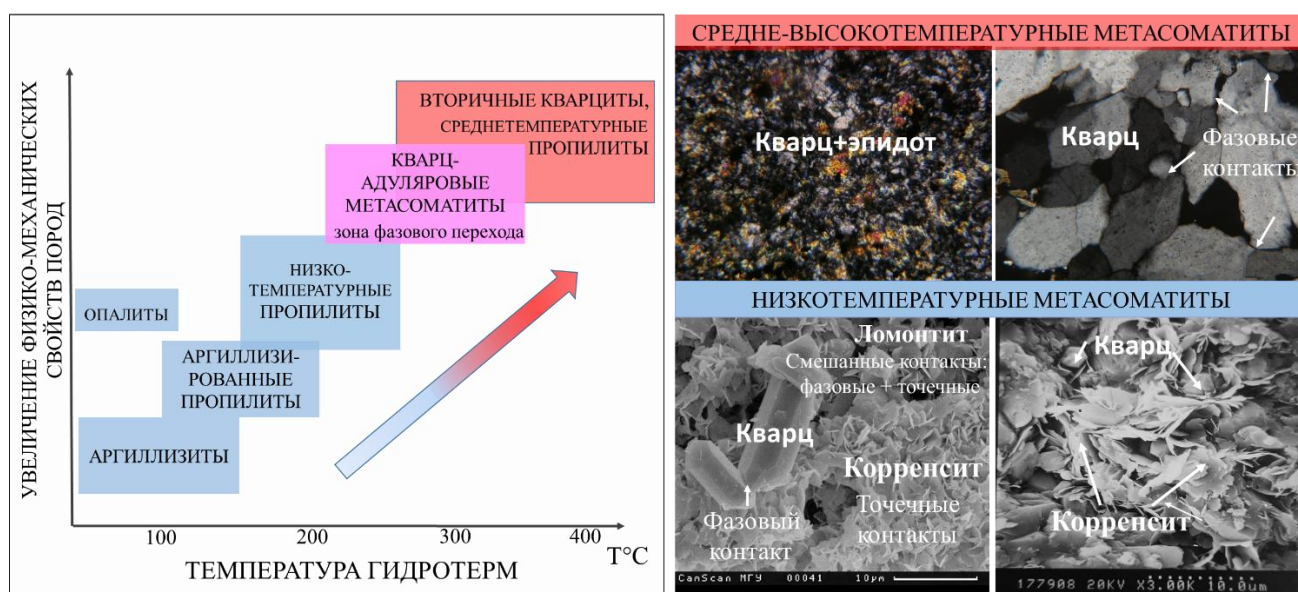


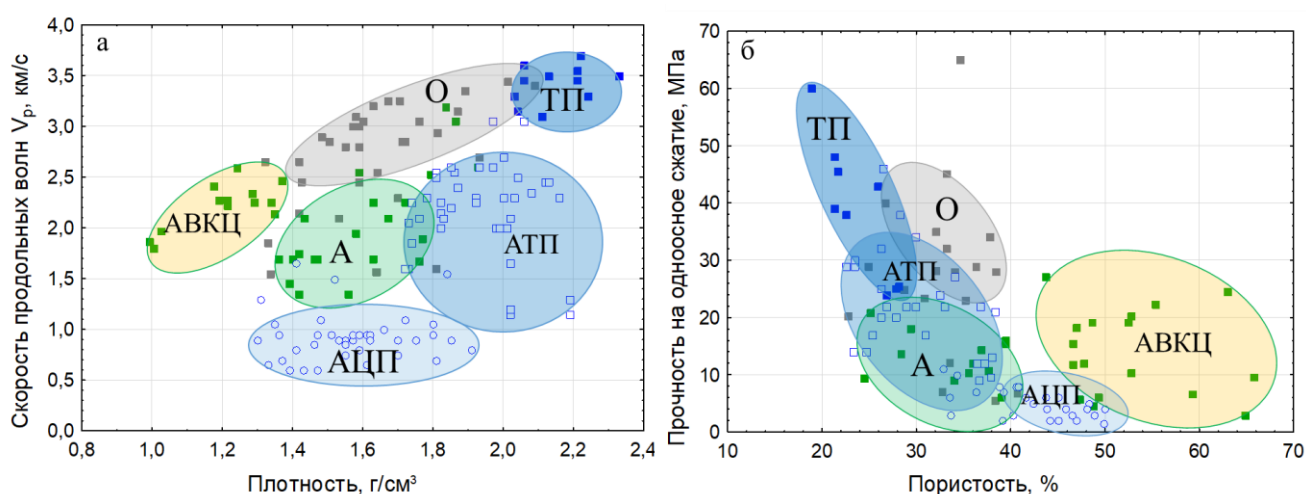
Рисунок 6 – Обобщенная зависимость физико-механических свойств гидротермально-метасоматических пород от температуры гидротерм (слева) и типов новообразованных контактов (справа)

Данная тенденция наблюдается как для эффузивных, так и для вулканогенно-осадочных пород, причем для вторых она проявлена наиболее контрастно. Все гидротермально-метасоматические породы, образованные под действием средне-высокотемпературных растворов, относятся к группе скальных грунтов.

Динамика изменения физико-механических свойств пород при воздействии низкотемпературных растворов более сложна и многообразна. Она зависит от сочетания процессов выщелачивания, осаждения вторичных минералов в пустотах и замещения первичных минералов вторичными новообразованиями, хотя в целом превалирует негативная тенденция в изменении физико-механических свойств. Она может быть различна для эффузивных и вулканогенно-осадочных пород: для первых характерно значительное разуплотнение, разупрочнение, повышение деформируемости и иные

негативные тенденции в изменении свойств, для вторых возможны разные сценарии.

При низкотемпературных процессах существенное влияние на изменение свойств оказывает *химический состав и кислотность* термальных вод. Показательна диаграмма, иллюстрирующая соотношение величин скорости продольных волн (V_p) и плотности для различных низкотемпературных метасоматитов (рис. 7а). Обнаружено, что стандартная закономерность повышения V_p с увеличением плотности на низкотемпературные метасоматиты не распространяется, и корреляция между данными показателями отсутствует. Также весьма слабо проявлена характерная для скальных грунтов экспоненциальная зависимость прочности пород от пористости (рис. 7 б).



О – опалиты (кислые сульфатные воды, $pH=1,5-4$; $T \leq 100^\circ C$); А - аргиллизиты (хлоридно-гидрокарбонатные воды, $pH=5,5-6$; $T \leq 100-150^\circ C$); АВКЦ – аргиллизиты с высококремнистыми цеолитами (щелочные хлоридно-гидрокарбонатные воды, $pH > 7$; $T \leq 100-150^\circ C$); АТП – аргиллизированные трансильванские пропилиты (сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатные воды, $pH=5,5-7$; $T \sim 150-200^\circ C$), ТП – трансильванские пропилиты (сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатные воды, $pH=5,5-7$; $T \sim 200-250^\circ C$), АЦП – цеолитовые пропилиты, в том числе, аргиллизированные (щелочные сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатные воды, $pH > 7$; $T \sim 150-250^\circ C$)

Рисунок 7 – Сопоставление свойств низкотемпературных метасоматитов, образованных под действием гидротерм разного состава и кислотности-щелочности: а – скорость распространения продольных волн и плотность, б – прочность на одноосное сжатие и пористость

Показатели физико-механических свойств низкотемпературных метасоматитов определяются в большей степени не плотностью и пористостью, а составом, количественным соотношением и формой выделения вторичных минералов, которые в свою очередь зависят от химического состава и кислотности гидротерм.

Гидротермально-метасоматические породы, сформированные в низкотемпературных условиях, могут относиться к скальным, полускальным и

дисперсным связным грунтам в зависимости от соотношения долей жестких фазовых контактов между зернами новообразованных цеолитов, карбонатов, кварца, опала и других вторичных минералов, и более слабых контактов переходного типа, образованных при участии глинистых минералов.

Фазовое состояние флюидов. Флюиды современных гидротермальных систем могут находиться в различном агрегатном состоянии, и это влияет на структурно-минералогические особенности гидротермально-метасоматических пород и их инженерно-геологические характеристики.

Особыми с точки зрения термодинамических параметров являются зоны перехода «жидкость-пар», которые в структуре гидротермальной системы могут образовываться на различных глубинах. Они фиксируются кварц-адуляровой минерализацией (иногда с вайрацитом, эпидотом, серицитом), обеспечивающей формирование плотных, прочных, слабдеформируемых пород, негигроскопичных и неразмываемых. Следует отметить еще одну особенность кварц-адуляровых метасоматитов — они не магнитны, поскольку в высокотемпературных условиях фазового перехода флюида происходит полное разложение титаномagnetита, а новообразованные кварц и адуляр относятся к диамагнетикам.

Предложена схематическая *модель формирования свойств* гидротермально-метасоматических пород (рис.8), в которой обобщена и систематизирована информация об исходных породах, условиях и стадиях их преобразования, вторичных минеральных ассоциациях; отражена динамика изменения свойств при гидротермально-метасоматических процессах в зависимости от разных факторов; охарактеризованы с инженерно-геологической точки зрения новообразованные гидротермально-метасоматические породы, включая их принадлежность к определенным классам, группам и разновидностям грунтов.

Таким образом, обосновано второе защищаемое положение (см. стр.9).

УВЕЛИЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

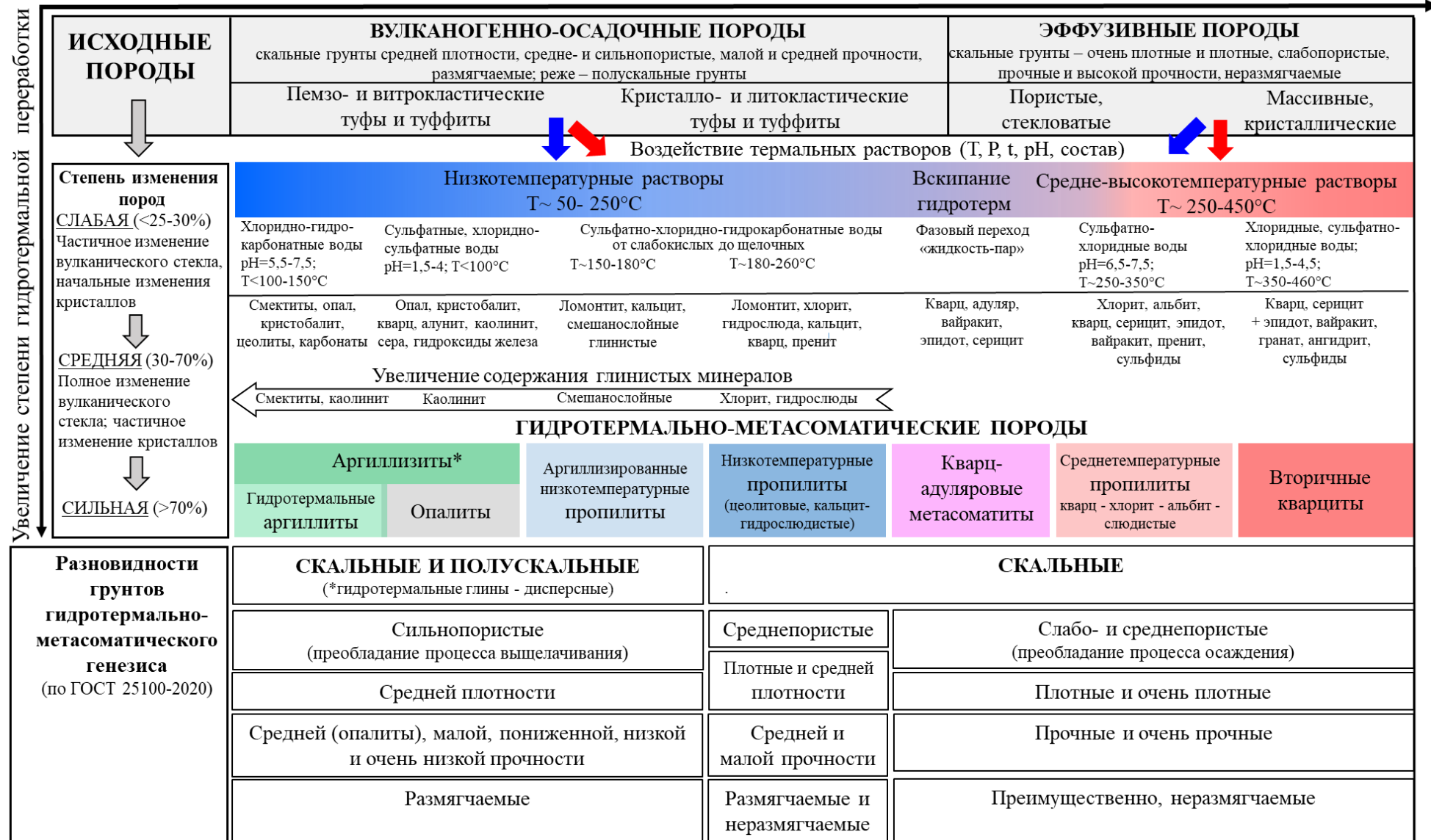


Рисунок 8. Обобщенная модель формирования физико-механических свойств гидротермально-метасоматических пород

ГЛАВА 5. Особенности изменения состава, строения и свойств пород в разрезе современных гидротермальных систем

На примере опорных разрезов Курило-Камчатского региона доказано, что характер изменения свойств пород по разрезу имеет принципиальные отличия для вулканогенно-осадочных толщ, имеющих региональное распространение и гидротермально измененных толщ, вскрытых скважинами в пределах ГТС.

Для выявления инженерно-геологических особенностей *региональных вулканогенно-осадочных толщ* был исследован разрез структурной скважины, пробуренной на о. Итуруп (г. Курильск), глубиной 1600 м (Фролова, 1998; Фролова и др., 1999; Ладыгин, Рычагов, Фролова и др., 2001).

Разрез представлен туфогенными отложениями плиоцен-четвертичного возраста с отдельными лавовыми прослоями и является типичным для данного района. В верхней части до глубины 600-700 м залегают рыхлые или слабосцементированные осадочно-пирокластические отложения, переходящие ниже в толщу сцементированных туфогенных пород. С глубиной происходит постепенное заполнение межобломочного пространства вторичными минералами, сопровождающееся сменой типов цемента: контактовый → пленочный → поровый → порово-базальный. Минеральный состав цемента изменяется от опал-сметитового в верхней части (650-1250 м) до глинисто-карбонатного (1250-1500 м) и цеолит-хлоритового/корренситового в нижнем горизонте (1500-1600 м). В нижней части разреза начинаются интенсивные эпигенетические изменения, приводящие к перекристаллизации первичного вулканогенного материала и замещению его вторичными минералами.

Для всей вулканогенно-осадочной толщи характерно плавное уплотнение и снижение пористости с глубиной в соответствии с ростом литостатического давления. Показатели прочностных и деформационных свойств по разрезу изменяются «пилообразно», но в целом обнаруживается тенденция их повышения с глубиной (рис.9).

Некоторые отклонения значений от общего тренда обусловлены литологическими неоднородностями пород, в частности, варьирующим содержанием кремнистых, глинистых и карбонатных минералов в составе цемента, различным соотношением лито-, кристалло- и витрокластов и пр.

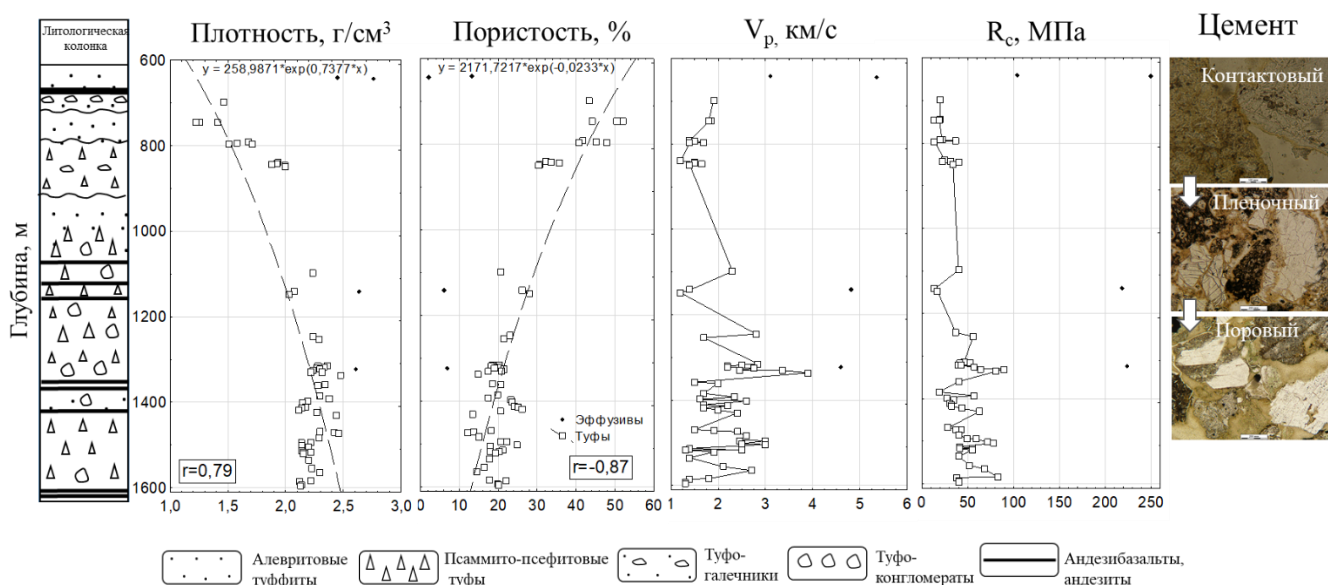


Рисунок 9 – Изменение свойств по разрезу региональной вулканогенно-осадочной толщи N_2-Q_1 (г. Курильск, о. Итуруп): а – плотность, б – пористость, в – скорость распространения продольных волн, г – прочность на одноосное сжатие

В пределах современных гидротермальных систем изменчивость показателей физических и физико-механических свойств в разрезе носит зональный характер, что обусловлено дифференциацией состава и температуры термальных вод по мере их фильтрации и, соответственно, зональным распределением вторичных минеральных ассоциаций (рис.10). Специфика зональности ГТС заключается в отсутствии закономерного изменения свойств с глубиной, как в региональных толщах. В разрезе плотные, прочные слои чередуются с разуплотненными, «слабыми» горизонтами (Frolova et al., 2001). Контролирующими факторами в данном случае являются температура и состав флюидов (определяющие характер и степень переработки пород), а не литостатическое давление, как при региональном эпигенезе.

На характер зональности и изменчивость свойств пород в разрезе ГТС существенное влияние оказывает структурно-тектонический фактор (Фролова, 1998, Фролова и др., 1999). Ассоциации вторичных минералов, характер и степень переработки пород, мощность и последовательность зон в разрезе, их однородность и закономерности изменения физико-механических свойств имеют свои специфические особенности в разных геолого-структурных блоках, выделяемых в пределах гидротермальных систем.

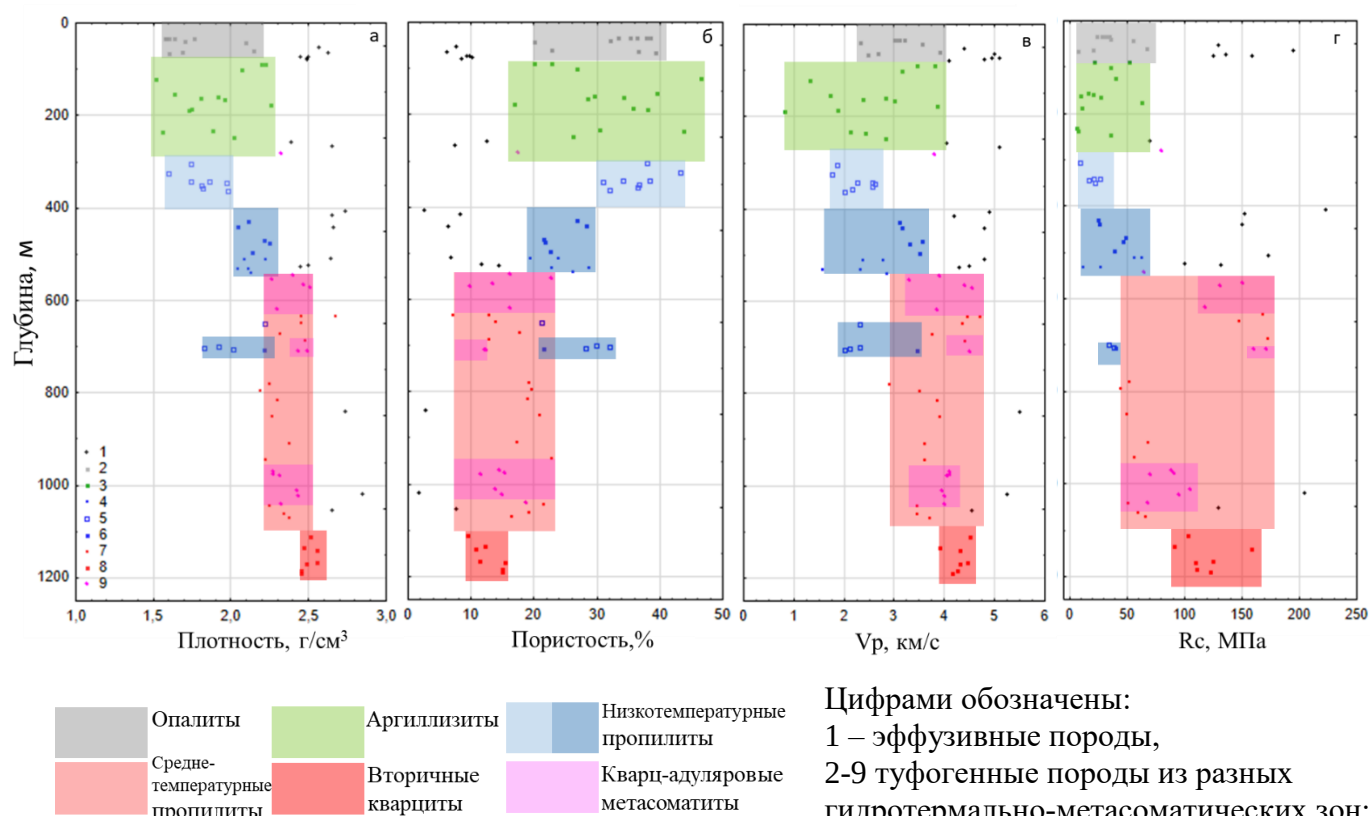


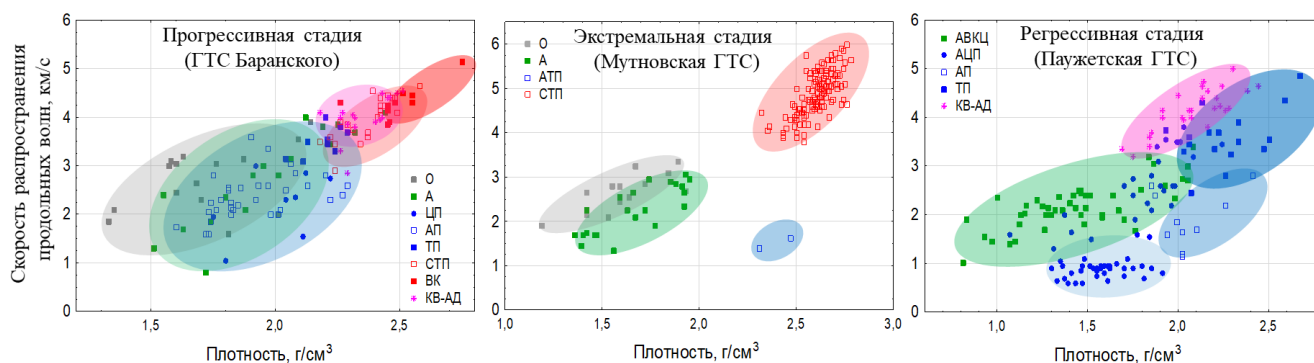
Рисунок 10 – Зональное изменение свойств по разрезу гидротермально измененной толщи (скв. 54, ГТС вулкана Баранского, о. Итуруп): а – плотность, б – пористость, в – скорость распространения продольных волн, г - прочность на одноосное сжатие.

Наибольшей динамичностью гидротермальных процессов отличаются горсты и неотектонические поднятия, сложенные интенсивно нарушенными породами и характеризующиеся неоднородным строением температурного поля. В таких условиях исходные породы обычно полностью трансформируются в гидротермальные метасоматиты, кардинально отличающиеся по составу и свойствам. В пределах тектонических нарушений, пересекающих и ограничивающих горсты, в зонах экзоконтактов субвулканических тел, характеризующихся наиболее высокой интенсивностью гидротермальных процессов, включая фазовые переходы флюида, формируются очень плотные, прочные существенно кварцевые (кварц-полевошпатовые, кварц-серицитовые) метасоматиты, а на некотором удалении от них часто возникают охлажденные участки, на которых образуются разуплотненные толщи низкотемпературных аргиллизированных пропилитов с пониженными физико-механическими характеристиками. Для тектонически «спокойных» структур в целом характерна более четкая вертикальная гидротермально-метасоматическая зональность с

последовательной сменой зон по разрезу по мере изменения температуры и состава растворов.

Для эффузивных пород выявлены иные закономерности в изменении свойств по разрезу, по сравнению с вулканогенно-осадочными. В пределах региональных вулканогенных толщ они образуют горизонты с повышенными относительно вулканогенно-осадочных пород физико-механическими характеристиками, которые практически не изменяются с глубиной. В разрезах ГТС, напротив, наблюдаются существенные вариации свойств эффузивных пород в зависимости от принадлежности к определенной гидротермально-метасоматической зоне и от степени их переработки. Более того, в некоторых зонах интенсивные гидротермальные процессы нивелируют исходную разницу в свойствах эффузивных и вулканогенно-осадочных пород.

Изменчивость свойств пород в пределах гидротермальных систем зависит от продолжительности гидротермального процесса (*Фролова и др., 2011–б*). Это хорошо видно при сравнении трех ГТС — Баранского, Мутновской и Паужетской, функционирующих в течение разного времени и находящихся (по данным *Рычагов и др., 2005*) на прогрессивной, экстремальной и регрессивной стадиях развития (рис.11). Сформированные на прогрессивном этапе гидротермально-метасоматические зоны характеризуются широким разбросом значений физико-механических свойств пород, что обусловлено незавершенностью гидротермальных преобразований и значительным влиянием первичных петрографических неоднородностей. В пределах одной зоны могут находиться как практически неизмененные, так и полностью переработанные породы, существенно различающиеся по своим инженерно-геологическим характеристикам. На экстремальной стадии развития ГТС гидротермально-метасоматические зоны дифференцируются и обособляются по свойствам. На регрессивной стадии в общем случае увеличивается разброс значений физико-механических свойств пород вследствие большого разнообразия формирующихся вторичных минералов и структур, однако в пределах отдельных зон изменчивость свойств, напротив, уменьшается. Это является результатом более интенсивного и продолжительного преобразования пород и свидетельствует о достижении гидротермальной системой определенной стабилизации в процессе эволюционного развития.



О – опалиты; А - аргиллизиты; АВКЦ – аргиллизиты с высококремнистыми цеолитами; АТП – аргиллизированные трансильванские пропилиты; ТП – трансильванские пропилиты; ЦП – цеолитовые пропилиты, в том числе, аргиллизированные; СТП – среднетемпературные пропилиты, ВК – вторичные кварциты; КВ-АД – кварц-адуляровые метасоматиты

Рисунок 11 - Пример дифференциации пород по свойствам в соответствии с формирующимися гидротермально-метасоматическими зонами. Соотношение скорости продольных волн (V_p) и плотности (ρ) пород для ГТС, находящихся на разных стадиях развития

Таким образом, в ходе естественной эволюции ГТС происходит дифференциация пород по свойствам в соответствии с формирующимися гидротермально-метасоматическими зонами - увеличивается разница в свойствах между зонами и возрастает однородность пород внутри каждой отдельной зоны. Следует отметить, что снижение температуры гидротерм активизирует процесс аргиллизации, который охватывает большие объемы пород, частично нивелирует зональность и оказывает негативное влияние на инженерно-геологические характеристики пород.

Подводя итог изложенному материалу подчеркнем, что характерные особенности зонального изменения свойств в пределах ГТС обусловлены рядом факторов, среди которых первостепенную роль играют параметры растворов, определяющие в свою очередь минеральную зональность и степень переработки пород, однако немаловажный вклад также вносят геолого-структурные факторы, первичная неоднородность вулканогенной толщи, а кроме того, продолжительность гидротермального процесса.

На основе изложенного в данной главе материала сформулировано третье защищаемое положение (см. стр.9).

ГЛАВА 6. Гидротермальные преобразования пород как фактор формирования инженерно-геологических условий геотермальных районов

Свойственные геотермальным районам масштабные преобразования горных пород, в ходе которых кардинально изменяются их состав, строение, состояние и свойства, способствуют развитию широкого спектра геологических процессов и явлений. Среди них отмечаются локальные изменения рельефа, активизация обвально-оползневых и эрозионных процессов, деформации и оседание поверхности, миграция и изменение режима термопроявлений, гидротермальные взрывы, изменение напряженно-деформированного состояния массива и иные (Фролова и др., 2011-а; Фролова, 2014; Frolova et al., 2014; Фролова, 2021; Frolova et al., 2021). Ниже рассматриваются некоторые из перечисленных последствий гидротермальной активности, их детальное описание приведено в диссертационной работе.

Изменение рельефа. Для исследуемых термальных полей характерны разномасштабные изменения рельефа.

Одной из причин является сочетание аргиллизации пород и эрозионных процессов. В местах разгрузки термальных вод происходит интенсивная переработка пород, сопровождаемая их выщелачиванием, аргиллизацией, снижением прочности, постепенным разрушением и выносом вещества водными потоками. В результате этих процессов происходит формирование отрицательных форм рельефа в виде обширных эрозионных котловин, примеры которых наблюдаются на Южно-Камбальных, Нижне- и Верхне-Кошелевских термальных полях, в районе Дачных термопроявлений на Мутновском вулкане, на склонах вулкана Баранского и пр. Дополнительному увеличению площади котловин способствуют обвально-оползневые процессы, происходящие по их бортам, сложенным ослабленными гидротермальной деятельностью породами.

Другим фактором, приводящим к изменению рельефа, являются оползневые процессы. В частности, поверхность термальных полей часто имеет характерную бугристую поверхность, которая образуется в результате вязкопластического движения увлажненных гидротермальных глинистых грунтов. Примеры такой поверхности наблюдались на Больше-Баннхих и Южно-Камбальных термальных полях, вулканах Баранского, Мутновском др. В некоторых случаях происходят более масштабные изменения рельефа вследствие возникновения крупных обрушений и оползней (яркий пример – оползень 2007 г. в Долине Гейзеров).

К изменению рельефа приводит разница в прочностных свойствах формирующихся гидротермально-метасоматических пород. В пределах

термальных полей опалиты и сольфатарные вторичные кварциты обычно слагают возвышенные участки (опалитовые «бугры») за счет более высокой прочности по сравнению с окружающими их гидротермальными глинами, которые напротив, легко разрушаются, размываются, способствуя формированию эрозионных котловин.

Таким образом, на участках разгрузки термальных вод и прилегающих к ним территориях наблюдаются как положительные, так и отрицательные формы рельефа, формирование которых вызвано изменением состава и свойств пород при гидротермальной переработке, а также эрозионными и оползневыми процессами.

Миграция поверхностных термопроявлений является характерным явлением практически на всех изученных ГТС и термальных полях. Это хорошо иллюстрирует тот факт, что площадь распространения гидротермально измененных пород не совпадает с современной разгрузкой гидротерм, причем, как правило, существенно ее превосходит. В частности, обширные покровы гидротермально измененных пород сформированы на склонах Мутновского, Кошелевского и Камбального вулканических массивов, в то время как выходы гидротерм сконцентрированы лишь на отдельных участках.

Причины данного явления могут иметь как эндогенную, так и экзогенную природу. Одной из них является изменение путей фильтрации флюидов в ходе эволюции ГТС за счет структурно-минералогической перестройки пород, в результате которой закрываются старые пути фильтрации и формируются новые каналы и зоны повышенной проницаемости. Это хорошо видно на термальных полях (Южно-Камбальном Дальнем, Верхне-Кошелевском), где опалиты слагают возвышенные участки в тех местах, где в настоящее время термопроявления отсутствуют. Опалиты образуются в местах разгрузки кислых термальных вод и парогазовых струй, приуроченных к трещинам в вулканическом массиве. На первой стадии изменения вулканогенных пород преобладает процесс выщелачивания и они преобразуются в высокопористые ($n > 40\%$), малопрочные ($R_c < 5$ МПа) опалиты. Постепенно растворы насыщаются кремнекислотой и начинается процесс осаждения минералов кремнезема в порах и трещинах, в результате чего породы значительно уплотняются и упрочняются ($n = 15-20\%$, $R_c > 50$ МПа) и термальные флюиды вынуждены менять пути фильтрации. Это приводит к смещению местоположения термальных источников и газопаровых струй.

Помимо структурно-минералогических преобразований пород, происходящих в ходе естественной эволюции ГТС и контролирующих пути фильтрации, определенную роль также могут оказывать изменения климатических условий, сейсмические события, оползневые процессы и иные. В частности, в результате произошедшего в 2007 г. в Долине Гейзера оползня пострадали многие гейзеры и термальные площадки.

Дополнительное влияние на режим термопроявлений могут оказывать техногенные факторы, как следует из опыта эксплуатации геотермальных месторождений.

Оползневые процессы и явления широко распространены в геотермальных районах Курило-Камчатской дуги. Во многом это связано с расчлененным рельефом, активной тектоникой и высокой сейсмичностью соответствующих территорий; кроме того, их развитию способствует климатический фактор, поскольку регион относится к категории избыточно увлажненных. Вместе с тем, имеется определенная специфика в особенностях формирования оползней геотермальных регионов. Это обусловлено, во-первых, гидродинамическим эффектом, который оказывают циркулирующие в массиве термальные флюиды (в данной работе этот вопрос не рассматривается), а во-вторых, масштабными преобразованиями пород, сопровождающимися резким изменением их физико-механических свойств. Характерная для верхних горизонтов гидротермальная аргиллизация значительно ослабляет породы, что является одним из основных факторов, способствующих активизации склоновых процессов.

Оползни различных типов и масштабов происходят практически на всех термальных полях и прилегающих территориях, приуроченных к склонам вулканических массивов или бортам речных долин, сложенных гидротермально измененными породами. Наиболее распространены приповерхностные оползни, среди которых по механизму смещения выделяются вязкопластические оползни и оползни скольжения (по СП 11-105-97) (рис.12). Вязкопластические оползни представляют собой оползни-потоки, которые образуются в увлажненных пластичных глинистых грунтах и смещаются по подстилающему их скальному основанию, сложенному вулканогенными породами (рис. 12 а). Мощность оползневых отложений не превышает первых метров. Оползни скольжения (блоковые) образуются в сильно аргиллизированных вулканитах или плотных гидротермальных глинах с высоким содержанием кремнистых минералов (рис.12 б,в). У них хорошо выражены стенка отрыва и оползневое тело или их серия. По долинам ручьев встречаются отложения грязевых и грязекаменных

потоков, которые формируются при сильном увлажнении гидротермальных глинистых отложений в результате снеготаяния или обильных атмосферных осадков, с последующим их смещением в виде потоков (рис. 12 г).

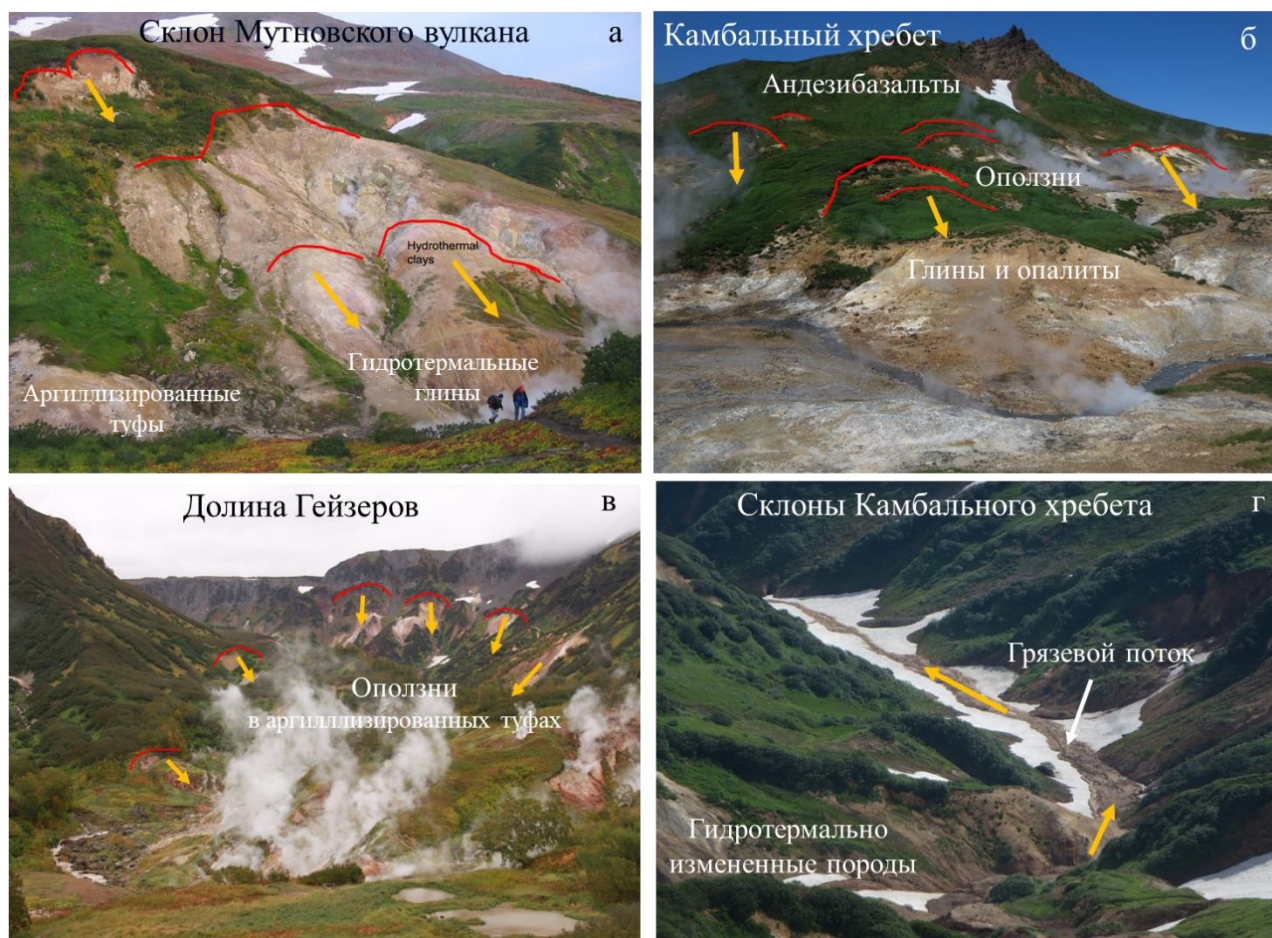


Рисунок 12 – Разнообразные формы оползней в исследованных геотермальных районах: а – вязкопластические оползни-потоки в гидротермальных глинах в районе Дачного участка Мутновского вулкана; б – мелкоблоковые оползни скольжения в гидротермально измененных андезибазальтах и глинисто-опалитовых отложениях на Южно-Камбальном Дальнем т/п; в - мелкоблоковые оползни скольжения в аргиллизированных туфах в Долине Гейзеров; г – грязевой поток в долине ручья на склоне Камбального хребта

Помимо формирования оползней в приповерхностном горизонте, известны случаи возникновения крупномасштабных оползней сложного механизма и каменных лавин, представляющих опасность при освоении геотермальных районов. Так, например, Долина Гейзеров приобрела широкую известность после произошедшего в июне 2007 года катастрофического оползня, который полностью изменил рельеф, образовал завальную плотину и подпрудное озеро, перекрыв р. Гейзерную, разрушил или изменил режим ряда гейзеров, разрушил вертолетные площадки и хозяйственные постройки и только по счастливой случайности не привел к человеческим жертвам (рис.13). Установлено, что помимо «классических» причин, способствующих возникновению оползня,

дополнительным важным фактором явилась интенсивная гидротермальная аргиллизация слагающих склон туфов, сопровождающаяся резким снижением их прочностных свойств, вплоть до формирования в массиве отдельных горизонтов и линз гидротермальных глин (Frolova et al., 2014; Фролова и др., 2015; Gvozdeva, Frolova, Zerkal, 2015). Следует обратить внимание, что ежегодно Долину Гейзеров посещают тысячи туристов, при том, что это одно из самых опасных мест на Камчатке из-за интенсивного развития оползневых процессов.

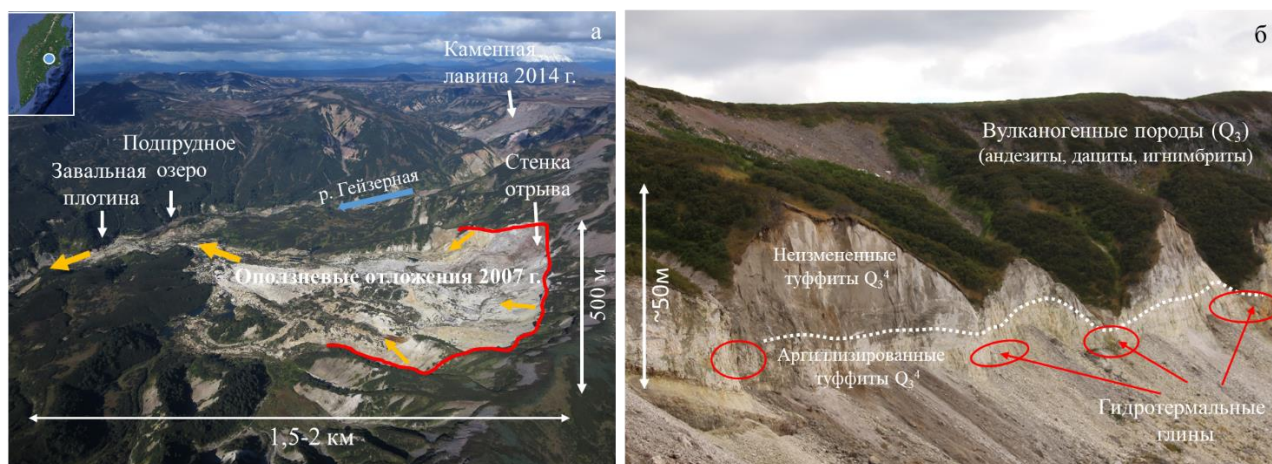


Рисунок 13 - Оползень сложного механизма, образовавшийся в 03.06.2007 в Долине Гейзеров: а - общий вид, б – распределение пород в стенке отрыва

Взаимосвязь процессов, вызванных гидротермальной деятельностью.

Установлено, что процессы и явления, возникающие в результате гидротермальной деятельности, взаимосвязаны между собой и представляют определенную последовательность событий, образуя парагенетические ряды (рис.14). Рассмотрим на примерах.

Гидротермальная активность в приповерхностных горизонтах сопровождается выщелачиванием, аргиллизацией и ослаблением пород, что способствует активизации ряда экзогенных процессов, среди которых наиболее проявлены эрозионная деятельность и оползни. Интенсивная эрозия приводит к формированию отрицательных форм рельефа; при обрушении склонов также изменяется рельеф, что в свою очередь, в совокупности с изменением свойств пород, может повлиять на режим и местоположение термопроявлений. В результате миграции термопроявлений смещается область активной переработки пород, она захватывает новые участки и цикл повторяется.

Преобразования горных пород, происходящие в недрах ГТС (до глубины 1-2 км и более) и вызванные ими изменения упруго-плотностных характеристик, в значительной степени влияют на напряженно-деформированное состояние массива (Панасьян, Фролова, Шанина, 2017). В свою очередь, это может

отразиться на термодинамических условиях, в том числе, на фазовом состоянии флюида, при резком изменении которого появляется вероятность возникновения гидротермальных взрывов.



Рисунок 14 – Некоторые геологические последствия и явления, вызванные гидротермальной деятельностью, и их взаимосвязь

Сопровождающие гидротермальную деятельность процессы выщелачивания или, напротив, залечивание пустот вторичными минералами, изменяют структуру проницаемости массива, что отражается на гидрогеологической обстановке.

Следует отметить, что рассмотренные геологические процессы происходят в ходе естественной эволюции ГТС, однако также они могут активизироваться в результате эксплуатации геотермальных месторождений. Кроме того, существуют сугубо антропогенные явления, например, сброс отработанных термальных вод из эксплуатационных скважин в ручьи и овраги, приводящий к расцвету термофильных водорослей и образованию на поверхности своеобразного кремнистого чехла, напоминающего природные гейзериты (Frolova et al., 2006).

В целом, вызванные гидротермальной деятельностью процессы оказывают большое влияние на геологическую среду и должны учитываться при хозяйственном освоении территорий и планировании туристических маршрутов. Они могут не только нанести ущерб хозяйственным объектам, но в некоторых случаях представляют опасность для жизни людей.

Обобщение материала позволяет сделать заключение, что гидротермальные процессы, и в частности, гидротермальные преобразования пород, можно рассматривать в числе важнейших факторов формирования инженерно-геологических условий территорий геотермальных районов. Это заключение отражено в четвертом защищаемом положении (см. стр.9)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных на современных гидротермальных системах Курило-Камчатской вулканической дуги, выявлены основные закономерности и предложена модель формирования физико-механических свойств гидротермально-метасоматических пород, разработана их инженерно-геологическая классификация и обоснована роль гидротермальной переработки пород как важнейшего фактора формирования инженерно-геологических условий территорий геотермальных районов.

В пределах гидротермальных систем вулканогенные породы неоген-четвертичного возраста трансформируются в гидротермальные метасоматиты, обладающие существенно иными физическими и физико-механическими характеристиками. Для каждого типа гидротермально-метасоматических пород описаны условия формирования, прослежена последовательность и стадии структурно-минералогических преобразований и соответствующая им динамика изменения свойств, которая зависит от особенностей исходных пород, параметров флюида и продолжительности взаимодействия «раствор-порода».

Разработана инженерно-геологическая классификация гидротермально-метасоматических пород вулканических областей.

Установлено, что образующиеся в недрах ГТС под действием средне-высокотемпературных растворов ($T > 250^{\circ}\text{C}$) *вторичные кварциты и среднетемпературные пропилиты*, а также приуроченные к зонам фазового перехода «жидкость–пар» *кварц-адуляровые метасоматиты*, принадлежат к группе скальных грунтов, обладающих наиболее высокими физико-механическими характеристиками среди гидротермальных метасоматитов за счет прочных фазовых контактов кристаллизационного типа между новообразованными минералами.

Низкотемпературные пропилиты также относятся к группе скальных грунтов, но отличаются пониженными физико-механическими свойствами вследствие формирования менее прочных минералов с более слабыми контактами между ними, а также вторичной пористости, ослабляющей породу.

Аргиллизированные пропилиты и аргиллизиты, охватывающие большие объемы пород в верхних частях ГТС, относятся преимущественно к полускальным грунтам средней плотности, сильнопористым, гигроскопичным, размягчаемым. Их инженерно-геологические особенности обусловлены наличием смешанных типов контактов между структурными элементами, среди

которых преобладают фазовые, но присутствуют и более слабые контакты переходного типа, образованные глинистыми минералами.

Особую группу образуют *опалиты*, формирующиеся в приповерхностной зоне в условиях сернокислотного выщелачивания, которые несмотря на высокую пористость, представляют собой скальные неразмягчаемые грунты, отличающиеся повышенными прочностными и деформационными характеристиками за счет жесткого кремнистого «каркаса».

Наиболее сложными и неблагоприятными в инженерно-геологическом плане являются *гидротермальные глины*, образующиеся в результате полной переработки вулканических пород в приповерхностной зоне термальных полей и обладающие рядом специфических свойств.

В итоге предложена модель формирования свойств пород гидротермально-метасоматического генезиса, в которой обобщена и систематизирована информация об исходных породах, условиях и стадиях их преобразования, вторичных минеральных ассоциациях; отражена динамика изменения свойств при гидротермальных процессах и определяющие ее факторы; приведена инженерно-геологическая характеристика новообразованных гидротермально-метасоматических пород.

Доказано, что вулканогенно-осадочные толщи, локализованные в пределах ГТС, отличаются от региональных разрезов зональным характером изменения физико-механических свойств, сформированным вследствие дифференциации состава и температуры гидротерм и зонального распределения вторичных минеральных ассоциаций.

Установлено, что в ходе эволюции ГТС происходит постепенная дифференциация пород по свойствам в соответствии с формирующимися гидротермально-метасоматическими зонами: увеличивается разница в свойствах между зонами и возрастает однородность пород внутри каждой отдельной зоны.

Показано, что масштабные преобразования пород, происходящие в недрах и на поверхности гидротермальных систем, изменяют все компоненты инженерно-геологических условий соответствующих территорий, в том числе, способствуют активизации различных геологических процессов, связанных в своем развитии в парагенетические ряды.

Закономерности, установленные для гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги, могут быть экстраполированы на другие аналогичные районы современных вулканических областей. В частности, выявленные специфические особенности гидротермально измененных толщ, в

составе которых одновременно могут находиться контрастные по составу и свойствам грунты различных классов и групп, необходимо принимать во внимание при проведении инженерно-геологических исследований в геотермальных районах. Кроме того, при подготовке соответствующих заключений об инженерно-геологических условиях, необходимо учитывать возможность возникновения опасных геологических процессов, связанных с гидротермальной переработкой пород.

Публикации автора по теме диссертации

Научные статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, RSCI:

1. Ладыгин, В.М. Петрофизические свойства пород Паужетского месторождения парогидротерм (Южная Камчатка) / В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов, **Ю.В. Васильева (Фролова)**, Н.А. Румянцева, С.И. Вебер // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 6. – С. 95-110. – Импакт-фактор WoS (2019): 0.543. РИНЦ (2019): 1.469. Объем публикации 1,85 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
2. **Васильева (Фролова), Ю.В.** Роль гидротермального процесса в формировании физико-механических свойств вулканитов / Ю.В. Васильева (Фролова) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 1992. – № 3. – С.85-91. – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. Объем публикации 0,5 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
3. **Фролова, Ю.В.** О природе инженерно-геологических свойств гидротермально-метасоматических пород Курило-Камчатского региона / Ю.В. Фролова, Г.А. Голодковская, В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 1999. – № 3. – С. 36-42. – Импакт-фактор SJR (1999): 0.108. Объем публикации 0,8 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
4. Панасьян, Л.Л. Упругая анизотропия метасоматитов Океанского парогидротермального месторождения / Л.Л. Панасьян, В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова**, З.А. Кривошеева // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2000. – №1. – С.47-54. – Импакт-фактор SJR (2000): 0.109. Объем публикации 0,9 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.
5. Ладыгин, В.М. Преобразование рыхлых пирокластических отложений в туфы / В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов, **Ю.В. Фролова**, В.Н. Соколов, В.Г. Шлыков, О.А. Гирина // Вулканология и сейсмология. – 2001. – № 4. – С. 29-38. – Импакт-фактор SJR (2001): 0.152. РИНЦ (2019): 1.469. Объем публикации 1,2 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
6. Ладыгин, В.М. Использование показателя плотности твердой фазы для классификации эффузивов / В.М. Ладыгин, А.А. Макаров, **Ю.В. Фролова** // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2002. – № 1. – С. 57-60. – Импакт-фактор РИНЦ (2008): 0.265. Объем публикации 0,5 п.л., вклад соискателя 0,1 п.л.
7. Ладыгин, В.М. Особенности петрофизических свойств эффузивов Ключевского вулкана / В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова** // Вулканология и сейсмология. – 2002. – № 3.

- С. 28-32. – Импакт-фактор SJR (2002): 0.132. РИНЦ (2019): 1.469. Объем публикации 0,6 п.л., вклад соискателя 0,3 п.л.
8. Ладыгин, В.М. Закономерности изменения инженерно-геологических свойств плиоцен-четвертичных эффузивов Камчатского и Кавказского регионов / В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова**, Г.А. Голодковская, Л.Л. Панасьян, З.А. Кривошеева // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2002. – № 1. – С. 27-33. – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публикации 0,8 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
9. Салтыковский, А.Я. Плотности гидротермально измененных пород вулкана Баранский (о. Итуруп) после воздействия высоких Р-Т / А.Я. Салтыковский, Н.И. Дьяур, Р.М. Насимов, **Ю.В. Фролова**, В.М. Ладыгин, Ю.С. Геншафт, А.В. Матвеев // Физика Земли. – 2004. – №4. – С. 88-93. – Импакт-фактор WoS (2004): 0.280. РИНЦ (2019): 1.598. Объем публикации 0,8 п.л., вклад соискателя 0,1 п.л.
10. **Фролова, Ю.В.** Влияние геологических и структурно-минералогических факторов на свойства вулканогенно-обломочных пород / Ю.В. Фролова // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2007. – №1. – С. 39-46. – <https://doi.org/10.3103/S014587520701005X> – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публикации 0,9 п.л., вклад соискателя 0,9 п.л.
11. **Фролова, Ю.В.** Особенности состава, строения и свойств вулканогенно-обломочных пород / Ю.В. Фролова // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – № 1. – 2008. – С. 30-38. – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публикации 1,05 п.л., вклад соискателя 1,05 п.л.
12. **Фролова, Ю.В.** Петрофизические преобразования пород Мутновского вулканического района (Южная Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов / Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008 – № 1. – Вып. 11. – С. 158-170. – Импакт-фактор РИНЦ (2008): 0.238. Объем публикации 1,5 п.л., вклад соискателя 1 п.л.
13. **Фролова, Ю.В.** Закономерности изменения состава и свойств гиадокластитов Исландии в процессе литогенеза / Ю.В. Фролова // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2010. – № 2. – С. 45-55. – <https://doi.org/10.3103/S0145875210020067>. – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публ. 1,3 п.л., вклад соискателя 1,3 п.л.
14. **Фролова, Ю.В.** Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов / Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов // Инженерная геология. – 2011. – №1. – С.48-64. – Импакт-фактор РИНЦ (2011): 0.586. Объем публикации 2 п.л., вклад соискателя 1 п.л.
15. **Фролова, Ю.В.** Закономерности преобразования состава и свойств вулканогенных пород в гидротермально-магматических системах Курило-Камчатской островной дуги / Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2011. – №6. – С. 52-60. – <https://doi.org/10.3103/S0145875211060044>. – Импакт-фактор SJR (2020): 0.315. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публ. 1,1 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.

16. Ладыгин В.М. Петрофизические особенности лавовых потоков вулкана Безымянный, Камчатка / В.М. Ладыгин, О.А. Гирина, **Ю.В. Фролова** // Вулканология и сейсмология. – 2012. – № 6. – С. 18-30. – Импакт-фактор SJR (2012): 0.372. РИНЦ (2012): 0.930. Объем публикации 1,4 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
17. Ладыгин, В.М. Преобразование эффузивных пород под действием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о-в Итуруп) / В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова**, С.Н. Рычагов // Вулканология и сейсмология. – 2014. – №1. – С.20-37. – <https://doi.org/10.1134/S0742046314010035> – Импакт-фактор SJR (2014): 0.375. РИНЦ (2014): 1.025. Объем публикации 2 п.л., вклад соискателя 0,7 п.л.
18. **Frolova, J.V.** Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril–Kamchatka island arc / J. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov, D. Zukhubaya // Engineering Geology. – 2014. – Vol. – 183. P. 80-95. – DOI 10.1016/j.enggeo.2014.10.011. – Импакт-фактор WoS (2014): 2.594 (Q1). Объем публикации 1,85 п.л., вклад соискателя 1,5 п.л.
19. **Фролова, Ю.В.** Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка) / Ю.В. Фролова, И.П. Гвоздева, М.С. Чернов, Н.П. Кузнецов // Инженерная геология. – 2015. – № 6. – С.30-43. – Импакт-фактор РИНЦ (2015): 0.342. Объем публикации 1,6 п.л., вклад соискателя 0,8 п.л.
20. Ладыгин, В.М. Формирование физико-механических свойств эффузивных пород / В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова**, Э.М. Спиридонов // Инженерная геология. – 2016. – № 3. – С.36-45. – Импакт-фактор РИНЦ (2016): 0.30. Объем публикации 1,2 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
21. Панасьян, Л.Л. О возможном распределении напряжений в породах гидротермальных систем / Л.Л. Панасьян, **Ю.В. Фролова**, В.В. Шанина // Инженерная геология. – 2016. – № 6. – С.38- 47. – Импакт-фактор РИНЦ (2016): 0.30. Объем публикации 1,2 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
22. **Фролова, Ю.В.** Изменение физико-механических свойств андезитов около термального источника (Большебанный геотермальный район, полуостров Камчатка) / Ю.В. Фролова, А.М. Мосин // Инженерная геология. – 2016. – № 4. – С. 38-47. – Импакт-фактор РИНЦ (2016): 0.30. Объем публ. 1,2 п.л., вклад соискателя 0,8 п.л.
23. **Фролова, Ю.В.** Динамика изменения физико-механических свойств пород Северо-Парамуширской гидротермально-магматической системы (Курильские о-ва) / Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов, В.М. Ладыгин, М.В. Лучко, М.С. Чернов, И.А. Бойкова // Вулканология и сейсмология. – 2016. – № 3. – С. 22-40. – DOI: 10.7868/S0203030616030032 – Импакт-фактор SJR (2016): 0.421. РИНЦ (2016): 0.974. Объем публикации 2,1 п.л., вклад соискателя 1 п.л.

24. **Фролова, Ю.В.** Изменение физико-механических свойств перлитов под действием гидротермальных процессов (Ягоднинское месторождение, Южная Камчатка) / Ю.В. Фролова, Э.М. Спиридонов, В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов, И.Е. Большаков // Инженерная геология. – 2017. – № 5. – С. 26-39. – DOI: 10.25296/1993-5056-2017-5-26-38 – Импакт-фактор РИНЦ (2017): 0.398. Объем публ. 1,6 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
25. **Фролова, Ю.В.** О физико-механических свойствах метавулканитов Горного Крыма / Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин, Э.М. Спиридонов, Г.Н. Овсянников // Инженерная геология. – 2018. – Т. 13. – № 4-5. – С.36-51. – DOI: 10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-36-51 – Импакт-фактор РИНЦ (2017): 0.398. Объем публикации 1,9 п.л., вклад соискателя 1 п.л.
26. Ладыгин, В.М. О явлении аномально низких значений скоростей продольных волн современных базальтоидов / В.М. Ладыгин, **Ю.В. Фролова**, Э.М. Спиридонов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2018. – Т. 37. – № 1. – С. 20-31. – Импакт-фактор РИНЦ (2018): 0.738. Объем публикации 1,2 п.л., вклад соискателя 0,4 п.л.
27. Спиридонов, Э.М. Островодужные авгит-битовнит-лабрадоровые дациты Карадага, Крым / Э.М. Спиридонов, Н.Н. Коротаева, Н.Н. Кривицкая, В.М. Ладыгин, Г.Н. Овсянников, Е.В. Путинцева, Е.С. Семиколенных, **Ю.В. Фролова** // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. – 2019. – № 5. – С. 53-61. – Импакт-фактор SJR (2019): 0.332. РИНЦ (2019): 0.759. Объем публикации 1 п.л., вклад соискателя 0,1 п.л.
28. **Фролова, Ю.В.** Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) / Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов, М.С. Чернов, К.И. Суровцева, Р.А. Кузнецов, И.Е. Большаков // Инженерная геология. – 2020. – Т.15. – № 1. – С. 36-51. – Импакт-фактор РИНЦ (2019): 0.315. Объем публикации 1,73 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
29. **Frolova, J.V.** The influence of hydrothermal argillization on the physical and mechanical properties of tuffaceous rocks: a case study from the Upper Pauzhetsky thermal field, Kamchatka / J.V. Frolova, M.S. Chernov, S.N. Rychagov, V.M. Ladygin, V.N. Sokolov, R.A. Kuznetsov // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – Springer Verlag (Germany) – 2021. – Vol. 80. – P. 1635-1651. – <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02007-2>. – Импакт-фактор JCR (2020): 4.298 (Q1). Объем публ. 2 п.л., вклад соискателя 1 п.л.

Другие научные труды

Разделы в коллективных монографиях

30. Ладыгин, В.М. Петрофизические свойства пород гидротермальной системы / В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов, Ю.В. **Васильева (Фролова)**, З.А. Кривошеева // Структура гидротермальной системы. Коллективная монография. – М.: Наука, 1993. – С.120-146. – Объем публикации 1,5 п.л., объем вклада соискателя 0,4 п.л.
31. Инженерная геология России. Т.1. Грунты России. Коллективная монография / Под ред. В.Т. Трофимова, Е.А. Вознесенского, В.А. Королева. – М.: КДУ, 2011. – 672 с. – ISBN 978-5-98227-753-4. – Объем публикации 78,12 п.л., вклад соискателя 2,4 п.л.

32. Спиридонов, Э.М. Агаты в метавулканитах. Геологические обстановки, параметры и время превращения вулканитов в мандельштейны с агатами / Э.М. Спиридонов, В.М. Ладыгин, Д.Я. Янакиева, **Ю.В. Фролова**, Е.С. Семиколенных. – М.: «МОЛНЕТ» Спец. вып. журнала «Вестник РФФИ», 2014. – 72 с. – Объем публикации 3 п.л., вклад соискателя 0,5 п.л.
 33. Инженерная геология России. Т.3. Инженерно-геологические структуры России. Коллективная монография. – М.: КДУ, 2015. – 710 с. – ISBN 978-5-98227-943-9. – Объем публикации 82,54 п.л., вклад соискателя 2,4 п.л.
- Статьи в сборниках из баз SCOPUS и WoS*
34. **Frolova, J.V.** The peculiarities of effusive leaching under the action of acid thermal water / J. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov // Proceedings, 10th Int. Symp. Water-Rock Interaction –WRI-10. – Villasimius, Italy, 2001. – Vol.2. – P.827-830. Объем публикации 0,4 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.
 35. **Frolova, J.V.** Geothermal reservoir study through petrophysical data / J. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov // Geoth. Res. Council Transactions – 2001. – Vol. 25. – 2001. – P.401-403. – Объем публикации 0,4 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.
 36. **Frolova, J.V.** Petrophysical properties of argillitization zone in geothermal fields / J. Frolova, V. Ladygin, S. Rychagov // Geoth. Res. Council Transactions. – San-Diego, USA, 2006 – Vol. 30. – P. 909 - 912. <https://www.Geothermal-library.org/index.php?mode=pubs&action=view&record=1025149> – Объем публикации 0,5 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.
 37. Franzson, H. Porosity, density and chemical composition relationships in altered Icelandic hyaloclastites / H. Franzson, G.H. Gudfinnsson, H.M. Helgadottir, **J.V. Frolova** // Water-Rock Interaction. – Taylor & Francis Group London, 2010. – P. 199-202. – Объем публикации 0,4 п.л., вклад соискателя 0,1 п.л.
 38. **Frolova, J.V.** Physical and mechanical properties of rocks in the hydrothermal systems of the Kuril-Kamchatka island arc / **J.V. Frolova**, V.M. Ladygin, D.Z. Zukhubaya // Engineering Geology for Society and Territory. Climate Change and Engineering Geology – Springer Int. Publ. Switzerland, 2015 – Vol. 1. – P. 337-340 – DOI: 10.1007/978-3-319-09300-0 – Объем публикации 0,46 п.л., вклад соискателя 0,3 п.л.
 39. **Frolova, J.V.** Alteration of volcanic rocks on the geothermal fields of Kuril-Kamchatka arc / **J.V. Frolova** // Volcanic Rocks and Soils. / Edited by T.Rotonda, M.Cecconi, F.Silvestri, P. Tommasi – Taylor & Francis Group, CRC Press / Balkema London, UK, 2015 – P. 99- 100. – <https://doi.org/10.1201/b18897> – Объем публикации 0,2 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.
 40. **Frolova, J.V.** Alteration of volcanic rocks and changes in physical-mechanical properties on the South-Kambalny thermal field (South Kamchatka / J.V. Frolova, M.S. Chernov, S.N. Rychagov, R.A. Kuznetsov, K.I. Surovtseva // E3S Web Conf. – 2019. – Vol. 98. – 08019. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808002> – Объем публикации 0,7 п.л., вклад соискателя 0,2 п.л.