

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Большаков Илья Евгеньевич**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И  
СВОЙСТВ АНДЕЗИТОВ И АНДЕЗИБАЗАЛЬТОВ НА  
ТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЯХ ПАУЖЕТСКО-КАМБАЛЬНОГО  
РАЙОНА И МАССИВА БОЛЬШОЙ СЕМЯЧИК  
(КАМЧАТКА)**

Специальность:

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научные руководители:** **Фролова Юлия Владимировна,**  
*доктор геолого-минералогических наук, доцент*

**Трофимов Виктор Титович,**  
*доктор геолого-минералогических наук, профессор*

**Официальные оппоненты:** **Фоменко Игорь Константинович,**  
*доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ-РГГРУ), гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии, профессор*

**Бычков Андрей Юрьевич,**  
*доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор РАН, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, заведующий кафедрой геохимии*

**Гирина Ольга Алексеевна,**  
*кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН «Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН», лаборатория активного вулканизма и динамики извержений, ведущий научный сотрудник*

Защита диссертации состоится 15 декабря 2023 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 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 диссертационного совета: [mgu.04.01@mail.ru](mailto: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 портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.1/2748>

Автореферат разослан 10 ноября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук



Н.А. Харитоновна

## Введение

**Актуальность работы.** Одной из важнейших фундаментальных задач грунтоведения является изучение закономерностей формирования состава, строения, состояния и свойств всего глобального многообразия грунтов, слагающих верхние горизонты земной коры, что позволяет понять принципы формирования тех или иных грунтов, а также их свойств. Одним из наиболее актуальных для изучения в этом отношении типов грунтов являются гидротермально-метасоматические грунты, образование которых на термальных полях активных вулканических областей происходит с высокой скоростью с точки зрения геологического времени.

Гидротермально-метасоматические грунты слагают обширные площади в активных вулканических областях и при этом представлены весьма широким спектром пород, так как конечный продукт гидротермального метасоматоза зависит от множества факторов, таких как параметры глубинного очага тепла, термодинамические и гидрогеохимические параметры глубинного термального флюида и вся последовательность его эволюции, происходящая при его подъеме к поверхности, а также генезис, состав и строение исходной, подверженной гидротермальным преобразованиям породы. Гидротермальные преобразования вызывают радикальные изменения состава, строения и свойств вулканогенных грунтов. Они могут приводить к разуплотнению, снижению деформационных и прочностных характеристик, но порой вызывать и обратный процесс, заключающийся в повышении плотности, снижении пористости и увеличении деформационных и прочностных параметров изменяемых пород. В то же время с геологической точки зрения эти изменения происходят достаточно быстро, что может повлечь за собой целый ряд негативных последствий, напрямую влияющих на жизнедеятельность человека.

Особенно актуальными для изучения являются термальные поля и слагающие их породы полуострова Камчатка, поскольку именно в этом регионе они особенно широко распространены и порой располагаются в непосредственной близости от мест проживания и деятельности человека.

**Степень разработанности.** Вопросы гидротермальных преобразований горных пород в активных вулканических областях и, в частности на термальных полях, рассматриваются в работах таких авторов, как Б.И. Пийп, С.И. Набоко, В.И. Белоусов, Е.А. Вакин, Г.Т. Воллостных, Г.А. Карпов, Б.П. Золотарев, В.А. Ерощев-Шак, С.Н. Рычагов, А.Д. Коробов, А.Ю. Бычков, и многих других, однако стоит отметить, что большая часть исследователей подходила к вопросам изучения гидротермально измененных пород, в том числе на термальных полях, с

точки зрения геохимии, гидрогеологии, динамической геологии, процесса рудообразования. В то же время с позиций инженерной геологии гидротермальные преобразования, особенно с точки зрения их влияния на свойства изменяемых пород, изучены недостаточно. Этим вопросом занимался значительно меньший коллектив авторов, среди которых можно выделить Ю.В. Фролову, М.С. Чернова, В.М. Ладыгина, В.В. Шанину, а также зарубежных специалистов: А. Pola, V. Navelot, P. Siratovich, M. Hear, L. Wyering, M. Villeneuve, R. Potro. Можно утверждать, что такие формации, как аргиллизиты и опалиты, формирующиеся в верхних горизонтах современных термальных полей, изучены недостаточно. В частности, не для всех типов вулканогенных пород изучены эффекты, оказываемые опаллизацией и аргиллизацией на свойства этих пород, отсутствуют общепринятые методики оценки степени изменения пород, классификации пород по степени изменения и методы полевой экспресс-оценки этих свойств и степени изменения. Также зачастую процессы гидротермальных преобразований представляют как однонаправленные, тем самым упрощая и искажая характер их воздействия на породу.

**Цель работы:** выявление закономерностей изменения состава и свойств андезитов и андезибазальтов на современных термальных полях Паужетско-Камбального и Семьячинского районов Камчатки, характеризующихся различными гидрохимическими условиями.

**Задачи исследования:**

- 1) установить последовательность и стадии гидротермальных преобразований пород на термальных полях с разгрузкой среднекислых до слабощелочных флюидов и оценить соответствующие им изменения физических и физико-механических свойств;
- 2) установить последовательность и стадии гидротермальных преобразований пород на термальных полях с разгрузкой кислых и ультракислых сульфатных флюидов и оценить соответствующие им изменения физических и физико-механических свойств;
- 3) провести экспериментальное моделирование процесса сернокислотного выщелачивания вулканогенных пород в условиях закрытой системы и оценить возможность его применения для воссоздания природных обстановок в лабораторных условиях;
- 4) выявить тенденции изменения свойств гидротермально преобразованных пород, которые подвержены процессам как выщелачивания, так и новообразования минералов в существующих пустотах;
- 5) обосновать возможность применения полевых методов экспресс-оценки свойств гидротермально измененных пород на таких высокодинамичных геологических объектах, как термальные поля.

**Объект исследования:** вулканогенные породы четвертичного возраста различной степени гидротермальной измененности, слагающие термальные поля Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик на полуострове Камчатка.

**Фактический материал** данной работы был собран автором в течение 6 полевых сезонов на различных термальных полях полуострова Камчатка. Полевые работы проходили совместно с сотрудниками лаборатории геотермии и лаборатории минералогии ИВиС ДВО РАН. Автор лично участвовал в полевых работах на термальных полях Паужетско-Камбального района в 2017-2019, 2021-2022 гг. и термальных полях массива Большой Семячик в 2020 году. Всего за это время было отобрано более 100 образцов вулканогенных пород различной степени гидротермальной измененности.

**Научная новизна работы:**

1. Выявлен ряд аргиллизаций андезитов и андезибазальтов под действием околонейтральных и слабощелочных термальных растворов на термальных полях и впервые охарактеризованы свойства пород на выделенных стадиях изменения, а также разработана классификация аргиллизированных пород по степени их измененности, основанная на величине пористости.
2. На термальных полях, характеризующихся разгрузкой сильноокислых гидротерм, выявлена последовательность преобразования андезибазальтов в опалиты. Впервые детально рассмотрен процесс последующего преобразования опалитов после достижения гомогенизации их состава, проявляющийся в трансформации структуры опалитов из псевдоморфной в колломорфную, образующуюся за счет дальнейшего выщелачивания кремнистого скелета, а также отложения опала из термальных растворов в порах. Разработана классификация опализированных пород по степени их измененности, основанная на величине пористости.
3. В результате моделирования процесса опализации в лабораторных условиях выявлены закономерности изменения свойств пород на начальных этапах опализации. Впервые описан механизм образования трещин в породах с порфировой структурой за счет неравномерного увеличения объема вкрапленников и основной массы; получен ряд закономерностей, позволяющих определить скорость протекания процесса опализации в природных условиях.
4. Описан механизм двустороннего изменения состава и свойств андезибазальтов на термальных полях, при котором на соседних участках породы происходит выщелачивание и отложение отдельных минералов в порах, что приводит к разнонаправленному изменению свойств даже на расстоянии в несколько сантиметров.

5. Обнаружен и описан новый генетический тип «молодых» агатов, образующихся на термальных полях, расположенных на четвертичных вулканических постройках и имеющих значительно меньший возраст, чем у классических агатоносных толщ.
6. Впервые обоснована возможность применения экспресс-методов (молотка Шмидта и портативного рентген-флуоресцентного спектрометра) для количественной оценки показателей свойств гидротермально измененных пород.

**Теоретическая и практическая значимость работы** обусловлена недостаточной изученностью вопросов влияния гидротермальных преобразований на состав и свойства вулканогенных пород на термальных полях, а также высоким интересом к гидротермально активным районам планеты, особенно в связи с их высоким энергетическим потенциалом. Присутствие в этих районах геотермальных электростанций и сопутствующих сооружений, а также большого количества туристических маршрутов требует обеспечения детального понимания процессов изменения состава и свойств гидротермально измененных пород. Особенно актуален данный вопрос в связи с тем, что крупные обвалы и оползни, вызванные гидротермальными преобразованиями пород в присклоновых массивах, уже происходили на территории полуострова Камчатка. Также значимость работы подтверждается детальным рассмотрением процесса опалитизации как на природных опалитизированных образцах, так и на подвергшихся кислотному выщелачиванию в лабораторных условиях, в результате чего было показано, что гидротермальные изменения продолжают происходить в опалитах даже после гомогенизации их состава.

**Методология исследования.** Основой принципа данного исследования является историко-геологический подход, введенный в грунтоведение М.М. Филатовым, развиваемый и используемый до сих пор большинством исследователей в области инженерной геологии. Согласно этому подходу, инженерно-геологические особенности горных пород определяются их генезисом, характером постгенетических преобразований и текущим пространственным положением. Одной из главных задач было построение из отобранных образцов принципиальных рядов гидротермальных преобразований: от неизмененных андезитов и андезибазальтов к полностью преобразованным продуктам гидротермального метасоматоза.

Принципиальную схему получения научного знания в рамках данной работы можно представить следующим образом: первоначально была поставлена и обоснована проблема, требующая детального изучения, затем был произведен выбор объекта исследований, в соответствии с поставленным вопросом. В данной работе были выбраны и исследованы

термальные поля, сложенные идентичными породами, но различающиеся по гидрохимическим условиям. Далее для каждого термального поля получены частные закономерности изменения состава и свойств вулканогенных пород в результате гидротермальной активности. В итоге проведено сравнение термальных полей, сделано обобщение и сформулированы общие закономерности изменения пород под действием аргиллизации и опализации на термальных полях.

#### **Защищаемые положения:**

1. Под действием разгружающихся среднекислых до слабощелочных термальных флюидов массивные андезиты и андезибазальты испытывают аргиллизацию, интенсивность которой можно оценить по величине пористости, увеличивающейся с повышением степени измененности пород: менее 7% у неизмененных пород, 7-12% у слабо аргиллизированных, 12-20% - у средне аргиллизированных и более 20% у сильно аргиллизированных.
2. На термальных полях с разгружающимися сильнокислыми и ультракислыми (pH ~ 1,4-4) сульфатными флюидами массивные андезибазальты интенсивно выщелачиваются, разуплотняются и разупрочняются, замещаясь кремнистыми минералами, вплоть до полной трансформации в опалиты, причем структурно-текстурные особенности и свойства последних продолжают изменяться и далее. Количественным показателем, характеризующим степень опализации, может служить величина пористости, значения которой в 7%, 20% и 40% разделяют неизмененные породы, опализированные породы, опалиты с псевдоморфной структурой и опалиты с колломорфной структурой, соответственно.
3. На современных термальных полях гидротермальные преобразования носят разнонаправленный характер, проявляясь в процессах как выщелачивания исходных пород, так и образования новых минералов в существующих полостях, что приводит к разнонаправленному изменению пористости и физико-механических свойств пород. В результате осаждения кремнистого вещества из кислых растворов в пустотах вулканогенных пород образуются агаты, характеризующиеся бледными окрасками и хаотичным рисунком полосчатости, которые можно рассматривать как новый генетический тип.
4. В условиях сильной пространственной изменчивости пород на термальных полях для оценки показателей физико-механических свойств целесообразно применять метод упругого отскока молотка Шмидта, что обосновывается тесными корреляционными зависимостями, установленными между величиной упругого отскока и показателями плотностных, деформационных и прочностных свойств.

**Апробация работы.** Основные теоретические аспекты и полученные результаты, рассматриваемые в диссертационной работе, неоднократно докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2019, 2020); XXIV, XXVI ежегодных научных конференциях, посвящённых Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» (ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2021, 2023); Международном геотермальном конгрессе WGC (Рейкьявик, Исландия, 2021); XXIII Сергеевских чтениях. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения (Санкт-Петербург, 2022); XII Международной школе по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2022) (Петропавловск-Камчатский, 2022); VI Всероссийской научной конференции «Геодинамика и минерагения Северной Евразии» (Улан-Удэ, 2023).

**Благодарности.** Автор данной работы искренне благодарен своих научных руководителей: доктора геолого-минералогических наук, доцента Фролову Юлию Владимировну за предоставленные возможности, мотивацию к работе и формирование научного кругозора; доктора геолого-минералогических наук, профессора Трофимова Виктора Титовича за ценные советы, объяснения и побуждение к действию. Автор по-настоящему признателен всему коллективу кафедры инженерной и экологической геологии, в особенности – М.С. Чернову и А.Б. Ермолинскому В.М. Ладыгину, Е.Н. Самарину, С.К. Николаевой.

Автор благодарит сотрудников института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН: С.Н. Рычагова и Е.С. Житову за тщательную организацию полевых работ, А.А. Нуждаева и И.А. Нуждаева за полученные навыки и помощь в обеспечении безопасных и плодотворных полевых работ, С.О. Феофилактова, Р.А. Кузнецова, Ю.Ю. Букатова, а также директора института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН А.Ю. Озерова за помощь и ценные советы.

В особенности автор благодарит своих родителей Е.В. Большакова и О.М. Соколову за личностное становление, всестороннюю помощь и предоставленную свободу, а также – П.А. Романенко за поддержку и понимание на всех этапах создания данной работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 222 страницах и состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и приложения. Текст содержит 8 таблиц и 144 рисунка.



# ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

## Глава 1. Современные представления о влиянии гидротермальных преобразований на состав и свойства вулканогенных пород

Гидротермальные системы и термальные поля были объектом интереса человеческой цивилизации с момента ее зарождения. В современном мире геотермальные ресурсы недр Земли, широко используемые в вулканически активных областях планеты, являются значительным источником как тепла, так и электричества для миллионов людей. Также гидротермально измененные породы являются источниками полезных ископаемых (Фролова и др., 2017). Существуют специфические районы, где происходит естественная разгрузка разогретых термальных вод и пара на дневную поверхность. В этих местах образуются термальные поля, сложенные весьма специфическими гидротермально-метасоматическими породами. Активное изучение гидротермального метасоматоза на термальных полях началось в середине прошлого столетия, а основополагающий вклад в новом направлении геологии был сделан рядом отечественных (С.И. Набоко, В.И. Аверьев, Е.А. Вакин и др.) и зарубежных (А.Д. Ellis, А. Steiner и др.) авторов. В глобальном многообразии гидротермально-метасоматических пород можно выделить две наиболее распространенные в приповерхностной зоне разновидности: аргиллизированные и опализированные породы. Как для аргиллизации, так и для опализации существует большое количество различных определений, которые, однако, расходятся лишь в деталях. Наиболее подходящими для этих процессов представляются следующие определения: *аргиллизация* – это метасоматический процесс, заключающийся в замещении исходных минералов магматических пород глинистыми, протекающий в условиях разгрузки среднекислых до слабощелочных термальных вод (рН ~ 4-8,5); *опализация* – это приповерхностный гидротермально-метасоматический процесс, протекающий в условиях разгрузки сильно- и ультракислых термальных вод (рН < 4), заключающийся в выщелачивании первичных компонентов эффузивных пород и их замещении опалом. В случае воздействия этих процессов на массивные кайнотипные андезиты и андезибазальты происходит ухудшение показателей физико-механических свойств, однако конечным продуктом аргиллизации скальных грунтов является дисперсный грунт (гидротермальная глина), а в результате протекания процесса опализации подвергшиеся кислотному выщелачиванию эффузивные породы остаются скальными грунтами, хотя и со значительно измененными показателями свойств.

## Глава 2. Характеристика исследованных термальных полей

В данной работе исследованы 4 термальные поля, находящиеся в пределах двух крупных геотермальных областей: Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик. Оба региона располагаются в пределах Восточного вулканического пояса Камчатки (рис. 1) и являются сложными вулканическими системами, представляющими собой крупные кальдеры, большая часть термальных полей в которых находится на их периферийных частях. В геологическом строении этих районов в общих чертах можно выделить отложения трех основных этапов: докальдерного, эпохи кальдерообразования и посткальдерных.



Рис. 1. Расположение исследованных термальных полей

Все рассматриваемые в данной работе термальные поля располагаются на посткальдерных вулканических постройках четвертичного возраста, а суммарное количество крупных термальных полей в этих районах превышает 15. При этом на разных термальных полях наблюдаются различные гидрогеохимические условия разгрузки парогидротерм. Так, четыре исследованные термальных поля можно разделить по преимущественному протекающему процессу на две группы по два поля в каждой. На Восточно-Паужетском и Южно-Камбальном Центральном термальных полях преимущественно разгружаются среднекислые – слабощелочные воды, в результате чего слагающие их породы оказываются подвержены процессу аргиллизации. В то же время на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий и термальном поле Северного кратера Центрального Семячика преимущественно разгружаются ультракислые и сильнокислые термальные воды, в результате взаимодействия которых с вулканогенными породами последние подвергаются процессу опализации.

### Глава 3. Методика исследований

В процессе выполнения диссертационной работы были изучены 104 образца андезитов и андезибазальтов различной степени изменённости, из которых были подготовлены 368 проб правильной геометрической формы. Образцы были отобраны в ходе научных экспедиций в 2017-2022 гг. на четырех термальных полях и прилегающих к ним территориях. Отбор производился из естественных обнажений при помощи геологического молотка или портативной буровой установки, а также из керна скважин. Полевые работы проводились автором при участии сотрудников, аспирантов и студентов кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, совместно с сотрудниками института Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Подготовка проб в виде цилиндров или прямоугольных призм производилась в соответствии с требованиями ГОСТ, а все лабораторные определения физических и физико-механических свойств пород производились по стандартным методикам. Для изучения состава и строения использовались методы оптической и электронной микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, рентген-флуоресцентной спектрометрии, рентгеноспектрального микроанализа и компьютерной томографии.

Помимо стандартных лабораторных определений, в полевых условиях на всех опробованных обнажениях при помощи молотка Шмидта были определены величины упругого отскока.

### Глава 4. Изменение состава, строения и свойств пород на термальных полях с разными гидрогеохимическими условиями

В результате изучения состава и структурно-текстурных особенностей отобранных образцов различной степени аргиллизированности со всех термальных полей были составлены ряды изменения, которые при определенном обобщении можно представить в виде четырех групп (рис. 2).

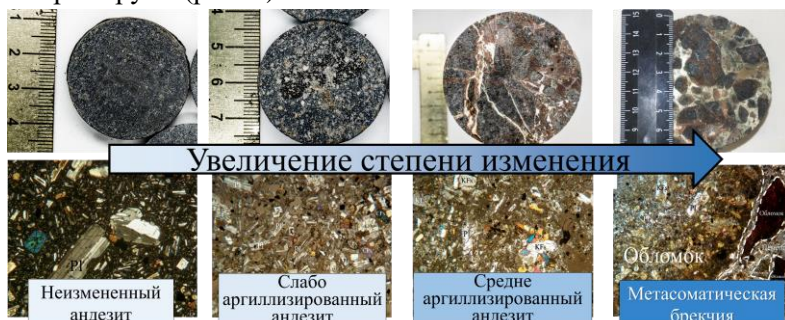


Рис. 2. Выделенный ряд аргиллизации андезитов с Восточно-Паужетского термального поля

В случае аргиллизации эти четыре группы представляют собой неизменные андезиты-андезибазалты, слабо аргиллизированные, средне аргиллизированные и сильно аргиллизированные (иногда представленные метасоматическими брекчиями) породы. Выделение групп основывалось как на составе, так во многом и на структурно-текстурных особенностях, поскольку количественные показатели химического и минерального составов порой не могли в полной мере отразить принадлежность образца к конкретной группе.

Для всех образцов и, соответственно, групп были определены показатели строения и свойств, на основании чего было выяснено, что в результате воздействия аргиллизации свойства андезитов Восточно-Паужетского термального поля значительно изменяются: происходит снижение плотности (с  $2,71 \text{ г/см}^3$  у неизменных андезитов до  $2,28 \text{ г/см}^3$  у метасоматических брекчий), увеличение пористости (с 3% до 18%), снижение прочностных (прочность на одноосное сжатие с 142,3 МПа до 20,6 МПа) и деформационных (динамический модуль упругости с 62,7 ГПа до 17,0 ГПа) характеристик (Большаков и др., 2023а). В то же время андезибазалты Южно-Камбального Центрального поля претерпевают интенсивную аргиллизацию, однако из-за в среднем более кислого характера среды в отдельных образцах, помимо глинистых минералов, цеолитов и карбонатов, встречается в значительных количествах и опал (Фролова и др., 2020). В результате воздействия на них процесса аргиллизации происходит более значительное изменение показателей строения и свойств: увеличивается пористость (с 5% у неизменных андезибазалтов до 40% у сильно аргиллизированных), снижается плотность (с  $2,68 \text{ г/см}^3$  до  $1,72 \text{ г/см}^3$  у наиболее аргиллизированных образцов), уменьшаются деформационные (динамический модуль упругости с 52,9 ГПа до 7,3 ГПа) и прочностные (прочность на одноосное сжатие с 137,4 МПа до 10,0 МПа) характеристики (рис. 3).

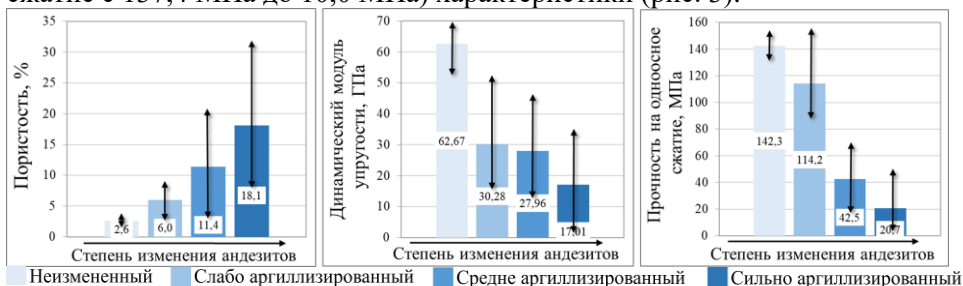


Рис. 3. Изменение свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля в зависимости от степени аргиллизации

Аналогичным описанному ранее образом были составлены ряды изменения пород в процессе опализации. Также были выделены 4 группы: неизменные андезибазальты, опализированные андезибазальты, псевдоморфные опалиты и колломорфные опалиты (рис. 4). При этом образцы опализированных андезибазальтов (то есть затронутых опализацией, но со значительным количеством непретворенных первичных минералов) на термальных полях оказывается весьма трудно обнаружить, что, вероятно, связано с высокой скоростью протекания процесса. По завершении выщелачивания всех первичных компонентов, кроме  $\text{SiO}_2$  и  $\text{TiO}_2$ , опалиты приобретают псевдоморфную структуру, позволяющую достоверно определить породу, из которой они образовались. Далее, за счет сочетания процессов дальнейшего выщелачивания уже весьма устойчивых соединений и практически одновременного отложения аморфного кремнезема в порах наблюдается постепенное «размытие» изначально отчетливой псевдоморфной структуры и в конечном итоге преобразование структуры опалитов в колломорфную (хаотичную, лишенную каких-либо определенных закономерностей строения). Поскольку на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий разгружающиеся термальные воды являются менее кислыми, в сравнении с термальным полем Северного кратера Центрального Семячика, в состав слагающих его опалитов оказывается включен еще и каолинит, однако его количество является недостаточным для внесения какого-либо серьезного эффекта в различия свойств опалитов с этих полей.



Рис. 4. Выделенный на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика ряд опализации андезибазальтов

Под действием опализации изменяются не только состав и строение, но и свойства андезибазальтов Верхнего термального поля вулкана Бурлящий (Большаков, 2021a). У измененных пород возрастает пористость (с 5,7% у неизменных андезибазальтов до 48% у отдельных проб наиболее измененных опалитов), снижается плотность (с 2,74 г/см<sup>3</sup>

до 1,55 г/см<sup>3</sup>), а также показатели прочностных (прочность на одноосное сжатие со 133,0 МПа до 16,6 МПа) и деформационных (динамический модуль упругости с 61,4 ГПа до 8,6 ГПа) характеристик.

Схожая картина наблюдается для опализации на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика. Опализация там приводит к увеличению пористости (с 3,5% у неизмененных андезибазальтов до 63% у отдельных проб наиболее измененных опалитов), при этом плотность опалитов снижается (с 2,90 г/см<sup>3</sup> до 0,79 г/см<sup>3</sup> у отдельных проб наиболее измененных опалитов), а прочностные и деформационные характеристики снижаются более чем в 40 раз (динамический модуль упругости снижается с 54,4 ГПа до 1,3 ГПа, а прочность на одноосное сжатие с 157,4 МПа до 3,3 МПа) (рис. 5).

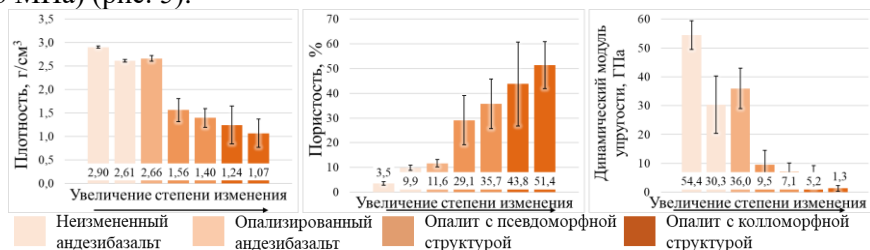


Рис. 5. Изменение свойств андезибазальтов с термального поля Северного кратера Центрального Семячика с увеличением степени опализованности

На всех рассмотренных термальных полях разгружаются термальные воды, характеризующиеся различными гидрогеохимическими параметрами, наиболее важным из которых является водородный показатель (рН), во многом контролирующей минеральные ассоциации, образующиеся в результате взаимодействия вод с породами. При изменении кислотности среды от слабощелочной до ультракислой в первом приближении происходит изменение образующихся вторичных минералов от цеолитов и смектитов к каолиниту и опалу. В связи с этим фактом возникает вопрос, где и каким образом следует проводить границу между аргиллизитами и опалитами, так как соотношения указанных минералов в породах изменяются не слишком резко из-за высокой динамичности термальных полей и смены гидрогеохимических условий на площадях минимального размера. Весьма целесообразным для такой дифференциации оказывается применение коэффициента размягчаемости, поскольку он косвенно отражает влияние минерального состава на свойства пород, причем особенно явно на прочностные характеристики. Так как на структуры, сложенные опалом, водонасыщение не оказывает значительного влияния, то у опалитов коэффициент размягчаемости всегда оказывается выше 0,75. В то же время у аргиллизированных пород, за счет

значительного содержания глинистых минералов, при водонасыщении прочностные показатели заметно снижаются, а коэффициент размягчаемости принимает значения  $<0,75$ .

Для классификации аргиллизированных и опализированных пород представляется необходимым введение количественного показателя, позволяющего классифицировать массивные эффузивные породы по степени их аргиллизированности или опализированности. Наиболее подходящим показателем оказывается пористость, так как этот показатель у массивных неизменных андезитов и андезибазальтов со всех рассматриваемых термальных полей находится в достаточно узком диапазоне, а в процессе гидротермальных преобразований закономерно увеличивается и в то же время во многом контролирует изменения физико-механических свойств. Для аргиллизации в качестве пограничных значений пористости, разделяющих четыре выделенные группы, были выбраны 7%, 12% и 20% (табл. 1).

Таблица 1

Принципиальные группы аргиллизированных андезитов-андезибазальтов по степени их преобразованности

Степень аргиллизированности	Пористость, %	Основные структурно-текстурные особенности	Общий вид	Характерные показатели свойств
Неизменные	$<7\%$	Неизменная порода, вторичные изменения отсутствуют или носят незначительный, единичный характер		$\rho=2,65-2,90 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{длин}}=40-70 \text{ ГПа}$ $R_c=120-180 \text{ МПа}$
Слабо аргиллизированные	7% - 12%	Вторичные замещения заметны макро- и микроскопически, однако породы сохраняют массивную текстуру, хотя локально могут быть значительно преобразованы		$\rho=2,40-2,60 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{длин}}=20-40 \text{ ГПа}$ $R_c=40-120 \text{ МПа}$
Средне аргиллизированные	12% - 20%	Макроскопически заметна широко развитая трещиноватость, оказывающая определяющее влияние на свойства пород		$\rho=2,20-2,40 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{длин}}=5-25 \text{ ГПа}$ $R_c=10-50 \text{ МПа}$
Сильно аргиллизированные	$>20\%$	В строении породы выделяются отдельные области, практически полностью сложенные глинистыми минералами, породы размягчаемы и зачастую имеют брекчиевую текстуру		$\rho=1,70-2,20 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{длин}}=3-15 \text{ ГПа}$ $R_c=5-15 \text{ МПа}$

Именно при таких значениях величины пористости разделение на группы по степени аргиллизации оказалось оптимальным. Вместе с этим, как было сказано ранее, основой для выделения групп были состав и структурно-текстурные особенности пород, а пористость как раз является количественным показателем строения и, таким образом, находится в смысловом отношении гораздо ближе к структурно-текстурным особенностям в сравнении с любым иным численным показателем свойств.

Аналогичным описанному ранее образом были выделены пограничные значения пористости, разделяющие опализированные породы на четыре группы (табл. 2). Однако, так как процесс опализации сопровождается гораздо более значительным ростом пористости, в качестве граничных значений были выбраны 7%, 20% и 40%.

Таблица 2

Принципиальные группы опализированных андезитов-андезибазальтов и опалитов по степени их преобразованности

Степень опализованности	Пористость, %	Основные структурно-текстурные особенности	Общий вид	Характерные показатели свойств	Кол-во SiO <sub>2</sub> , %
Неизменные андезибазальты	<7%	Неизменная порода, вторичные изменения отсутствуют или носят незначительный, единичный характер		$\rho=2,65-2,90 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{дин}}=40-70 \text{ ГПа}$ $R_c=120-180 \text{ МПа}$	50% - 55%
Опализированные андезибазальты	7% - 20%	Серая, зачастую неоднородная окраска. Опализирована лишь часть породы, что на начальных стадиях часто выражается в особенно отчетливом отделении вкрапленников от основной массы		$\rho=2,00-2,50 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{дин}}=20-40 \text{ ГПа}$ $R_c=50-100 \text{ МПа}$	↓ 98%
Псевдоморфные опалиты	20% - 40%	Весьма однородная светло-серая и светло-бежевая окраска, псевдоморфная структура, однородный состав, преимущественно представленный опалом		$\rho=1,40-2,10 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{дин}}=5-20 \text{ ГПа}$ $R_c=10-40 \text{ МПа}$	
Колломорфные опалиты	>40%	Белые цвета, однородная колломорфная структура иногда с небольшими вторичными макропорами		$\rho=0,80-1,40 \text{ г/см}^3$ $E_{\text{дин}}=1-8 \text{ ГПа}$ $R_c=2-15 \text{ МПа}$	



## Глава 5. Разнонаправленное изменение пород и их свойств на современных термальных полях и формирование агатов

Особую сложность процессу выделения рядов изменения горных пород на образцах с термальных полей добавляет тот факт, что гидротермальные преобразования весьма чувствительны к изменению гидрогеохимических условий, в связи с высокой динамичностью которых на термальных полях нередко одновременно протекает как аргиллизация, так и опализация. А эти процессы можно представить в виде сочетания выщелачивания, замещения и новообразования минералов. В частности, в андезибазальтах Южно-Камбального Центрального термального поля содержится множество миндалин, выполненных минералами кремнезема (опал, кристобалит, халцедон, кварц). В то же время эти миндалины окружены осветленными зонами, в пределах которых исходные породы интенсивно выщелочены и опализированы.

Таким образом, зоны выщелачивания и новообразования минералов находятся в непосредственной близости. Для изучения влияния сочетания этих процессов на свойства из образца с наиболее подходящей миндалиной было выбурено несколько небольших цилиндров по профилю от исходного андезибазальта до непосредственно миндалины (рис. 6).

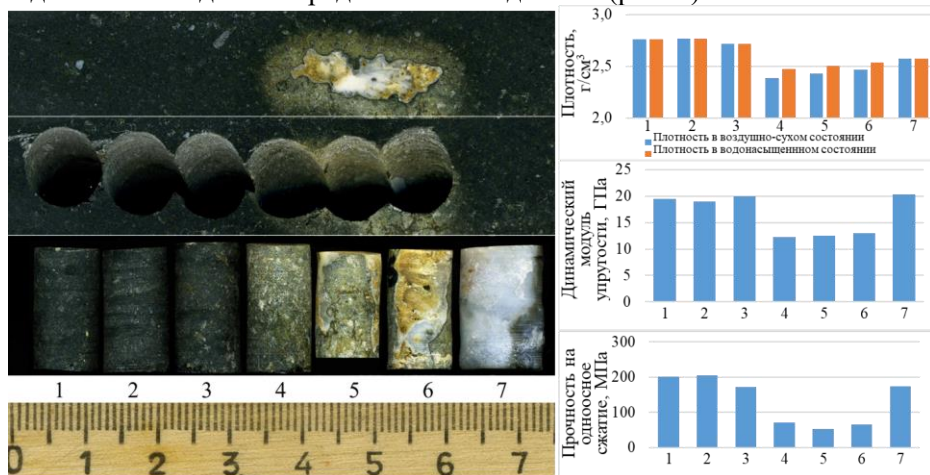


Рис. 6. Профиль изучения свойств вблизи миндалины в андезибазальте и диаграммы изменения свойств по этому профилю

Помимо этого, из наиболее крупной миндалины был подготовлен цилиндрический образец, состоящий на 100% из новообразованных минералов кремнезема. На всех цилиндрах были определены показатели состава и свойств, что позволило оценить характер влияния разнонаправленных процессов на свойства опализированных пород.

В результате разнонаправленного воздействия термальных растворов на строение андезибазальта соответствующим образом изменяются и свойства на минимальных расстояниях, что проявляется в опализированной зоне сначала в понижении плотности (с  $2,72 \text{ г/см}^3$  до  $2,39 \text{ г/см}^3$ ), прочностных (прочность на одноосное сжатие снижается с  $205,6 \text{ МПа}$  до  $52,7 \text{ МПа}$ ) и деформационных (динамический модуль упругости с  $19,9 \text{ ГПа}$  до  $12,2 \text{ ГПа}$ ) характеристик, а затем непосредственно в миндалине в значительном их же возрастании до приближенных к исходным значений.

Особый интерес вызывает строение самих миндалин (рис. 7а). Некоторые миндалины представляют собой специфические агрегаты с отчетливо выделяющимся концентрическим полосчато-слоистым рисунком, что в сочетании с известным составом этих агрегатов (минералы группы кремнезема) дает возможность определить их как агаты, однако, согласно господствующей гипотезе, в таких молодых толщах, как вершинные части постройки Камбального хребта, агаты не образуются. В результате детального изучения состава и строения этих образований, а также данных о возрасте вулканических построек, на которых развиты описываемые термальные поля, можно утверждать, что на современных термальных полях, располагающихся на вулканических постройках четвертичного возраста, происходит осаждение из термальных растворов и кристаллизация в пустотах минералов кремнезема. В результате образуются агаты со специфической высокодинамичной слоистостью (рис. 7б-д), возраст которых значительно меньше всех ранее известных разновидностей. Таким образом, эти агаты можно рассматривать как новый генетический тип.

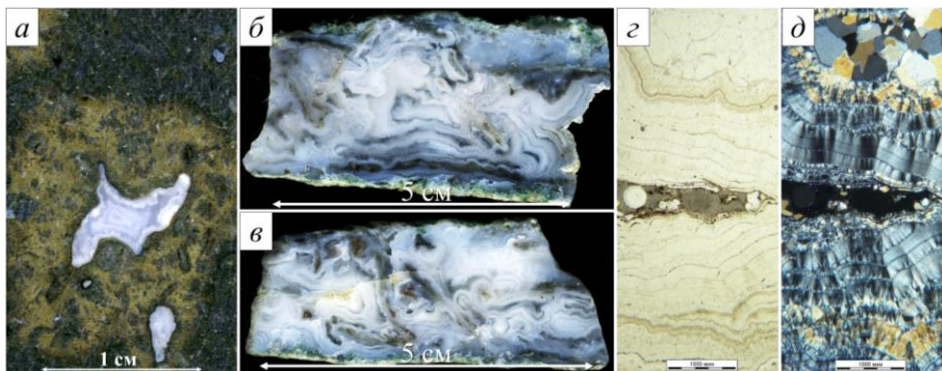


Рис. 7. Молодые агаты Южно-Камбального Центрального термального поля в андезибазальте (а), отдельно от породы (б, в) и в шлифе при одном (з) и двух (д) николях

## Глава 6. Оценка степени изменения и показателей свойств пород на термальных полях экспресс-методами

Так как термальные поля являются крайне динамичными системами с высокой изменчивостью, остро стоит вопрос применимости полевых экспресс методов для быстрой и достоверной оценки показателей свойств гидротермально измененных пород. В диссертационной работе использованы два показателя, получаемые при помощи устройств, позволяющих произвести экспресс-оценку: величина упругого отскока, измеренная молотком Шмидта, и процентное содержание кремния, определенное при помощи портативного рентген-флуоресцентного спектрометра. При этом метод определения величины упругого отскока при помощи молотка Шмидта оказался применим с высокой степенью достоверности для всех типов термальных полей (рис. 8), а рентген-флуоресцентный спектрометр – лишь для полей, характеризующихся разгрузкой сильнокислых и ультракислых термальных вод.

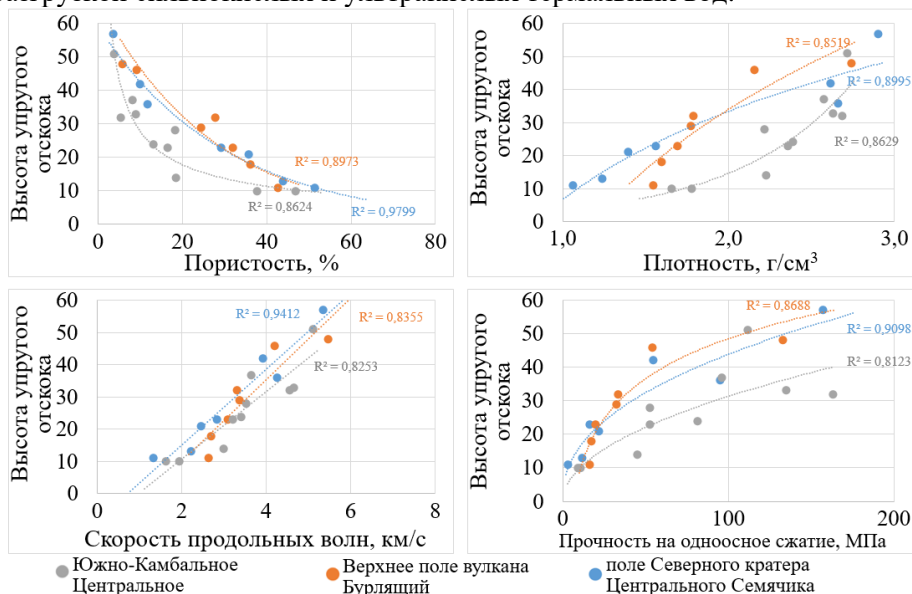


Рис. 8. Взаимосвязь высоты упругого отскока с показателями строения и свойств

Все полученные зависимости между высотой упругого отскока молотка Шмидта и различными показателями свойств характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации ( $R^2 > 0,81$ ). Наиболее важной является зависимость высоты упругого отскока от пористости, поскольку все значимые в инженерно-геологическом отношении показатели свойств тесно связаны с величиной пористости.

## Заключение

На основании исследований, проведенных на четырех современных термальных полях Камчатки, характеризующихся разными гидрогеохимическими условиями, выявлены основные закономерности изменения состава, строения и свойств андезитов и андезибазальтов под действием термальных флюидов в приповерхностной зоне.

1. На современных термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик, имеющих четвертичный возраст, происходят активные гидротермальные преобразования, радикально изменяющие состав, строение и свойства вулканогенных пород, слагающих изучаемые районы.
2. В зависимости от гидрогеохимических параметров разгружающихся флюидов итоговый продукт гидротермально-метасоматических процессов может значительно различаться и в инженерно-геологическом плане представлять собой как скальный, полускальный, так и дисперсный грунт.
3. В результате разгрузки среднекислых до слабощелочных термальных вод андезиты и андезибазальты превращаются в конечном итоге в гидротермальные глины, а в случае сильнокислых и ультракислых термальных вод – в высокопористые скальные грунты, в минеральном составе которых преобладает опал.
4. Выделены основополагающие стадии процессов аргиллизации и опализации, отражающие принципиальные изменения в составе, строении и свойствах пород, наиболее показательной количественной характеристикой которых является величина пористости, планомерно увеличивающаяся в процессе гидротермальных преобразований под действием обоих процессов.
6. Экспериментальное лабораторное выщелачивание андезибазальтов в растворе концентрированной серной кислоты дает возможность проследить последовательность преобразований на начальных этапах опализации, а также получить ряд численных показателей, характеризующих скорость протекания данного процесса.
7. Гидротермальные преобразования могут оказывать двустороннее влияние на свойства вмещающих пород за счет сочетания процессов выщелачивания и новообразования в пустотах отдельных минералов из пересыщенных термальных растворов.
7. На термальных полях в полостях вулканических пород четвертичного возраста образуются агаты, формирующиеся путем кристаллизации минералов кремнезема (кристобалита, халцедона, кварца) из термальных растворов, которые оказываются значительно моложе всех известных ранее агатов и которые можно рассматривать как новый генетический тип.

8. Для полевой экспресс-оценки свойств гидротермально измененных пород на всех видах термальных полей, изначально сложенных массивными вулканогенными породами основного и среднего составов, возможно обоснованное использование молотка Шмидта, а для термальных полей с разгрузкой сильноокислых термальных вод – портативного рентген-флуоресцентного спектрометра, позволяющего определять величину процентного содержания кремния.

**Статьи в рецензируемых научных журналах, опубликованные автором в научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7.**

1. **Большаков, И.Е.** Закономерности изменения состава и физико-механических свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля под действием аргиллизации (Южная Камчатка) / **И.Е. Большаков, Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов, М.С. Чернов** // Вестник Московского университета, Серия 4, Геология. 2023а. № 5. С. 46-57. – Импакт-фактор РИНЦ: 0,411. Объем публикации: 1,36 п.л., вклад соискателя: 1,00 п.л.
2. **Большаков, И.Е.** Изменение состава и свойств вулканогенных пород на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий (Большой Семейчик, п-ов Камчатка) / **И.Е. Большаков** // Инженерная геология. 2021а. №3. С. 40-51. - Импакт-фактор РИНЦ: 0,455. Объем публикации: 0,64 п.л.
3. 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. № 1. С. 36-51. – Импакт-фактор РИНЦ: 0,455. Объем публикации: 0,93 п.л., вклад соискателя: 0,29 п.л.
4. 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. 26–38. – Импакт-фактор РИНЦ: 0,455. Объем публикации: 0,75 п.л., вклад соискателя: 0,25 п.л.

## Публикации в иных научных изданиях

5. **Большаков, И.Е.** Агаты современных термальных полей Камчатки как новый генетический тип / **И.Е. Большаков** // Материалы конференции «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии», Москва. 2021б. С. 69-73.
6. **Большаков, И.Е.** Экспресс-методы оценки степени изменения и свойств пород на термальных полях / **И.Е. Большаков, Ю.В. Фролова, Е.С. Житова, С.Н. Рычагов, Р.В. Веселовский** // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2023б. С. 115-118.
7. **Большаков, И.Е.** Агаты современных термальных полей Камчатки / **И.Е. Большаков, Ю.В. Фролова, Е.С. Житова, С.Н. Рычагов, М.С. Чернов** // Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2021. С. 117-120.
8. **Большаков, И.Е.** Влияние аргиллизации на изменение состава и свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) / **И.Е. Большаков, Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов, М.С. Чернов** // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2020. С. 151-154.
9. Фролова, Ю.В. Использование молотка Шмидта для оценки прочностных и деформационных свойств горных пород / Ю.В. Фролова, **И.Е. Большаков, А.Б. Ермолинский, Д.Д. Лисицина** // Материалы общероссийской научно-практической конференции «Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения». Москва. ООО «Геомаркетинг». 2023. С. 29-36.
10. Фролова, Ю.В. Оценка физико-механических свойств горных пород с помощью молотка Шмидта / Ю.В. Фролова, **И.Е. Большаков, А.Б. Ермолинский** // Материалы международной научно-практической конференции «XIII Ломоносовские чтения» (Душанбе, Таджикистан). 2023. С. 318-323.