МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

hour

Большаков Илья Евгеньевич

Закономерности изменения состава и свойств андезитов и андезибазальтов на термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик (Камчатка)

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научные руководители:

доктор геолого-минералогических наук, доцент Фролова Юлия Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, профессор Трофимов Виктор Титович

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Современные представления о влиянии гидротермальных преобразова на состав и свойства вулканогенных пород	ний 12
1.1 История изучения гидротермальных систем	12
1.2. Распространение гидротермально измененных пород и использование геотермальных ресурсов в мире	18
1.3. Гидротермальный литогенез и разновидности гидротермально измененнь пород	1 x 20
1.4. Современные представления об условиях протекания процесса аргиллиза и его влиянии на свойства вулканогенных пород	ции 24
1.5. Современные представления об условиях протекания процесса опализаци его влиянии на свойства вулканогенных пород	ии 32
Глава 2. Характеристика исследованных термальных полей	35
2.1. Паужетско-Камбальный район	35
2.1.1. Геологическое строение района	35
2.1.2. Восточно-Паужетское термальное поле	48
2.1.3. Южно-Камбальное Центральное термальное поле	52
2.2. Массив Большой Семячик	55
2.2.1. Геологическое строение района	55
2.2.2. Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий	58
2.2.3. Термальное поле Северного кратера Центрального Семячика	60
Глава 3. Методика исследований	65
Глава 4. Закономерности изменения состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой среднекислых до слабощелочных термальных в	юд.73
4.1 Изменение состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой среднекислых до слабощелочных термальных вод	73
4.1.1. Изменение состава, строения и свойств пород на Восточно-Паужетской термальном поле	м 73
4.1.2. Изменение состава, строения и свойств пород на Южно-Камбальном Центральном термальном поле	92
4.2 Изменение состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой сильнокислых термальных вод	110
4.2.1 Изменение состава, строения и свойств пород на Верхнем термальном вулкана Бурлящий	поле 110
4.2.2. Изменение состава, строения и свойств пород на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика	126
4.2.3 Изменение состава, строения и свойств андезибазальтов в условиях моделируемого сернокислотного выщелачивания	140
4.3. Сравнительный анализ изменений состава и свойств пород на термальны полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик	x 149

Глава 5. Разнонаправленное изменение пород и их свойств на современных	
термальных полях и формирование агатов	.161
Глава 6. Оценка степени изменения и показателей свойств пород на термальных	
полях экспресс-методами	.174
Заключение	.185
Список литературы	.187
Приложение. Сводная таблица показателей свойств исследованных образцов	.198

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 гидротермальнометасоматические 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, геохимии, гидрогеологии, динамической с точки зрения 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, B.B. Шанину, а также зарубежных специалистов: A. Pola, V. Navelot, P. Siratovich, M. Heap, 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 опализацией 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 Семячинского районов Камчатки, характеризующихся различными гидрохимическими условиями.

Задачи исследования:

- 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;
- 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;
- провести экспериментальное моделирование процесса сернокислотного выщелачивания вулканогенных пород в условиях закрытой системы и оценить возможность его применения для воссоздания природных обстановок в лабораторных условиях;
- 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

- Выявлен ряд аргиллизации 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 сильнокислых 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

В современном мире в связи с постоянным ростом населения планеты и его потребностью в тепле и электроэнергии постоянно возрастает актуальность изучения альтернативных источников этих ресурсов. Одним из наиболее перспективных источников тепловой и электрической энергии является тепло Земли, которое является наиболее простым для добычи в районах активного вулканизма и использование которого в различных целях ежегодно возрастает, что подтверждается регулярными отчетами ряда исследователей (Lund, Freeston, 2001; Lund et. al., 2006; Lund et. al., 2011; Lund, Boyd, 2016; Lund, Toth, 2016). Для безопасного и стабильного функционирования геотермальных электростанций, сопутствующих сооружений и геотермальных скважин необходимо детальное понимание процесса гидротермальных преобразований и его влияния на свойства пород (Фролова и др., 20116; Frolova et. al. 2021; Flynn et al., 1991; Voight 1992), слагающих основания указанных сооружений. Дополнительную опасность В геотермальных районах представляют склоновые процессы, активизации которых в большой степени способствует ослабление горных пород, слагающих склоновые массивы, происходящее в результате гидротермальной переработки (Zimbelman et. al.2005; Frolova et. al. 2021). Неустойчивые склоны, сложенные гидротермально измененными породами, представляют опасность не только для эксплуатации геотермальных электростанций, но и для туристов, поскольку геотермальные регионы зачастую являются достопримечательностями, которые посещает путешественников множество (Suemnicht et al., 2007; Huang, Tian, 2006; Pioquinto, Caranto, 2005; Pioquinto et al., 2010; Kristianto et al., 2013; Wijaya et al., 2014;, Della Seta et al., 2015; Marmoni et al., 2017). Ha территории России за последние 20 лет произошло два крупных явления подобного рода: оползень в Долине гейзеров в 2007 году (Двигало и др., 2008; Дрознин, Селиверстов, 2007; Пинегина и др., 2008; Нечаев, 2007), которому, как показали дальнейшие исследования, во многом поспособствовали гидротермальные преобразования массива (Леонов, 2008; Фролова и др., 2015; Зеркаль и др. 2019) и обвал на туристическую тропу, произошедший в 2021 году вблизи Донного термального поля на вулкане Мутновский.

Изучению минералогических особенностей гидротермальных преобразований пород посвящено множество работ (Набоко, 1963; Ерощев-Шак, 1992; Рычагов и др., 2009). преобразований Влияние гидротермальных на инженерно-геологические особенности измененных пород в России изучается немногими специалистами (Ладыгин и др., 1983; Ладыгин, Рычагов, 1995; Фролова, 1998; Шанина, 2013), хотя в мире данному существенно большее внимание, вопросу уделяется причем проводятся как фундаментальные (Pola et. al., 2012; Pola et. al., 2014; Heap et. al., 2020), так и прикладные исследования (Mordensky et. al., 2019; Siratovich et. al., 2014). Также стоит отметить, что при взгляде на процесс опализации многие исследователи рассматривают все многообразие различных опалитов в целом как одну единую завершающую стадию преобразования вулканогенных пород на термальных полях с разгрузкой сильнокислых термальных вод, не разделяя их на разновидности и не выделяя никаких стадий преобразования, хотя они продолжают изменяться даже после гомогенизации 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. Таким образом, в процессе работы одной из главных задач было построение из отобранных образцов принципиальных рядов гидротермлаьных 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 прошла постановка и обоснование проблемы, требующей 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. Проведено сравнение термальных полей, сделано обобщение и сформулированы общие закономерности изменения. Проведенные работы можно разделить на полевые (маршрутные исследования, отбор образцов, испытание обнажений при помощи молотка Шмидта, фотодокументация обнажений и образцов, аэрофотосъемка термальных полей и прилегающих территорий), лабораторные (изучение состава, строения и свойств с использованием как стандартных методик (Фролова, 2015), так и экспериментального моделирования), а также обобщение и анализ данных.

Защищаемые положения

- 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 структурнотекстурные 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 и 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).

Публикации автора по теме диссертации

Основные тезисы диссертационной работы опубликованы автором единолично и в соавторстве в 10 статях в сборниках и рецензируемых журналах, 4 из которых находятся в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. Как в статьях, опубликованных автором единолично, так и в соавторстве автору принадлежит весомый вклад, выражающийся в сборе образцов, проведении лабораторных испытаний, обработке и анализе полученных данных, подготовке текста публикаций. Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных диссертационным советом МГУ, содержатся в журналах: «Инженерная геология» и «Вестник Московского университета. Серия 4. Геология».

Благодарности

Автор данной работы искренне благодарит 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 мотивацию, ценные советы и объяснения. Автор искренне признателен всему коллективу кафедры инженерной и экологической геологии за помощь в процессе обучения и написания диссертационной работы, в особенности – В.М. Ладыгину, Е.Н. Самарину, С.К. Николаевой. Отдельную благодарность за глубокие, содержательные дискуссии в процессе как полевых работ, так и обсуждения результатов автор выражает М.С. Чернову и А.Б. Ермолинскому.

Автор выражает благодарность сотрудникам лабораторий геотермии и минералогии института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, а в особенности – С.Н. Рычагову и Е.С. Житовой за тщательную организацию полевых работ, А.А. Нуждаеву и И.А. Нуждаеву за полученные навыки и помощь в обеспечении безопасных и плодотворных полевых работ, С.О. Феофилактову, Р.А. Кузнецову, Ю.Ю. Букатову, а также директору института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Озерову А.Ю. за помощь и ценные советы в процессе полевых работ.

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.

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

1.1 История изучения гидротермальных систем

Термин «гидротермальная система» начал активно использоваться в отечественной и зарубежной литературе во второй половине ХХ века. Изучением гидротермальных систем на территории СССР занимался ряд авторов, среди которых можно выделить В.В. Аверьева, Е.А. Вакина и С.И. Набоко за их особый вклад в развитие этого направления. В их работах (Аверьев, 1966; Аверьев, 1969; Вакин, 1968; Вакин, 1976; Вакин, 1986; Набоко, 1961; Набоко, Пийп, 1961; Набоко, 1963; Набоко, 1965; и др.) гидротермальные системы рассматриваются с множества различных сторон: от минералогических преобразований до гидрогеологического строения. Однако различные авторы по-разному определяли значение словосочетания «гидротермальная система». Так, Е.А. Вакин с соавторами в своей работе 1971 года представляли гидротермальные системы как циркуляционные системы термальных вод, возникающие в вулканотектонических депрессионных зонах, грабенах или кальдерах. С.И. Набоко, в свою очередь, определила гидротермальный процесс таким образом: «... возникновение в земной коре в определенных структурных и гидрогеологических условиях гидродинамических систем на пути восходящего по разломным зонам эндогенного тепломассопотока; в областях их разгрузки развивается объемный гидротермальный метаморфизм пород, минерало- и рудообразование» (Набоко, 1974, с. 113). Одно из наиболее удачных определений было дано В.Д. Пампурой: под гидротермальной системой он понимал «гидрогеологические резервуары напорных газоводных растворов или пара, возникшие в областях аномального теплового потока при смешении метеорных вод с высокоэнтальпийными флюидами или потоками магматических газов над периферическими магматическими очагами или зонами локального плавления корового субстрата» (Пампура, 1985, с. 6).

С древних времен человечество пользовалось гидротермальными ресурсами планеты. Археологические раскопки доказывают, что индейцы Северной Америки использовали горячие источники несколько тысяч лет назад, а ради контроля над источниками в Южной Дакоте даже велись ожесточенные сражения. Исторические документы подтверждают использование термальных источников римлянами, японцами, турками, исландцами, греками, а также народом маори в Новой Зеландии более чем 3 тысячелетия назад.

Однако история современной геотермии началась лишь в 19 веке и, несомненно, связана с Франсуа де Лардерелем, жившим в Италии и создавшим установку,

использовавшую тепло от пара из естественных источников для нагревания котлов с термальной водой и последующим извлечением из нее бора, а также дальнейшим использованием пара для запуска насосов и других механизмов.

Впервые электрическая энергия была получена из тепловой энергии перегретого пара в 1904 году в Лардерелло (Италия) путем подключения парового двигателя к генератору (рис. 1). Энергии, вырабатываемой этим агрегатом, хватало на питание пяти лампочек (Stober, Butcher, 2013).



Рис. 1. Первая установка для выработки электричества из энергии перегретого пара в Лардарелло, 1904 (по Luzzini, 2012)

Первая геотермальная электростанция была также запущена в Лардерелло в 1913 году и уже на момент запуска имела мощность в 250 кВт, а к 1915 году мощность поднялась до 15 МВт. Эта электростанция функционирует до сих пор, но имеет мощность в 545 МВт, что составляет 1,6% от всей электроэнергии, вырабатываемой в Италии. Она берет пар из глубоких скважин, которые начали бурить еще в 1931 году. Использование гораздо более горячего (сухого) пара (с температурой около 200°С) позволяет избежать быстрой коррозии металла, так как сильно перегретый пар практически не содержит агрессивных соединений.

Использование геотермальных ресурсов для отопления домов и теплиц началось в Рейкьявике (Исландия) в больших масштабах в 1920 году. В настоящее время Исландия, безусловно, является одним из лидеров в мире по количеству электроэнергии, вырабатываемой на геотермальных электростанциях. 53% электроэнергии страны получено именно этим путем. Низкотемпературные (до 150°С) геотермальные поля обеспечивают 90% исландских домов теплом и горячей водой. Высокотемпературные поля (более 200°С) расположены вдоль активного вулканического пояса, пересекающего остров, но не могут быть использованы напрямую, так как они имеют крайне высокую минерализацию. Большинство электростанций в Исландии имеют малую мощность (в среднем около 10 MBт). Однако крупнейшая электростанция Несьяведлир развивает мощность 120 MBт электроэнергии, также станция вырабатывает 380 MBт тепловой энергии, которая подается в виде горячей воды в столицу Исландии (Stober, Butcher, 2013).

В России история использования геотермальной энергии для выработки электричества началась в 1957 году на Камчатке. Там были начаты работы по созданию первой в Советском Союзе опытно-промышленной геотермальной электростанции мощностью 5 МВт. В качестве объекта были выбраны Паужетские источники, впервые обследованные в середине 18 века С.П. Крашенинниковым, обладающие большим дебитом и выделяющие большое количество пара. По единодушному мнению всех привлеченных специалистов, эту территорию можно было рекомендовать как реальный природный объект для получения с помощью бурения пара с температурой более 100°С. Основным водоносным комплексом на территории месторождения являются псефитовые туфы плиоцен-четвертичного возраста.

Для выяснения вопроса о возможности создания геотермальной электростанции на Паужетке был осуществлен большой комплекс геологических, гидрогеологических, геотермических и других исследований. Над изучением геологических условий района планируемой электростанции трудилось множество специалистов, среди которых были В.В. Аверьев, В.И. Белоусов, Е.А. Вакин, И.Т. Кирсанов, В.М. Сугробов, В.Л. Леонов, И.В. Мелекесцев, С.И. Набоко, Б.И. Пийп и другие. Уже в 1958 году в процессе бурения первой скважины было установлено, что в недрах Паужетского месторождения на глубине первых сотен метров циркулируют воды с температурой, достигающей 200°С. Разведка завершилась опытной эксплуатацией месторождения, в процессе которой десять наиболее продуктивных скважин более года безостановочно работали в условиях эксплуатационного режима. Тем самым было доказано, что создание на Пужетке геотермальной электростанции возможно. Станция была введена в эксплуатацию в 1966 году (Svalova, Povarov 2020).

В настоящее время Паужетская ГеоЭС имеет сравнительно небольшую мощность в 6 МВт и обеспечивает электричеством сам поселок Паужетка (рис. 2), а также часть крупных поселков Озерновский и Запорожье, находящихся на берегу Охотского моря.



Рис. 2. Вид на Паужетскую ГеоЭС, эксплуатационные скважины, Камбальный вулканических хребет (слева) и вулкан Кошелева (справа)

На сегодняшний день на территории Российской Федерации действуют три полноценных геотермальных электростанции и две небольшие ГеоТЭС; второй и третьей действующими электростанциями являются Мутновская и Северо-Мутновская ГеоЭС, расположенные на 60 км южнее Петропавловска-Камчатского, у подножья вулкана Мутновский. По результатам успешной эксплуатации Паужетской ГеоЭС в сентябре 1977 года Госпланом СССР было принято решение о создании геотермальной электростанции на Мутновском месторождении термальных вод (Колосов, 1997). Ввод станции в эксплуатацию планировался в 1984 году, однако из-за ряда работ по переоценке запасов, а также из-за трудностей с финансированием проекта, связанных с распадом СССР, Мутновская ГеоЭС была введена в эксплуатацию лишь в 2003 году и развивает мощность в 50 MBT, а Северо-Мутновская – 12 MBT. Вырабатываемое на Мутновской электростанции электричество покрывает 20% от потребляемой электроэнергии Центрального энергоузла Камчатского края.

Кроме того, на двух островах Курильской дуги расположены небольшие геотермальные электростанции на базе передвижных энергомодулей «Туман 2А» (Менделеевская, располагающаяся на острове Кунашир около вулкана Менделеева, и Океанская ГеоТЭС, расположенная у подножия вулкана Баранского на острове Итуруп) (Huttrer, 2020). На данный момент Океанская ГеоТЭС выведена из эксплуатации. До вывода обе электростанции имели установленную мощность 3,6 МВт.

На этапе зарождения геотермальной энергетики задача геологов в основном заключалась в изучении естественного строения разреза исслуемых областей и положения

в нем горизонтов, вмещающих термальные воды и пар, а также в определении их запасов. Однако в последние годы геологами разрабатываются новые методики искусственного улучшения характеристик геотермальных месторождений. Например, группой авторов al., 2019) были проведены исследования, показывающие, (Mordensky et. что кратковременный нагрев андезитов из геотермального района Ротокава (Новая Зеландия) до высоких температур (350-739 °C) при небольших скоростях нагрева и остывания (~ 1,2 °С/мин) и постоянном давлении (20 МПа) может приводить к значительному увеличению проницаемости. А проницаемость массива является ключевым параметром для эксплуатации геотермального месторождения. Авторами были сделаны следующие выводы: увеличение температуры прогрева увеличивает пористость с 7,8% до 15,1%, а проницаемость - с 10-18 м² до 10-17 м². В то же время скорости продольных волн уменьшаются с 4,3 до 3,4 км/с в измененных андезитах. Влияние температурной обработки более заметно у образцов средне измененного, чем у сильно измененного андезита. Несмотря на то что для оценки влияния температурной обработки на прочность необходимо больше экспериментальных данных, полученные авторами результаты указывают, что измененные образцы андезитов будут более восприимчивы к минеральным и микроструктурным преобразованиям, образцы чем неизмененных андезитов, подвергнувшихся температурной обработке. Также согласно данным авторов, степень измененности и состав пород влияют на возможные изменения в петрофизических свойствах в результате нагрева и остывания пород геотермального месторождения (Mordensky et. al., 2019).

Схожие результаты были получены другим коллективом (Siratovich et. al., 2015) в результате эксперимента по «закаливанию» образцов гранодиорита, риолита и базальта. Авторы статьи продемонстрировали, что термальная обработка (нагрев до 375 °C и последующее резкое охлаждение до температуры окружающей среды при 35 МПа) способна значительно влиять на физические свойства пород на микро- и макроуровне. Изучение образца до и после термической обработки показало, что возможно значительное изменение физических свойств горных пород с помощью термического воздействия. Пористость, плотность, модуль упругости и самое главное проницаемость были значительно изменены под действием используемого термического воздействия.

Проницаемость была значительно улучшена во всех исследованных образцах. Одним из важнейших наблюдаемых эффектов является более значительное увеличение проницаемости в образцах, подвергшихся быстрому охлаждению по сравнению с медленно охлаждёнными. Проницаемость изменяется почти на четыре порядка в образцах гранита и базальта. Такое изменение достигается преимущественно из-за микротрещиноватости, образованной в образце. Последствия увеличения проницаемости необратимы и заметны даже при высоких давлениях.

Данное исследование указывает на то, что в водонасыщенной среде и при высоком температурном градиенте могут происходить гораздо более значительные изменения, чем аналогичные в воздушно-сухих условиях. Этот вывод важен, поскольку все геотермальные системы в некоторой степени насыщены водой (Siratovich et. al., 2015).

Однако стоит помнить о том, что использование геотермальных ресурсов Земли, а особенно стимулирование увеличения проницаемости участков земной коры, сопряжено с определенными рисками. Еще в 1980 году Левиной В.И. с соавторами (Левина и др., 1980) была высказана идея, что одной из возможных причин активизации тектонических процессов в районе Камбального вулканического хребта являлась эксплуатация Паужетского месторождения термальных вод. К такому предположению авторы пришли по результатам анализа сейсмических данных, полученных как региональной Камчатской сетью сейсмостанций, так и одной локальной станцией, временно установленной на самом Камбальном хребте в районе Южно-Камбальных Центральных термальных полей. Согласно их исследованию, очаги землетрясений находились на глубине менее 2 км, что в сочетании с нахождением поблизости крупной геотермальной электростанции наводит на мысль об их взаимосвязи. Однако сами авторы придерживаются мнения, что основное влияние на сейсмичность района все-таки оказывают тектонические механизмы (Левина и др., 1980).

Более детальные данные были получены в 2017 году в Южной Корее, вблизи геотермальной электростанции в Пхохане. Там было зафиксировано землетрясение с магнитудой 5,5, в результате которого произошли частичные разрушения городской инфраструктуры и пострадала часть населения, а общий экономический ущерб, по приблизительным оценкам, составил около 50 миллионов долларов.

В результате дальнейших исследований сразу ряд авторов (Kim et. al, 2018; Grigoli et. al., 2018 и др.) пришли к выводу, что землетрясение было вызвано эксплуатацией электростанции, так как она работала по методике EGS (enhanced geothermal system), при которой применялось усовершенствование системы путем стимулирования образования дополнительных трещин. Главным выводом из данного события является необходимость более точного расчета и мониторинга наведенной сейсмичности, особенно в сейсмически активных областях. А во время эксплуатации подобных электростанций необходимо производить тщательные наблюдения за частотой мелких сейсмических событий и расположением их гипоцентров.

1.2. Распространение гидротермально измененных пород и

использование геотермальных ресурсов в мире

Гидротермально измененные породы достаточно широко распространены по всему миру. Они приурочены к областям с развитой гидротермальной активностью, которые, в свою очередь, находятся в тектонически активных регионах. Гидротермально измененные породы можно встретить на всех континентах Земли. Чем сильнее развит вулканизм в определенной области Земли, тем больше там будет гидротермально измененных пород. В частности, гидротермальная деятельность ширко развита в Исландии, странах Тихоокеанского огненного кольца (Япония, Филиппины, Индонезия, Новая Зеландия, Россия и т.д.), странах, на территориях которых находятся активные горно-складчатые пояса и рифтовые зоны, а также другие области с повышенным тепловым потоком из недр.

Практически все эти страны используют свои геотермальные ресурсы для выработки электроэнергии. Согласно статьям, представленным на Всемирном Геотермальном конгрессе в 2020 году (Lund, Toth, 2020; Hutter, 2020), использование геотермальной энергии для нужд выработки электричества, а также для бытовых и сельскохозяйственных нужд продолжает расти с огромной скоростью. Так, в табл. 1 представлены данные по установленной мощности (МВт) и годовым расходам энергии (ТДж/год и ГВт*ч/год) в различных регионах мира (Lund, Toth, 2020).

Таблица 1

Регион/Континент	МВт	ТДж/год	ГВт*ч/год
Африка	198	3,730	1,036
Америка	23,330	180,414	50,115
Центральная Америка и Карибские острова	9	195	54
Северная Америка	22,700	171,510	47,642
Южная Америка	621	8,709	2,419
Азия	49,079	545,019	151,394
СНГ	2,121	15,907	4,419
Европа	32,386	264,843	73,568
Центральная и Восточня Европа	3,439	28,098	7,805
Западная и Северная Европа	28,947	236,745	65,762
Океания	613	10,974	3,048
Сумма	107,727	1,020,887	283,580

Суммарная установленная мощность и годовой расход геотермальной энергии за 2019 год (Lund, Toth, 2020)

Обязательно стоит отметить, что рост интереса различных государств к использованию геотермальной энергии имеет нелинейный характер и с каждым годом прирост энергии, полученной с помощью тепла Земли, увеличивается (рис. 3). Так, прирост за последние 5 лет в 5 раз превышает прирост за период с 1995 по 2000, хотя уже в те годы геотермальная энергетика была достаточно распространена в ряде стран.



Рис. 3. График прироста установленной мощности и годового расхода геотермальной энергии в период с 1995 по 2020 гг. (по Lund, Toth, 2020)

Однако геотермальная энергетика подразумевает не только использование тепла Земли для производства электричества. Большая часть используемой геотермальной энергии направлена на другие цели (рис. 4). Среди альтернативных методов использования геотермальной энергии все большую популярность приобретают геотермальные тепловые насосы. Геотермальный тепловой насос представляет собой систему центрального отопления помещений, которая использует энергию тепла Земли для прогрева воздуха зимой, но также может использоваться как система охлаждения воздуха летом. Как видно из нижеприведенной гистограммы, этот вид использования геотермальной энергии является самым популярным и объемы используемой этим путем геотермальной энергии увеличиваются с огромной скоростью.

Таким образом, на 2020 год можно утверждать, что самое широкое распространение используемой геотермальной энергии приходится на геотермальные тепловые насосы. На втором месте по объемам годовых расходов геотермальной энергии находятся воднооздоровительные комплексы, на третьем месте – обогрев помещений (рис. 4). В России геотермальные тепловые насосы еще не приобрели большой популярности, но геотермальную энергию используют как в Курило-Камчатском регионе, так и на Кавказе и в Краснодарском крае в основном для обогрева помещений и хозяйственных нужд (Lund et. al., 2015).



Рис. 4. Сравнительная гистограмма всемирного использования геотермальной энергии в ТДж/год (по Lund, Toth, 2020)

1.3. Гидротермальный литогенез и разновидности гидротермально

измененных пород

Впервые отношение к гидротермальному процессу как к явлению, формирующему состав и свойства осадочной оболочки Земли, было выражено группой авторов в 1970-х годах (Тимофеев, Щербаков, 1972; Тимофеев и др., 1979). Был предложен термин «гидротермальный литогенез», подразумевавший воздействие гидротермальных растворов на вулканогенно-осадочные отложения и формирование из последних качественно новых, в основном глинистых пород. Авторы показали, что составы и свойства как исходных пород, так и гидротермальных растворов, участвующих в процессе гидротермального литогенеза, могут варьироваться в очень широких пределах.

По окончании исследований авторы пришли к выводу, что при практически любых условиях основными процессами приповерхностного гидротермального литогенеза являются глинизация осадочных и вулканогенно-осадочных образований и обогащение их

рудными компонентами. Набор глинистых минералов определяется химическим составом и физико-химическими параметрами гидротермальных растворов (Петрова, 2005).

В.Б. Курносов (2004) предложил понимать термин «гидротермальный литогенез» следующим образом: «... все процессы взаимодействия вода - порода, спровоцированные высоким тепловым потоком, проходящие во всем пространстве конвективных гидротермальных систем при участии растворов независимо от генезиса их водной и катионно-анионной составляющих, вызывающие перераспределение вещества в земной коре, а также, в определённых случаях, участвующие в глобальном обмене веществом между литосферой и гидросферой» (Курносов и др., 2004, с. 273).

Под действием термальных вод, различающихся температурой и составом, вулканогенные породы изменяются и переходят в гидротермально-метасоматические образования: пропилиты, вторичные кварциты, цеолитовые метасоматиты, аргиллизиты, опалиты, кварц-адуляровые метасоматиты. Процесс гидротермального преобразования включает три основные стадии. На первой стадии происходит разрушение структуры первичных минералов и избирательный вынос слагающих их химических компонентов, на второй стадии в порах и трещинах происходит осаждение вторичных минералов, а на третьей стадии первичные минералы замещаются вторичными, которые являются более устойчивыми в новых условиях.

При этом гидротермальным преобразованиям могут подвергаться все типы вулканогенных пород, например, на полуострове Камчатка, на Ягоднинском цеолитовом месторождении, аргиллизации широко подвержены массивы перлитов (разновидность вулканического стекла). Среди вторичных минералов, образующихся в процессе гидротермального изменения, преобладают клиноптиллолит, гейландит, морденит и смектиты. В результате преобразований плотность и упругие характеристики снижаются, а прочность на первом этапе, когда вторичные минералы заполняют лишь трещины в породе, возрастает, а затем аналогично деформационным характеристикам начинает снижаться (Фролова и др., 2017)

Основными гидротермальными минералами в зависимости от температуры, давления и состава раствора являются минералы кремнезема (кварц, опал, халцедон, тридимит и кристобалит), глинистые минералы (каолинит, смектиты и др.), хлорит, серицит, цеолиты, кальцит, пренит, эпидот, пирит, алунит, ангидрит, адуляр и др. Первичные компоненты вулканогенных пород замещаются вторичными, причем замещение, как правило, носит псевдоморфный характер. В зависимости от параметров, характеризующих гидротермальный раствор, таких, как температура и состав, формируется определенная ассоциация вторичных минералов, устойчивых в новых условиях.

Зона развития глинистых минералов из группы монтмориллонит-нонтронит с анальцимом и птилолитом или без них распространяется по всей площади Паужетского месторождения и занимает верхнюю его часть. Мощность зоны аргиллизации пород зависит от прогретости пород, что хорошо прослеживается по разрезу эксплуатационного участка Паужетского месторождения с юга на север. Зона аргиллизации начинается в приповерхностном горизонте пород и заканчивается на глубинах от 60 до 300 метров.

Гидротермальные изменения пород на Паужетском месторождении изучали и изучают множество ученых. Одними из первых были В.В. Аверьев, С.И. Набоко и Б.И. Пийп, по результатам их работы были выделены следующие зоны измененных пород в разрезах термальных полей (сверху вниз) (рис. 5):

1. Зона кислотного выщелачивания мощностью до нескольких метров. Она характеризуется ассоциацией каолинит + лимонит + (пирит) + алунит, опал, тридимит. Ее образование связано с окислением H₂S до H₂SO₄ вблизи поверхности (Рычагов, Жатнуев, Коробов, 1993).

2. Зона аргиллизации и цеолитизации. Она развивается преимущественно в породах дацитового состава и может быть разделена на две подзоны с ассоциациями: а) монтмориллонит + анальцим + кварц; б) монтмориллонит + анальцим + птилолит (или сколецит) + кварц + гидробиотит + шабазит. Нижняя граница зоны контролируется изотермой 150° С, которая может достигать глубин 50—300 м (Рычагов, Жатнуев, Коробов, 1993).

3. Зона цеолитизации и фельдшпатизации. Эта зона характеризуется ассоциацией ломонтит + адуляр или (и) альбит + (кальцит + кварц + монтмориллонит + хлорит + сфен + апатит). Адуляр приурочен преимущественно к верхней части зоны. Изредка встречаются филлипсит, ангидрит, пирит, эпидот, пренит. Новообразованные минералы, среди которых преобладает ломонтит, составляют до 60% породы. Зона достигает глубин 250—380 м (Рычагов, Жатнуев, Коробов, 1993).

4. Зона пропилитизации. Данная зона слагает самые глубокие горизонты и характеризуется ассоциациями: а) кальцит + хлорит + пирит + ломонтит; б) кальцит + хлорит + пирит + ангидрит; в) кальцит + хлорит + пирит + белая слюда. Во всех ассоциациях присутствуют в качестве примеси альбит, кварц, сфен и апатит (Рычагов, Жатнуев, Коробов, 1993).



Рис. 5. Схема гидротермальной зональности на Паужетском месторождении термальных вод. Составили С.И. Набоко, А.П. Розникова (по В.И. Белоусову, 1978) 1—зона каолинизации; 2— зона аргиллизации и цеолитизации; 3—зона цеолититзации и фельдшпатизации; 4— зона пропилитизации; 5— подзона окварцевания (скв. 13); 6— изотермы; 7— скважины

Преимущественное развитие той или иной минеральной ассоциации в приведенной последовательности зависит от состава исходных пород и растворов, температуры растворов и их кислотно-щелочного и окислительного потенциалов. Границы зон расплывчатые из-за пульсационного характера самих глубинных термальных вод и разбавляющего действия атмосферных вод (Петрова, 2005).

Физико-химические параметры фильтрующихся термальных вод и состав вмещающих пород являются главными, но не единственными факторами, обуславливающими характер вторичной минерализации И формируемой ею метасоматической зональности. Большую роль играет сейсмотектоническая обстановка, воздействующая на характер миграции термальных вод.

Об изменении химического и минерального состава пород в процессе гидротермальной аргиллизации написано множество научных статей. Основными авторами, внесшими серьезный вклад в развитие этой области, являются С.И. Набоко, В.И. Белоусов, В.А. Ерощев-Шак, С.Н. Рычагов, А.Д. Коробов и многие другие. В меньшей степени изучено изменение свойств пород (Фролова и др., 2011а; Ладыгин и др., 2014; Фролова, Чернов, 2015; Фролова и др., 2016; Pola et al., 2012; del Potro et al., 2009).

В связи с обилием различных классификаций вод по величине их водородного показателя в рамках данной работы предлагается под слабощелочными понимать воды, pH которых находится в диапазоне 7,5-8,5; субнейтральными – 6,5-7,5; слабокислыми – 5,5-6,5; среднекислыми – 4-5,5; сильнокислыми – 2-4 и под ултракислыми – воды, pH которых менее 2.

1.4. Современные представления об условиях протекания процесса

аргиллизации и его влиянии на свойства вулканогенных пород

Термин «аргиллизация», обозначающий замещение исходных пород глинистыми минералами, стал употребляться в геологической литературе в XIX веке (Жариков и др., 1998). Однако стоит отметить, что уже С.П. Крашенинников в своей работе «Описание земли Камчатки», изданной в 1755 году, описывал суть процесса аргиллизации: «...выметывающаяся из ключей мелкая глина ни что иное есть, как от влаги и жару размоклое каменье...» (Крашенинников, 1755, с. 180). Существует множество различных определений аргиллизации, например: «В современном понимании аргиллизиты – это метасоматические горные породы, в которых каолинит, монтмориллонит и другие 70% новообразованные глинистые минералы слагают более объема» (Попов и др., 2001 с.740). Пожалуй, самым емким, хотя, вероятно, и недостаточно точным является определение, данное еще Ф.Ю. Левинсон-Лессингом в его петрографическом словаре: «Аргиллизация – превращение лав и других пород в глины» (Левинсон-Лессинг, Струве, 1963, с. 28). Выделяются два основных вида аргиллизации: гидротермальная, приуроченная к трещинным зонам и обусловленная воздействием слабокислотных растворов с развитием рудной минерализации (U, Au, Ag, Hg, Sb), и сольфатарная, обусловленная сульфат-хлоридными растворами (Коржинский, 1953). Чаще всего аргиллизиты образуются на небольших глубинах и при низких температурах (T = 50-150°C).

Аргиллизиты образуются по разнообразным алюмосиликатным породам магматического, осадочного и метаморфического происхождения. Наиболее интенсивно они развиты в толщах вулканогенных пород кислого и среднего составов. При аргиллизации ультрабазитов и карбонатных пород возникают тальк-карбонатные, кварцтальк-карбонатные, опал-халцедоновые и халцедон-кварцевые (с гидрослюдами) метасоматиты (Попов и др., 2001).

Аргиллизиты формируются в эндо- и экзоконтактовых ореолах гранитоидов, в вулканогенных толщах кислого и среднего составов в связи с фумарольно-сольфатарной

деятельностью и в осадочных и метаморфических породах вне связи с магматизмом. В последнем случае размещение аргиллизитов контролируется зонами повышенной проницаемости (разломы, трещины), по которым циркулируют нагретые сильноминерализованные воды (Попов и др., 2001).

В зависимости от конкретных условий, при которых проходит образование вторичных минералов, можно выделить несколько фаций аргиллизитов: смектитовую, цеолит-смектитовую, каолинит-смектитовую, алунитовую, моноопалитовую, каолинитовую, опал-каолинитовую.

Наиболее распространенной группой минералов среди аргиллизитов являются смектиты, которые образуются под воздействием слабокислых или практически нейтральных растворов с температурой до 150°С (нонтронит, сапонит, монмориллонит, бейделит). Весьма характерной является группа высококремнистых цеолитов (морденит, клиноптилолит, гейландит). Они образуются под действием щелочных термальных растворов в условиях низких температур (T < 130–150°C) и давления. Минералы группы каолинита также широко распространены. Они формируются в приповерхностных условиях под действием кислых низкотемпературных растворов. В ультракислых низкотемпературных растворах (pH = 1-4; T < 100°C) образуются минералы кремнезема (опал, низкотемпературные кристобалит и тридимит, халцедон) И алунит (Фролова и др., 2011б).

Изменения состава пород под влиянием аргиллизации более подробно в своих работах рассматривают С.Н. Рычагов, В.Н. Соколов и М.С. Чернов. Например, в статье (Рычагов и др., 2012) авторы фокусируют внимание на том, что приповерхностный горизонт гидротермальных глин является сложным, непрерывно эволюционирующим геохимическим барьером. Они представляют аргиллизированные породы как «длительноживущую (в течение голоцена ИЛИ дольше) высоко динамичную коллоидно-дисперсную минералого-геохимическую систему, функционирующую на макро-, микро- и наноуровнях в зоне гипергенеза геотермальных месторождений» (Рычагов и др., 2012, с. 379).

На Паужетском месторождении термальных вод зона развития глинистых минералов из группы монтмориллонит-нонтронит с анальцимом и птилолитом или без них распространяется по всей площади месторождения и занимает верхнюю его часть. Мощность зоны аргиллизации пород зависит от прогретости массива, что хорошо прослеживается по разрезу эксплуатационного участка Паужетского месторождения с юга на север. Зона аргиллизации начинается в приповерхностном горизонте пород и заканчивается на глубинах от 60 до 300 метров. При температурах ниже 50°C в породах

отсутствует вторичное минералообразование, а при превышении температуры 150°С анальцим и птилолит вытесняются ломонтитом.

Растворение, разрушение первичных компонентов, как правило, начинается по направлениям их ослабленных частей: дефектам структуры, двойниковым швам, зонам роста, межзерновым границам и т.п. Характерные формы новообразований – псевдоморфозы, сохраняющие очертания первичного кристалла, а также пламе-, веретенои веерообразные новообразования вдоль ослабленных зон. Собственные, хорошо сформированные кристаллы новообразований наблюдаются только в пределах свободных пространств и образуются при росте минералов из растворов.

Отличительной особенностью вторичных гидротермальных минералов является локальное непостоянство их химического состава, физических свойств и других характеристик, приводящее к постепенным изменениям кристаллической структуры и превращению одного минерального вида в другой.

В результате протекания процесса аргиллизации толща вулканогенно-осадочных пород в приповерхностных условиях оказывается переработана до состояния гидротермальной глины. Толщи гидротермальных глин на термальных полях образуют сплошной покров со средней мощностью от 1,5 до 2,5 м (на отдельных участках – до 5 м) и характеризуют область разгрузки минерализованных и часто газонасыщенных растворов, формирующихся под влиянием глубинных флюидов. В толще гидротермальных глин сверху вниз можно выделить два основных горизонта: серно- и углекислотного выщелачивания, характеризующихся различным строением и минеральным составом.

Глины зоны сернокислотного выщелачивания имеют охристо-красный цвет и брекчиевидную текстуру. Основным минералом в составе этого горизонта является каолинит. Глины характеризуются блочным строением, между блоками присутствуют пленки ожелезнения и минералов кремнезема. Блоки разламываются с образованием раковистого излома. В выделенном горизонте присутствует большое количество псевдоморфоз по обломкам исходных пород (рис. 6).

В зоне углекислотного выщелачивания глины имеют зеленовато- и синевато-серую окраску. Эта зона имеет значительно большую мощность и занимает большую часть глинистого чехла термальных полей. В минеральном составе преобладают смектиты и смешаннослойный каолинит-смектит. Эта зона также характеризуется наличием псевдоморфоз по обломкам исходных пород. Характерной особенностью зоны углекислотного выщелачивания является наличие участков пропаривания, в которых наблюдаются скопления микрокристаллов пирита, марказита и минералов кремнезема.

Под воздействием термальных вод и пара первичные компоненты вулканогенных пород (полевые шпаты, стекло, темноцветные минералы и т.д.) выщелачиваются и замещаются вторичными минеральными ассоциациями, более устойчивыми в новых условиях, характеризующихся изменением температуры, давления и состава гидротермального раствора (Ладыгин и др., 2014).

Так, в статье (Фролова и др., 20116) рассматриваются все типы гидротермальноизмененных пород (аргиллизиты, опалиты, пропилиты и др.) с точки зрения изменения их свойств в процессе гидротермальной аргиллизации. Относительно аргиллизитов авторами был сделан следующий вывод: «Аргиллизация вызывает снижение плотностных и, главным образом, прочностных и упругих характеристик пород. Существенно возрастает гигроскопическая влажность, породы приобретают пластические свойства, теряют прочность при водонасыщении (размягчаются или размокают), иногда набухают. Вследствие развития глинистых минералов формируется вторичная пористость (до 40-50%), однако проницаемость при этом снижается, т.к. поры характеризуются ультрамалым размером и не пропускают флюиды сквозь породу» (Фролова и др., 20116, с. 49). В приповерхностной зоне термальных полей зачастую происходит полное превращение вулканогенных пород в гидротермальные глины. При этом замещение чаще всего имеет псевдоморфный характер (рис. 6) и породы сохраняют первичную структуру.



Рис. 6. Псевдоморфная структура в гидротермальных глинах, развитых по андезитам.

Активное изучение процесса аргиллизации ведется и за рубежом, в странах, где гидротермальная энергия играет большую роль в обеспечении тепловой и электроэнергией населенных пунктов и различных производств.

Например, группой авторов (Navelot et. al., 2016) были исследованы 64 образца вулканогенных пород из обнажений Гваделупского архипелага, где геотермальной энергетикой обеспечивается более 7% потребления электричества на островах. Образцы были разделены на группы по составу и степени гидротермальной измененности, а впоследствии были определены показатели таких свойств, как плотность, плотность твердой фазы, скорости упругих волн, проницаемость и теплопроводность.

Проведенные исследования показали, что при увеличении гидротермальной измененности пород плотность андезитов снижается с 2,59 г/см³ до 2,37 г/см³; плотность твердых частиц снижается с 2,75 г/см³ до 2,64 г/см³; скорость продольных волн - с 4,51 км/с до 0,57 км/с. Согласно выводам авторов, отобранные ими образцы весьма схожи по химическому составу, однако имеют совершенно различные физические и физикомеханические свойства. В отобранных ими образцах пористость изменяется от 1,4% до 52,7%, теплопроводность - от 0,28 Вт/м*К до 2,08 Вт/м*К (Navelot et. al., 2016).

Схожие исследования проводятся по всему миру, в том числе и в Новой Зеландии. Там коллективом исследователей (Siratovich, et. al., 2012) были изучены образцы андезитов, отобранных из трех эксплуатационных скважин на месторождении Mighty River в Ротокаве, Новая Зеландия. Андезиты из этих скважин имеют различную степень изменения - от среднеизмененных до полностью переработанных. Авторами определялись такие свойства андезитов, как пористость, плотность, скорость упругих волн, прочность на одноосное сжатие и прочность на разрыв бразильским методом. Результаты исследований представлены в виде корреляций между показателями физических и физико-механических свойств (рис. 7).

Можно заметить, что в образцах с большей пористостью наблюдается понижение скорости продольных волн, в образцах с большей плотностью скорости продольных волн имеют повышенные значения (рис. 7а). Кроме того, наблюдается закономерное увеличение прочности пород на сжатие при увеличении плотности образцов и увеличении скоростей упругих волн (рис. 76, 7в).

Показатели, определенные коллективом авторов в данной работе, будут использоваться при моделировании и других научных исследованиях на данном месторождении, где установлена крупнейшая в мире турбина, работающая на геотермальном паре, обеспечивающая около 3% новозеландского электропотребления. Еще одно подобное исследование было проведено рядом авторов (Pola et. al. 2012) над образцами вулканогенных пород Аппенинского полуострова и прилегающих островов. Ими были исследованы породы острова Искья, а также породы вулкана Сольфатара и вулканического района Больсена.





Зависимости: а - пористости от скорости продольных волн; б - прочности на одноосное сжатие от плотности; в - прочности на одноосное сжатие от скорости продольных волн; г - плотности от скорости продольных волн

Суммарно исследователями были изучены 11 образцов вулканогенных пород, для которых определялось большое количество показателей свойств, а также было изучено строение пород с помощью шлифов и элетротомографии. Наиболее важные выводы, сделанные в этой статье, кратко резюмируется следующим образом:

• Самым важным фактором, контролирующим процесс гидротермального изменения, является поток термальных вод и пара. Микротрещины также являются важным фактором, определяющим свойства, например, они оказывают значительное влияние на изменение Vp и Vs.

• Связь между изменениями химического состава и степенью гидротермальной переработки может быть охарактеризована с помощью предлагаемого авторами индекса

Chemical Weathering Index (CWI), который определяется как CWI=(Al₂O₃)*(100)/(Al₂O₃+CaO+Na₂O).

• Большинство физико-механических свойств измененных вулканических пород контролируются изменениями пористости. В общем, пористость увеличивается параллельно со степенью изменения почти для всех типов пород.

• Значения скоростей поперечных волн имеют большой разброс не только в пределах каждой группы (по степени изменения), но и внутри каждого типа породы. А скорость продольных волн, наоборот, хорошо коррелирует со степенью изменения пород (рис. 8).



Рис. 8. Зависимости скоростей упругих волн от пористости и типа породы

(по Pola et. al., 2012)

а – зависимость скорости продольных волн от пористости; б - зависимость скорости поперечных
волн от пористости; в - зависимость скорости продольных волн от типа породы в порядке возрастания
измененности; г - зависимость скорости поперечных волн от типа породы в порядке возрастания
измененности

• Значение пространственного затухания (α_s) колебаний может быть полезно для определения дефектов в породе. Чем меньше значение α_s , тем меньше дефектов в породах: самая однородная порода (SLA1) имеет значение 1,98 дБ / см, в то время как самые измененные имеют значения в диапазоне от 4,06 до 4,66 дБ / см (например SLA2, SLA4 и IGTF) (Pola et. al. 2012).

Этим же коллективом авторов было проведено еще одно исследование, опубликованное в 2014 году (Pola et. al., 2014). Исследование проводилось на тех же образцах, что и в предыдущей статье авторов, но на этот раз гораздо подробнее были рассмотрены физико-механические свойства гидротермально-измененных пород (рис. 9).



Рис. 9. Зависимости прочности на одноосное сжатие гидротермально измененных пород от различных показателей свойств (по Pola et. al., 2014)

а – скорости продольных волн; б –скорости поперечных волн; в - пористости; г - открытой пористости; д – динамического модуля Юнга; е – модуля Юнга

По полученным данным можно наблюдать довольно отчетливую экспоненциальную зависимость между скоростями упругих волн и прочностью на одноосное сжатие, а также открытой пористостью (и открытой, и общей) и прочностью на одноосное сжатие. По результатам, отраженным на этих графиках и другим, приведенным в статье (Pola et. al., 2014), авторами были сделаны некоторые выводы.

 Уменьшение прочности на одноосное сжатие и на разрыв, а также уменьшение модуля Юнга при увеличении степени измененности пород связано с изменениями плотности, пористости и химического состава.

- 2. Значения прочности на одноосное сжатие и на разрыв заметно уменьшаются с увеличением степени измененности. Причем разброс значений минимален в образцах с высокой степенью измененности, когда объем мелких новообразованных пор заметно увеличивается по отношению к изначальным более крупным неоднородностям, которые определяют прочность в менее измененных образцах.
- Значения угла внутреннего трения, полученные по результатам трехосных испытаний, варьируются от 10° до 23° у наиболее измененных образцов и сильно отличаются от значений, полученных для слабо измененных образцов, изменяющихся от 36° до 57°.

1.5. Современные представления об условиях протекания процесса опализации и его влиянии на свойства вулканогенных пород

Под воздействием сильнокислых и ультракислых термальных вод на термальных полях протекает процесс опализации, в результате которого исходные вулканогенные породы выщелачиваются и превращаются в породу, практически полностью сложенную опалом (рис. 10). Ультракислые термальные воды образуются в результате окисления H₂S до H₂SO₄ в приповерхностных условиях на термальных полях, из-за чего толщи опалитов редко имеют мощность, превышающую первые десятки метров. Процесс опализации неплохо изучен с точки зрения минеральных преобразований (Набоко, 1963; Pычагов и др., 1993; Zimbelman et. al., 2005), однако его влияние на свойства пород изучено слабо, хотя ряд исследователей и отмечает необходимость изучения опализированных зон вулканических построек как наиболее ослабленных участков, по которым происходит активация склоновых процессов.

Опализация происходит в настоящее время на многих действующих вулканах мира, в том числе и Курило-Камчатского региона (Шивелуч, Семячик, Кошелева, Эбеко, Менделеева, Головнина и др.) под воздействием сульфатных и сульфатно-хлоридных растворов. Для образующихся опалитов характерны сохранившиеся структуры исходной породы (особенно на начальных стадиях), значительная пористость и низкая плотность. Плагиоклазы переходят в опал зонально, причем обычно изменения начинаются с зон, богатых Са. Аналогично зональным изменениям подвержен и полевой шпат, у которого чаще всего изменения начинаются с центральной части кристалла, имеющей отличный от периферийных частей состав. Пироксены, как и основная масса породы, замещаются опалом начиная с трещин (Набоко, 1963).

С.И. Набоко (1963) описывала возникновение на термальных полях студенистого геля кремнекислоты, способного к перемещению и заполнению трещин в породах. Подобный гель способен образовывать плотные опаловые агрегаты в виде жил и линз.

Опалиты чаще всего имеют белый цвет (рис. 10) и могут характеризоваться различным составом: встречаются как образцы чистого опалита (SiO₂ ~ 98%), так и опалиты с примесью алунита, каолинита, лимонита, пирита. Единственным, помимо SiO₂, относительно устойчивым к сернокислотному выщелачиванию компонентом является TiO₂, содержание которого в опалитах оказывается практически равным содержанию в исходных породах, подвергающихся выщелачиванию. Таким образом, в процессе кислотного выщелачивания происходит вынос из породы всех компонентов (как породообразующих, так и рудных), за исключением SiO₂ и TiO₂, которые концентрируются в месте протекания процесса.



Рис. 10. Опалиты с термального поля Северного кратера Центрального Семячика

Изменение свойств опализированных пород частично рассмотрено лишь в небольшом количестве научных работ. Так, в статьях Фроловой (Фролова и др., 2011а; Фролова и др., 2020) рассматривается процесс опализации в андезитах Верхне-Кошелевского и Южно-Камбального Дальнего термального полей, а также туфах Мутновской геотермальной системы. Согласно полученным авторами данным, при опализцации эффузивных пород и плотных разностей туфов происходит значительное снижение плотности, упругих характеристик и прочности в основном за счет формирования вторичной пористости, а также за счет изменения минерального состава. Так, у андезитов Кошелевской гидротермальной системы пористость увеличивается с 8% у исходных андезитов до 37% у опалитов, снижется плотность твердых частиц (с 2,85 г/см³ до 2,31 г/см³) и прочность на одноосное сжатие (со 120 МПа до 30 МПа) (Фролова и др., 2011а). Аналогичная картина наблюдается у пород, слагающих Южно-Кабальное Дальнее термальное поле: плотность снижается с 2,71 г/см³ у исходных пород до 1,66 г/см³ у серных опалитов, пористость увеличивается с 6% до 30%, а прочность на одноосное сжатие снижается практически в 40 раз (с 118 МПа до 3,1 МПа) (Фролова и др., 2020).

В то же время при опализации слабосцементированных, сильнопористых туфов наблюдается обратный эффект. Например, слабые неизмененные туфы Мутновской гидротермальной системы обладают следующими значениями показателей свойств: $\rho = 0.9-1.5 \text{ г/см}^3$; n = 40-60%; Vp = 1.5-2.2 км/c; Rc ≤ 10 МПа. А опализированные разности: $\rho = 1.5-1.9$ г/см³; n = 30-40%; Vp = 2.0-3.3 км/c; Rc = 20-30 МПа. Причем, в отдельных случаях, когда в порах и трещинах происходит кристаллизация тонкокристаллического кварца или халцедона, значения пористости могут достигать 10%, а прочности – 50 МПа (Фролова и др., 2011а).

Выводы к главе 1:

- Человечество начало активно изучать и осваивать гидротермальные системы в начале XX века, и на данный момент энергетические системы отдельных крупных стран в значительной степени опираются на энергию тепла Земли, используемую как напрямую в виде источника тепла, так и в качестве источника электроэнергии.
- 2. Гидротермально измененные породы широко распространены по всему миру и в первую очередь приурочены к тектонически и вулканически активным регионам.
- Гидротермальная деятельность весьма активным образом воздействует на состав, строение и свойства пород, вмещающих термальные флюиды, причем характер этого воздействия во многом зависит от гидрогеохимических параметров термальных вод.
- 4. В условиях разгрузки среднекислых до слабощелочных термальных вод исходные вулканогенные породы подвергаются процессу аргиллизации, в результате действия которого первичные минералы замещаются на глинистые, а свойства пород радикально изменяются.
- 5. В условиях разгрузки сильнокислых и ультракислых флюидов на термальных полях протекает процесс опализации, выражающийся в выщелачивании практически всех петрогенных компонентов, за исключением SiO₂ и TiO₂, в результате чего происходит значительный рост пористости, снижение плотности, а также прочностных и деформационных характеристик.

Глава 2. Характеристика исследованных термальных полей 2.1. Паужетско-Камбальный район

2.1.1. Геологическое строение района

Паужетско-Камбально-Кошелевский район расположен в южной части полуострова Камчатка между Курильским озером и поселком Озерновский на берегу Охотского моря. Название района состоит из названий единственного поселка (Паужетка) и двух крупных действующих вулканов (Камбальный и Кошелева), постройки которых (рис. 11) содержат в себе крупные гидротермальные системы. Впервые этот район и его термальные источники были описаны С.П. Крашенинниковым во время его экспедиции по Камчатке в 1738 г., а результаты исследований были опубликованы в 1755 г. Серьезное геологическое изучение Паужетского геотермального района началось в 30-х годах ХХ века. Первые работы производились экспедициями СОПСа и Дальневосточного геологического треста. В продолжавшихся до 1960 года, были результате работ, выделены отдельные стратиграфические комплексы, границы которых были прослежены на всей рабочей площади (рис. 12). Геолого-съемочные работы проводились такими геологами, как Б.И. Пийп, А.Г. Тимофеев, В.М. Чапышев, А.Е. Святловский, В.В. Аверьев и С.Е. Апрелов (Аверьев, Белоусов, 1965).



Рис. 11. Вид на Паужетско-Камбально-Кошелевский район с высоты 6 км

В геологическом строении района принимают участие породы мелового возраста и вулканогенные образования мио-плиоценового и четвертичного времени. Породы мелового возраста в естественных обнажениях и в керне скважин не обнаружены, но к северу и северо-западу от Паужетского района они широко представлены на дневной поверхности (Рычагов, Жатнуев, Коробов, 1993).



геологическая карта района масштаба 1:200000 (по С.Н. Рычагову, В.Н. Соколову, М.С. Чернову, 2012)

На врезке показаны основные вулканические пояса Камчатки: І – Западно-Камчатский, II – Центрально-Камчатский, III – Восточно-Камчатский. На основной схеме обозначены: 1 – лаво-пирокластические отложения неогенового возраста; 2 – вулканогенно-осадочные отложения (туффиты) Паужетской свиты; 3 – игнимбриты; 4 – андезидациты – андезибазальты Кошелевского вулканического массива; 5 – вулканиты (лавы, пирокластические потоки, экструзии) Камбального хребта; 6 – пирокластические отложения (пемзы); 7, 8 – субвулканические и экструзивные тела неогенового (7) и четвертичного (8) возраста; 9 – поля гидротермально измененных пород, а – вторичных кварцитов, б – аргиллизитов; 10 – основные современные термоаномалии района: 1 – Первые Горячие Ключи (Пионерлагерь), 2 – Вторые Горячие Ключи (Паужетское месторождение), 3 – Северо-Камбальная, 4 – Центрально-Камбальная, 5 – Южно-Камбальная, 6 – Верхне-Кошелевская, 7 – Нижне-Кошелевская

Паужетский геотермальный район в основном сложен осадочно-вулканогенным комплексом пород. Большая часть покрыта эффузивными и пирокластическими образованиями основного, андезитового или дацитового состава (рис. 13). Осадочные образования в основном являются продуктами разрушения лавового и туфового материала, занимают пониженные части рельефа (Аверьев, Белоусов, 1965).

Палеоген-миоценовые образования (анавгайская серия $P - N_l$)

Наиболее древние отложения района, имеющие выходы на поверхность, относятся А.Е. Святославским, В.В. Аверьевым (1961) и С.Е. Апрелковым к палеогеновому и миоценовому возрасту. Породы представлены туфами, туфобрекчиями, лавами андезитов
и базальтов. В нижней части толщи преобладает пирокластический материал, а в верхней – лавовые потоки. Среди толщи пирокластических пород широко распространены лавовые потоки оливиновых и плагиоклазовых базальтов. Мощность лавовых потоков не превышает нескольких десятков метров. Встречаются дайки базальтового состава (Аверьев, Белоусов, 1965).

Непосредственно в месте выхода на поверхность Паужетских термальных вод олигоцен-миоценовые отложения, по данным бурения, залегают на глубине 650 м и представлены полимиктовыми песчаниками. Эти песчаники имеют осадочное происхождение, для них характерна равномерная зернистость, слоистость и полимиктовый состав обломков (Аверьев, Белоусов, 1965).



Рис. 13. Геолого-гидрогеологический разрез через Паужетское месторождение термальных вод в направлении Ю – С (по В.И. Белоусову, 1965)

Пьезометрический уровень термальных вод; 2 – разведочные скважины; 3 – геоизотермы;
4 – тектонические нарушения, установленные и предполагаемые; 5 – аллювиальные отложения; 6 – лавы и лавобрекчии андезидацитового состава; 7 – чередующиеся прослои пепловых, псаммитовых и псефитовых туфов дацитовго состава; 8 – туфы псефитовые, пемзовые, дацитового состава; 9 – туфобрекчии;
10 – чередующиеся прослои псефитовых, псаммитовых и алевритовых туфов; 11 – туфобрекчии андезитового состава; 12 – спекшиеся туфы дацитового состава; 13 – туфы и туфобрекчии основного состава; 14 - песчаник

Миоцен-плиоценовые образования (алнейская серия $N_1^3 - N_2$, по С.Е. Апрелкову)

Отложения, идентифицированные С.Е. Апрелковым как миоцен-плиоценовые, широко распространены в данном районе. По литологическим особенностям породы можно разделить на три фациальные группы. Первая группа представлена андезибазальтовыми лавами и туфобрекчиями, вторая – спекшимися туфами дацитов и игнимбритами, и к третьей группе относятся псефитовые пемзовые туфы дацитов. Выделенные группы (согласно С.Е. Апрелкову) соответствуют алнейской, голыгинской и паужетской свитам.

Алнейская свита (Nıal)

Данная свита представлена туфами, туфобрекчиями, лавами андезитов и базальтов. Пространственно они связаны с палеоген-миоценовыми образованиями и занимают большие площади на Охотском и Тихоокеанском побережьях. Мощность лавовых потоков не превышает первых десятков метров. Лавовые потоки сохранили первоначальную форму, и для них характерно переклинальное залегание, по которому можно восстановить первоначальные очертания палеовулканов. Породы имеют свежий облик, слабо трещиноваты. Мощность эффузивно-пирокластической толщи основных пород достигает 1000 м (Аверьев, Белоусов, 1965).

Голыгинский горизонт (N2gl)

Кристалловитрокластические спекшиеся туфы и игнимбриты дацитового состава, слагающие голыгинский горизонт, широко распространены по площади исследуемого района. Они залегают на более древних эффузивных образованиях практически горизонтально и образуют выровненные поверхности (рис. 14) к северу от реки Озерной и к востоку от Курильского озера.



Рис. 14. Бастионные формы рельефа, образованные голыгинскими спекшимися туфами

В долине р. Паужетка спекшиеся туфы были вскрыты бурением на глубине 380 м. Ниже, начиная с глубины в 570 м, залегают туфобрекчии андезитов и базальтов, межобломочный материал которой близок по химическому составу к спекшимся туфам. Мощность спекшихся туфов и игнимбритов варьируется в пределах 150–300 м (Аверьев, Белоусов, 1965).

Паужетская свита (N2-Q1раи)

Отложения паужетской свиты представлены туфами. Они распространены на ограниченной, небольшой площади. Ее выходы наблюдаются в верхней части долины р. Озерная, в северной части Камбального хребта и у юго-западного подножия вулкана Дикий Гребень. Также она вскрыта скважинами в долине Паужетки.

Псефитовые туфы дацитов – это легкая, пористая, прочно сцементированная порода светло-бурого цвета с литокластической структурой и обломками, в основном представленными пемзой. В различных частях района туфы неоднородны по возрасту и условиям накопления, но все же объединяются в одну свиту. В долине р. Паужетка алевропелитовые и псефитовые пемзовые туфы переотложены. Для толщи характерно грубослоистое строение. В ней наблюдается два полных ритма. В нижней части разреза обнажается псефитовый туф, вверх по разрезу он резко сменяется алевропелитовым туфом, на котором, в свою очередь, залегает такая же пачка. Мощность паужетской свиты примерно оценивается в 450–500 м (Аверьев, Белоусов, 1965).

Среднечетвертичные образования (Q2)

Мощные толщи пемз имеют широкое распространение в Паужетском геотермальном районе. Пемзы наиболее развиты в восточной части района, где имеются сходные с ними по химическому составу псефитовые и спекшиеся туфы дацитов. Главная масса пемз приурочена к пониженным, межгорным участкам территории.

Пемзовые отложения однородны по своему строению. В толще встречаются редкие обломки и линзы обломков лав базальтов, андезитов и дацитов. Дацитовая пемза пористая, легкая и часто имеет волокнистое строение. Мощность пемзовых отложений определяется величиной от нескольких десятков метров до 150–200 м. Образование мощных отложений пемз, вероятно, связано с водной обстановкой (Аверьев, Белоусов, 1965).

Верхнечетвертичные и современные эффузивные образования (Q3-4)

В этом комплексе трудно произвести более детальное стратиграфическое деление. Образование и развитие большинства современных вулканических форм происходило на протяжении последних этапов четвертичного периода, поэтому данный вулканогенный комплекс логичнее рассматривать, не вводя возрастное деление. Верхнечетвертичные и современные отложения слагают существующие в настоящее время вулканические постройки: вулканы Кошелевский, Камбальный, Ильинский, Дикий Гребень и др. Большинство вулканических массивов сложено базальтами, андезитами и их шлаками. На их фоне выделяется Дикий Гребень, центр которого (гора Неприятная) является дацитовым куполом, от которого в субширотном направлении распространены лавовые потоки.

Среди эффузивного комплекса пород верхнечетвертичного возраста заслуживают внимания экструзивные образования, сложенные дацитами, которые прорывают толщу нижележащих осадочных пород. Они распространены на склонах Камбального хребта, где в настоящее время проявляется гидротермальная деятельность. Экструзивные купола, прорвавшие осадочную толщу туфов, дали небольшие лавовые потоки (Аверьев, Белоусов, 1965).

Верхнечетвертичные и современные аллювиальные образования (aQ3-4)

Аллювиально-озерные осадочные отложения верхнечетвертичного возраста имеют наиболее широкое распространение в районе впадения р. Паужетка в р. Озерная, на морском побережье, а также отмечаются в руслах крупных ручьев. Озерные отложения состоят из туфоалевролитов, которые вверх по разрезу сменяются пемзой. Между ними иногда встречаются линзы конгломератов и прослойки глин, обогащённых органикой. Аллювиальные образования представлены валунно-галечниковым материалом и песком (Аверьев, Белоусов, 1965).

В геолого-структурном отношении Паужетское месторождение находится у северозападного подножия антиклинальной структуры Камбального хребта (рис. 11). К наиболее древним породам, вскрытым бурением на Паужетском месторождении, принадлежит толща вулканомиктовых песчаников палеоген-неогенового возраста. Толща эта залегает на глубине более 650 м. Над песчаниками залегает туфобрекчия, которая, в свою очередь, перекрывается спекшимися туфами дацитов. Мощность туфобрекчий - 80 м. Толща спекшихся туфов имеет мощность 190 м и датируется раннечетвертичным возрастом. Выше по разрезу залегает туфобрекчия андезитов, которая также датируется раннечетвертичным возрастом. Мощность толщи в пределах месторождения колеблется от 70 до 140 м, уменьшаясь в сторону Камбального хребта. Выше туфобрекчий залегает толща псефитовых туфов, мощность которой колеблется от 180 до 240 м. Толща псефитовых туфов перекрывается чехлом плотных алевропелитовых и алевропсаммитовых туфов (Аверьев, Белоусов, 1965). На поверхности термальных полей распространен маломощный (до 6 м) слой гидротермальных глин. Изучение гидрогеологического строения Паужетского геотермального месторождения термальных вод представляло особый интерес и началось в 1959 г, когда была пробурена первая колонковая скважина. Первыми исследователями были: Б.И. Пийп, В.В. Аверьев, В.В. Иванов, В.М. и Н.Г. Сугробовы, В.И. Белоусов и др. Однако гидрогеологическое изучение района продолжается и по сей день. Среди современных исследователей можно выделить А.В. Кирюхина, Н.П. Асаулову, С.Н. Рычагова и др.

В районе Паужетского месторождения термальных вод принят следующий гидрогеологичесикй разрез (рис. 15). Аллювиальные валунно-галечные отложения заключают мощный поток грунтовых вод, за исключением больших междуречных участков Паужетки, ее протоков и Левой Паужетки, недалеко от их слияния. Слабопроницаемые пепловые псаммитовые туфы и туффиты в местах с прослоями псефитовых пемзовых туфов представляют собой верхний водоупор. Нижележащие псефитовые туфы, имеющие прослои слабопроницаемых туфобрекчий, обводнены, характеризуются наибольшей водообильностью и образуют основной водоносный напорный комплекс. Коэффициент проницаемости этих отложений, по данным откачек, варьируется в пределах от 0,0025 до 0,035 дарси, что связано с достаточно сильной изменчивостью свойств пород по вертикали. Далее псефитовые туфы подстилаются весьма слабопроницаемыми туфобрекчиями и спекшимися витрокристаллокластическими туфами голыгинского горизонта (N₂). Вулканомиктовые песчаники палеоген-миоценового возраста образуют второй водоносный комплекс (Аверьев, Белоусов, 1965).



Рис. 15. Геолого-гидрогеологический разрез Паужетского месторождения термальных вод в направлении 3 – В (по В.И. Белоусову, 1965) Условные обозначения см. на рис. 13

Выделение в пределах месторождения обводненных пород подтверждено данными термометрии скважин (в интервале залегания непроницаемых туфов и туффитов температура резко возрастает от поверхности до их подошвы).

Большую роль в циркуляции высокотермальных вод в толще агломератовых туфов играют трещины, скорее всего приуроченные к тектоническим нарушениям. Еще первые исследователи Паужетских источников обратили внимание на закономерное расположение характерных выходов термальной воды, возможно указывающих на положения тектонических нарушений.

Существуют различные взгляды на условия формирования Паужетского месторождения термальных вод. Согласно представлениям В.И. Белоусова (1965), термальные воды Паужетского месторождения поднимаются к поверхности по трещиноватым породам, слагающим Камбальный вулканических хребет, а затем по толщам псефитовых туфов и туфопесчаников спускаются в долину реки Паужетка, на своем пути образуя ряд термальных полей на поверхности в местах залегания особенно трещиноватых пород (рис. 16). Данная схема является достаточно логичной, так как вся осевая часть Камбального хребта изобилует большим количеством термальных полей.



Рис. 16. Схема формирования и разгрузки Паужетских гидротерм (по В.И. Белоусову, 1965)

1 – алевропелитовый чехол; 2 – псефитовые туфы; 3 – спекшиеся туфы; 4 – туфопесчаники; 5 – разломы; 6 – инфильтрационные воды; 7 – эндогенный пар; 8 – высокотермальные воды; 9 – паровые струи

Некоторыми исследователями предлагаются альтернативные схемы питания Паужетских термальных источников. Условия формирования Паужетского месторождения термальных вод представляются Кирюхиным А.В. следующим образом: холодная вода поступает с поверхности по зонам крупных разломов до глубин 5-6 км, где температура превышает 250°C. Там вода нагревается и формирует восходящий поток, который поступает в гидротермальный резервуар в пределах артезианско-вулканогенного бассейна (рис. 17) (Кирюхин и др., 2010). Однако в данной схеме обнаруживается ряд несостыковок с реальной картиной природных разгрузок в этом районе. Например, по разломной зоне в осевой части Камбального хребта, скорее всего, должен происходить подъем разогретых термальных вод, так как сам Камбальный хребет изобилует большим числом термальных полей и разгрузок термальных вод.



Рис. 17. Концептуальная гидрогеологическая модель условий формирования Паужетского геотермального месторождения (по Кирюхину и др., 2010)

 гидротермальный резервуар; 2 – нисходящие потоки холодных метеорных вод; 3 – восходящие потоки нагретых флюидов; 4 – разломы; 5 – геотермальные скважины. К₂ –метаморфический фундамент; Pg₃ an – миоценовые песчаники; Nal – неогеновые андезитовые туфы и лавы; N₂gol – псефо-псаммитовые туфы голыгинского горизонта; N₂³-Q₁pau – туфы Паужетской свиты; βQ₁₋₂ – андезиты; ξQ₂₋₃, ξQ₄ – экструзивный риолито-дацитовый комплекс

Пожалуй, самой активной в гидротермальном отношении структурой Паужетско-Камбально-Кошелевского района является Камбальный вулканический хребет, который простирается субмеридианально на север от основной постройки активного Камбального вулкана (рис. 18). На двух третьих его длины практически непрерывно располагаются термальные поля с общей тепловой мощностью, превышающей 10 МВт (Белоусов и др., 1976).



Рис. 18. Южно-Камбальные термальные поля и вулкан Камбальный с высоты 6 км

История развития Камбального вулканического хребта, вероятно, началась с образования Паужетской кальдеры и последующего резургентного посткальдерного поднятия, осложненного тектоническими движениями (Bindeman et al., 2010). Рядом исследователей (Давыдова и др., 2022) возраст заложения Камбального хребта определяется относительно дацитовой экструзии Плоская, которая имеет возраст ~235 тыс. лет и, вероятно, образовалась практически одновременно с заложением Камбального хребта. Позже активность постройки смещалась на юг, образовав вулкан Северный Камбальный, а затем и современный вулкан Камбальный (Komzeleva et al., 2021). Именно на стыке северного окончания постройки древнего вулкана Северный Камбальный и более древней части Камбального хребта расположены Южно-Камбальные термальные поля (Структура ..., 1993).

Геологическое строение Камбального хребта является весьма сложным из-за наличия нескольких центров эруптивной активностии и осложнений в виде прорывающих постройку субвулканических и интрузивных тел. Серьезное геологическое изучение Камбального хребта началось в середине прошлого века. В.В. Аверьев и А.Е. Святловский (1961) представили Камбальный хребет как вулканотектоническую структуру (рис. 19), внедрения образовавшую антиклинальную форму В результате И ИЗЛИЯНИЯ среденчетвертичных лав (Аверьев, Святловский, 1961). В общем виде строение Камбального хребта можно представить как ряд наклонных толщ переслаивания лав андезитового и базальтового составов, туфов и линз обвально-осыпных отложений, осложненных экструзивными и субвулканическими телами (Структура ..., 1993).



Рис. 19. Структура Камбального хребта (по Аверьеву, Святловскому, 1961)

Своеобразным центром северной части постройки Камбального хребта можно назвать вулкан Черные скалы, который имеет крайне схожий состав вулканитов и, возможно, сингенетичен вулкану Камбальный, что было отмечено В.И. Белоусовым (Белоусов и др. 1976). Также ряд авторов (Структура ..., 1993) указывает на схожесть составов продуктов извержений южной части Камбального хребта (влк. Севверный Камбальный) и активного вулкана Камбальный, что указывает на единый источник мантийного материала всего вулканического хребта.

Последнее и единственное историческое извержение Камбального вулкана (рис. 20) произошло в 2017 году и продолжалось с 25 марта по 9 апреля. Извержение имело форму эмиссии пепла и газа (Рычагов и др., 2017). Пепловая колонна, извергаемая вулканом, была наклонена под углом 45° к горизонту и поднималась на высоту 6 км над уровнем моря, а далее трансформировалась в пепловый шлейф, распространявшийся в южном направлении. Спустя сутки после активизации вулкана фронт шлейфа, насыщенного пеплом, находился на расстоянии 904 км к югу от кратера вулкана. Площадь суши, на которой отложились пеплы, составила приблизительно 630 км², а площадь территорий моря и суши, через которые пепловый шлейф прошел в течение 24 часов, составила приблизительно 650000 км² (Гирина и др., 2017).



Рис. 20. Извержение вулкана Камбальный (фото Варавской Л.).

Относительно источника теплового питания гидротермальной системы Камбального хребта ведутся активные споры, однако большая часть исследователей считает, что в этой роли выступает малоглубинное магматическое тело, связанное с очагом современного вулкана Камбальный. Большая часть исследователей сходятся во мнении, что существует явная связь термопроявлений Паужетского месторождения (рис. 16) с термопроявлениями Камбального хребта (Структура ..., 1993). Одним из последних крупных исследований на эту тему является статья (Komzeleva et. al., 2021), коллектив авторов которой по результатам анализа сейсмических данных предположил, что в 2017 году извержение вулкана Камбальный было вызвано подъемом магмы из очага, располагающегося на глубине 7-8 км под современной постройкой вулкана, которая вступила в контакт с метеорной водой, что вызвало ряд крупных фреатических взрывов. В то же время авторы данного исследования предполагают, что геотермальная активность на Камбальном хребте связана с другим, более глубинным источником (рис. 21), изолированным от очага действующего вулкана Камбальный (Komzeleva et. al., 2021).



Рис. 21. Схема строения земной коры под вулканом Камбальный по сейсмическим данным (по Komzeleva et. al., 2021)

В пределах Камбального вулканического хребта выделяют 3 группы термальных полей: Северо-Камбальные, Центрально-Камбальные и Южно-Камбальные термальные поля. Отдельными исследователями, в том числе и В.И. Белоусовым, Центрально-Камбальные термальные поля включаются в группу Северо-Камбальных. Общая тепловая мощность, подсчитанная В. И. Белоусовым с соавторами (Белоусов и др., 1976), для группы Северо-Камбальных термальных полей составляла 2258,2 ккал/с, для Южно-Камбальных – 2017,4 ккал/с. При этом самым мощным термальным полем, согласно данным расчётам, является Южно-Камбальное Центральное термальное поле, мощность которого составляет 902 ккал/с.

В последние годы сотрудниками лаборатории геотермии института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН ведутся активные исследования геологического строения Камбального хребта различными геофизическими методами. В частности, ими было показано, что все три термальных поля Южно-Камбальной группы расположены в областях знакопеременных зон, то есть в тех местах, где величина модуля вектора магнитной индукции проходит через 0 и изменяет величину с положительной на отрицательную или наоборот (Нуждаев и др. 2019).

47

2.1.2. Восточно-Паужетское термальное поле

Восточно-Паужетское термальное поле расположено на Западном склоне Камбального вулканического хребта на высоте около 300 метров над уровнем моря. Восточно-Паужетское термальное поле является частью Паужетского месторождения термальных вод и находится в его восточной оконечности. Наиболее прогретая часть поля имеет вытянутую в субширотном направлении форму и линейные размеры примерно 35х100 м (рис. 22).



Рис. 22. Восточно-Паужетское термальное поле на фоне поселка Паужетка

Восточно-Паужетское термальное поле является крайне интересным объектом для изучения, так как оно находится гипсометрически выше основного эксплуатационного участка месторождения, за счет чего можно считать условия циркуляции и разгрузки термальных вод и пара естественными. Это крайне важно, так как на Паужетском месторождении расположена Паужетская ГеоЭС, которая забирает пар из недр, чем сильно нарушает режим циркуляции подземных вод и водяного пара. Согласно схеме питания Паужетского месторождения В.И. Белоусова (см. рис. 16), термальные воды сначала проходят через Восточно-Паужетское термальное поле, а лишь потом спускаются ниже, в долину реки Паужетка. На Восточно-Паужетском термальном поле развиты паро-газовые струи и кипящие грязе-водные котлы. Местами температура грунтов достигает 105 °C на глубине уже в 50 см. Водородный показатель разгружающихся на данном термальном поле вод колеблется в субнейтрально-слабощелочных пределах (pH 7,0-8,5).

Основной частью полевых работ, проводившихся на Паужетском мсторождении термальных вод в период с 2016 по 2020 г.г., было бурение скважин с отбором образцов (рис. 23, 25). За это время сотрудникам ИВиС ДВО РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова удалось отобрать 51 образец андезитов различной степени измененности: от неизмененных до практически полностью переработанных метасоматических брекчий. По части материалов, полученных в ходе этих исследований, был опубликован ряд работ (Рычагов и др. 2017; Феофилактов и др., 2017; Рычагов и др., 2019; Большаков и др., 2020; Сандимирова и др. 2021).



Рис. 23. Колонки скважин, пробуренных на Восточно-Паужетском термальном поле (составлено С.Н. Рычаговым) слева – ВПП-8/16; справа – ВПП-2/18;

Отбор образцов андезитов производился из скважин, пробуренных колонковым способом на глубину до 8,5 метров. Бурение производилось с помощью переносной буровой установки КМБ 2-10. В данной работе были исследованы образцы из 5 скважин, пробуренных непосредственно на термальном поле (ВПП-1/18; ВПП-2/18; ВПП-5/15; ВПП-8/16; ВПП-2/17, ВПП-1/20) (рис. 24), и одной скважины, пробуренной при разведке месторождения (скв.102).



Рис. 24. Восточно-Паужетское термальное поле с указаниями мест бурения скважин

Также был исследован образец неизмененного андезита, отобранный на небольшом удалении от термального поля, и образец «пропаренного» андезита, отобранный из активной паровой струи. Все образцы были разделены на 4 группы по степени измененности.



Рис. 25. Колонки скважин, пробуренных на Восточно-Паужетском термальном поле

(составлено С.Н. Рычаговым) слева – ВПП-5/15; справа – ВПП-2/17 По результатам бурения в строении Восточно-Паужетского термального поля составлен обобщенный разрез (рис. 26) поля и выделены три основных горизонта (сверху вниз): гидротермальные глины, метасоматические брекчии и среднеизмененные андезиты. На поверхности и до глубины от 2,5 до 4 метров залегают гидротермальные глины, образовавшиеся в результате окончательной аргиллизации исходных андезитов. В толще глин выделяются несколько горизонтов, а ее строение достаточно детально рассматривается в ряде работ (Рычагов и др., 2012; Чернов и др., 2016; Рычагов и др., 2008). Под толщей глин залегают метасоматические андезитовые брекчии с различным соотношением обломков и цемента, который представлен гидротермальными глинистыми минералами, цеолитами и небольшим количеством силикатов и карбонатов. Ниже залегают средне измененные андезиты, разбитые большим количеством трещин, заполненных вторичными минералами. Мощности всех слоев крайне изменчивы, что связано с большой неоднородностью проницаемости пород, слагающих термальное поле. Предположительно, ниже по разрезу должны залегать слабо измененные андезиты, однако такие породы не были вскрыты ни одной из пробуренных на поле скважин.

Вскрытая мощность, см	Тип пород	Колонка	Фото образцов	Описание пород
20-120	Гидротермальные глины			Глины зоны сернокислотного выщелачивания. Охристого цвета, полутвердые, с включениями сульфатов, лимонита, опала и халцедона.
80-170				Серые монтмориллонитовые глины, от тугопластичной до текучепластичной консистенции, с большим количеством пирита и опаловых корочек.
60-295				Серые сухие монтмориллонитовые глины, твердой и полутвердой консистенции, с редкими обломками андезитов.
20-220	Измененные андезиты и метасоматические брекчии			Андезитовые метасоматические брекчии, сцементированные вторичными минералами.
40-530				Измененные андезиты с большим количеством трещин, прожилков, заполненных вторичными минералами.

Рис. 26. Основные составляющие разреза Восточно-Паужетского термального поля

2.1.3. Южно-Камбальное Центральное термальное поле

Южно-Камбальное Центральное термальное поле (рис. 27) расположено в верховьях левого притока ручья Кратерный, впадающего в реку Паужетка в донной части и на склонах кольцевой кратероподобной структуры, являющейся частью постройки в значительной степени разрушенного вулкана Термальный. Поле имеет почти изометричную форму, а размер основного активного участка составляет ~200 м в поперечнике. На Южно-Камбальном Центральном термальном поле имеют широкое распространение разнообразные разгрузки термальных вод и пара: бурлящие грязевые котлы, паровые струи, участки парящего грунта. Большая часть кольцеобразной структуры, в которой развито поле, занята измененными породами различного вида, причем, помимо гидротермальных обнажений значительное глин, встречается количество аргиллизированных И опализированных коренных пород, которые по большей части представлены андезитами. Также на поле вследствие большого содержания сероводорода в паре присутствуют специфические образования – серные бугры.



Рис. 27. Южно-Камбальное Центральное термальное поле

Дополнительной особенностью Южно-Камбального термального поля является высокая контрастность различных параметров (Рычагов и др., 2021). Например, на расстоянии менее 200 м можно обнаружить разгрузки как щелочных (pH ~ 7,5-8,0), так и кислых (pH ~2,8-3,5) вод, чем можно объяснить широкий спектр различных гидротермально измененных пород. Минерализация термальных вод достигает 4 г/л, что также нетипично, так как на ближайших термальных полях района общая минерализация редко превышает 0,8-1,5 г/л. Воды в крупных кипящих котлах и пульсирующих источниках преимущественно гидрокарбонатно-сульфатные, аммониевые, щелочные. Помимо классических для различных термальных полей гидротермальных глин и опалитов на площади поля образуются специфические арагонитовые конкреции, имеющие сложный состав и достигающие размеров в 50-70 см (Рычагов и др. 2021).

Согласно данным Белоусова В.И (1976), площадь термального поля по изотерме 20°С на глубине 1 м равна 12790 м², а по изотерме 50°С на той же глубине – 3360 м², вынос тепла равен 651 ккал/с, а общая тепловая мощность – 902 ккал/с.

На данном термальном поле в процессе полевых работ совместно с сотрудниками института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в период с 2019 по 2022 год были отобраны 17 образцов андезитов различной степени измененности. Большая часть образцов была отобрана от обнажений как в пределах поля, так и за его границами (рис. 28). Дополнительно в процессе бурения на термальном поле с интервала глубин 7,80 - 9,35 м были отобраны 4 образца скальной подложки, на которой залегает глинистый чехол аргилизированных пород. По результатам работ на данном поле был опубликован ряд работ (Нуждаев и др., 2022; Нуждаев и др., 2020; Рычагов и др., 2020)



Рис. 28. Схема отбора образцов на Южно-Камбальном Центральном термальном поле

В образцах измененных андезитов (рис. 29) наблюдаются характерные как для аргиллизации, так и для опализации признаки. Из-за трудности однозначного расположения образцов в ряд по их степени измененности, дополнительно по результатам макро- и микроописания, было произведено разделение образцов на 5 групп (неизмененные, слабо измененные, средне измененные, сильно измененные и полностью измененные). При этом образцы, отнесенные к группе полностью измененных, являются образцами, отобранными из скважины, и, видимо, представляют собой сцементированное карбонатными минералами (содержание кальцита достигает 30%) основание глинистого чехла термального поля, которое из-за цементации карбонатами превратилось в скальный грунт. То есть для построения полного ряда преобразований между группами сильноизмененных и полностью измененных образцов необходимо добавить переходную стадию в виде гидротермальных глин, которые не рассматриваются в данной работе.



Рис. 29. Образцы пород Южно-Камбального Центрального термального поля, расположенные согласно увеличению степени измененности: А-неизмененные; Б-слабо измененные; В-средене измененные; Г-сильно измененные; Д-полностью

изменененные

2.2. Массив Большой Семячик

2.2.1. Геологическое строение района

Впервые Семячинский район аналогично Паужетскому был охарактеризован С.П. Крашенинниковым в 1755 году в его книге «Описание земли Камчатки», а впоследствии изучением данного района занимались Б.И. Пийп (1937), Т.И. Устинова (1955) и другие геологи. Самое масштабное изучение термопроявлений Семячинского района было произведено группой ученых под руководством Е.А. Вакина и В.В. Аверьева в 1965 году (Аверьев, Вакин, 1966). В процессе тех работ были получены сведения о геологическом и геморфологическом строении района, петрографических характеристиках пород, характеристиках поверхностных термопроявлений и ряде других геологических данных.

В геологическом отношении массив Большой Семячик представляет собой сложную вулканическую систему общей площадью более 100 км², состоящую из нескольких десятков стратовулканов и экструзивных куполов (рис. 30, 31), которые отличаются друг от друга по возрасту, строению и составу.



Рис. 30. Структра массива Большой Семячик и вулканы, входящие в него (спутниковый снимок - https://earthexplorer.usgs.gov/)

По представлениям ряда ученых, массив Большой Семячик находится в пределах грабен-синклинали Восточной Камчатки. Массив образовался в пределах крупной

кольцевой депрессии - кальдеры, формирование которой связано с мощной вспышкой кислого вулканизма в плейстоцене (Аверьев и др., 1971), внутри которой в результате более поздней вулканической деятельности возникли вулканические постройки, заполнившие ее продуктами извержений. Подобный «обратный» тип рельефа является весьма характерным для Восточного вулканического пояса Камчатки (Сугробов, 1976). Впервые кальдера была выделена В.И. Володавцом (Влодавец, 1958), а ее предположительные границы соответствуют указанным на рис. 30. Также В.И. Володавец одним из первых описал породы, которые мы называем игнембритами, однако он называл их туфолавами и не связывал их образование с массивными кальдерообразующими извержениями.

Основанием массива. согласно представлениям ряда исследователей (Шанцер и др., 1980), являются осадочные породы мел-палеогенового и олигоценмиоценового возраста, которые вскрываются в пределах Восточного хребта Камчатки, а также комплекс вулканогенно-осадочных отложений, заполняющих Восточно-Камчатский прогиб, однако в районе массива Большой Семячик эти породы не обнажаются. Выше залегают теригенно-вулканогенные отложения щапинской свиты и вулканогенные отложения сторожевской свиты, которые выходят на поверхность в 30 км на запад от массива Большой Семячик (Леонов, Гриб, 2014). Отложения этих свит относятся к плиоцену, что было подтверждено Ar-Ar датированием (Леонов и др., 2008; Bindeman et al., 2010). В строении самого массива исследователи выделяют три стратиграфических комплекса пород: докальдерный, возникший во время кальдерообразования И посткальдерный (рис. 31).

Отложения докальдерного этапа представлены псефитовыми и алевропелитовыми туфами с прослоями внутриформационных игнимбритов гейзерной свиты. Выше залегают пемзы и игнимбриты жупановской свиты, слагающие вулканическое плато вокруг Большого Семячика и образовавшиеся в эпоху кальдерообразования. В основании самого базальты Семячинской свиты, более массива залегают имеющие локальное распространение и тяготеющие к определенным центрам излияния. На описанном основании возвышаются отдельные вулканические постройки, которые можно разделить на древние (доледниковые) и молодые (послеледниковые). Все крупные вулканы, в том числе и вулкан Бурлящий, относятся к доледниковым, его постройка настолько разрушена и изменена, что достоверно расшифровать его строение не представляется возможным. В то же время единственным историческим упоминанием об извержениях вулканов в данном массиве является сообщение С.И. Набоко в январе 1953 г. о появлении мощного столба пара на юго-восточном склоне массива, который был вызван либо небольшим извержением, либо усилением сольфатарной активности (Аверьев, Вакин, 1966).



Рис. 31. Схематическая геологическая карта вулканического массива Большой Семячик (по В.Л. Леонову, Е.Н. Грибу, 2014)

1 — аллювиальные отложения (Q_{IV}); 2 — обвально-осыпные отложения (Q_{IV}); 3 — лавы андезитового, андезибазальтового состава, слагающие экструзивные купола и связанные с ними лавовые потоки (Q_{IV}); 4 — взрывные отложения, связанные с экструзивными куполами (Q_{IV}); 5 — лавы риолитового состава (Q_{IV}); 6 — лавы андезитового, андезидацитового состава, их туфы и туфобрекчии (вулкан Западный Бараний) (Q_{III}-_{IV}); 7 — ледниковые отложения (Q_{III}-_{IV}); 8 — пемзовые пирокластические отложения, связанные с вулканом Проблематичный (Q_{III}); 9 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские верхние") (Q_{II}); 10 - лавы андезитового и андезибазальтового состава, залегающие в толще "узонских" игнимбритов (Q_{II}); 12 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонских" игнимбритов (Q_{II}); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_{II}); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_{II}); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_{II}); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_{II}); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты, связанные с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (Q_I); 13 — игнимбриты и с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (О_I); 13 — игнимбриты и с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (О_I); 13 — игнимбриты и с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (О_I); 13 — игнимбриты и с Узон-Гейзерной депрессией ("узонские нижние") (О_I); 13 — игн

(QII), 12 плимариты, связанные с с зон теперион депресенен (узенекие пляние) (QII), 15 игнимбритоподобные породы (QII); 14 — лавы андезитового состава (QII); 15 — лавы андезитового, андезибазальтового состава, слагающие основание вулкана Западный Бараний (а), лавы базальтового, андезибазальтового состава, слагающие вулканы Бурлящий, Центральный Семячик, Попкова,

Проблематичный (б) (Q_{II}); 16 — песчаники, алевролиты, туфы — озерные отложения, заполняющие кальдеру Большого Семячика (Q_I-_{II}); 17 — игнимбриты, связанные с образованием кальдеры Большого Семячика (Q_I); 18 — лавы и туфы базальтового, андезитового, дацитового состава - докальдерный комплекс (QE); 19 — центры крупных вулканических построек; 20 — хребты горы Зубчатка; 21 — кратеры вулканов; 22 — эрозионные (о) и структурные (б) границы кальдеры Большого Семячика; 23 — сбросы (а), трещины (б); 24 — дайки; 25 — термальные источники и парогазовые струи: а — на карте, б — на разрезе.

Все термопроявления вулканического массива Большой Семячик связываются с единой пародоминирующей гидротермальной системой, сформировавшейся в недрах под вулканическим массивом. В пределах массива выделяют Нижне- и Средне-Семячинские источники, а также термальные поля вулкана Центральный Семячик и термальные поля вулкана Бурлящий (Сугробов и др., 2009).

В данной работе рассматриваются термальные поля на двух вулканических постройках массива Большой Семячик: вулкане Бурлящий и вулкане Центральный Семячик. Вулкан Бурлящий располагается в северной части массива, между вулканами Бараний и Зубчатка, у западного подножия последнего. Постройка вулкана сильно разрушена и представляет собой пологий холм, разделенный на две половины ручьем Фумарольный, текущим в северо-западном направлении. Вулкан Центральный Семячик расположен между вулканами Проблематичный и Зубчатка. Сохранность постройки также весьма низка, что, вероятно, связано с эрозионной деятельностью ледников, которая дополнительно усилена фумарольной деятельностью в центральной части вулкана, а также на его юго-восточном склоне.

2.2.2. Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий

Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий (рис. 32) имеет суммарную длину более 500 м и представляет собой ряд прогретых участков, которые расположены на правом борту ручья Фумарольный. В наиболее активной зоне термального поля, находящейся выше всего на склоне, расположены самые мощные разргузки, представленные паровыми струями, температура которых достигает 137°С, а скорость потока водяного пара и других газов, согласно данным В.В. Аверьева и Е.А. Вакина (1966), достигает 120 м/с. При этом суммарный вынос пара только трех самых мощных паровых струй на Верхнем термальном поле составляет 3 кг пара в секунду, что соответствует примерно 1800 ккал/с тепла (Аверьев, Вакин, 1966).

В строении Верхнего термального поля отчетливо выделяется значительное количество оползневых тел, так как данное термальное поле развито на относительно крутом склоне и рассечено достаточно глубокими эрозионными врезами, по которым дренируется большая часть воды. Большая часть пород, слагающих этот склон, была подвержена гидротермальным преобразованиям, а следовательно, значительно ослаблена. Среди всех типов разгрузок на данном термальном поле преобладают сухие паровые струи. Исключением являются относительно небольшие участки, где в результате оползневой деятельности образуются подпруженные зоны, на которых оказываются развиты бурлящие грязевые котлы.

Для Верхнего термального поля характерны разгрузки кислых сульфатноаммониевых термальных вод в естественном конденсате пара (pH ~ 2,9-5,9). В то же время глубинные термальные воды являются слабощелочными (pH ~ 7-8), а кислыми они становятся лишь в приповерхностной зоне, где часть глубинного сероводорода окисляется до сульфата, что приводит к уменьшению показателя pH, из-за чего в приповерхностных условиях начинает протекать процесс опализации исходных пород (Аверьев, Вакин, 1966).



Рис. 32. Вулкан Бурлящий и Верхнее термальное поле

В процессе полевых работ на данном термальном поле в 2020 году были отобраны 7 образцов различной степени измененности. Отбор производился по небольшому профилю длиной примерно 300 м. Схема расположения точек опробования представлена на рис. 33. Небольшой хребет с вывалами пород пестрой окраски, по которому и отбирались образцы, расположен на южной границе термального поля и находится в непосредственной близости от самого активного участка термального поля, на котором разгружаются самые горячие и мощные паровые струи (под точкой отбора БУ-2/20 на рис. 33). Дополнительно отбор каждого образца сопровождался испытанием обнажения, от которого он отбирался при помощи молотка Шмидта. Отобранные образцы представляют собой ряд изменения от совершенно неизмененного образца до полностью переработанного опалита (рис. 33).

Как и на Южно-Камбальном Центральном, на данном термальном поле местами наблюдаются вывалы кремнистых новообразований, которые порой имеют агатовую полосчато-слоистую текстуру. Особенно большие по объемам вывалы наблюдаются в основании описанного хребтика на южной границе термального поля.



Рис. 33. Схема отбора образцов на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий и ряд образцов, выстроенных по степени измененности

По рис. 33 отчетливо видно, что с увеличением степени измененности исходные породы постепенно осветляются, однако исключительно цвет пород нельзя использовать как однозначный диагностический признак степени измененности андезитов, так как, помимо выщелачивания, приводящего к образованию опала, в процессе гидротермального литогенеза образуются вторичные минералы, которые могут иметь темную окраску (например пирит и марказит) и тем самым «затемнять» и саму породу. Выстроение опалитов в ряд по их степени измененности было достаточно трудной задачей, так как на основании их минерального состава уже сложно произвести дифференциацию. Поэтому основой такого разделения было строение опалитов, а точнее, степень сохранности псевдоморфной структуры опала по исходной структуре андезита. Под микроскопом достаточно отчетливо удается различить опалиты с преобладающей псевдоморфной структурой (практически полностью повторяющей облик исходного андезита, но с замещенным минеральным составом) и с так называемой колломорфной структурой, возникающей за счет, видимо, неоднократных растворений и переотложений опала, что привело к исчезновению исходных структур андезитов.

2.2.3. Термальное поле Северного кратера Центрального Семячика

Термальное поле Северного кратера Центрального Семячика (рис. 34) располагается, как это следует из названия, в северном кратере весьма сильно разрушенной постройки вулкана Центральный Семячик. Как Северный, так и Южный кратеры вулкана

60

активны в гидротермальном отношении, однако количество и мощность разгрузок в северном кратере значительно выше. Сами кратеры представляют собой огромные эрозионные цирки диаметрами чуть менее 1 км. Наиболее активной частью является западный участок термального поля, что отчетливо заметно по обилию паровых струй в удачную погоду. Термальное поле, очевидно, находится на регрессивной стадии своего развития, так как площади, занятые продуктами гидротермальных преобразований пород (в основном гидротермальными глинами), значительно превышают площади, на которых в данный момент протекает активный гидротермальный процесс.



Рис. 34. Вид на термальное поле Северного кратера Центрального Семячика с вершины Центрального Семячика

Своеобразной «жемчужиной» этого термального поля является озеро Черное, температура которого колеблется в зависимости от точки измерения, но находится примерно на уровне 93-97 °C. Цвет озера контролируется тонкодисперсным пиритом, рассеянным в воде, про который Крашенинников (1755) писал следующим образом: «Сии ключи в том от всех других отменны, что по поверхности их плавает черная, китайским чернилам подобная материя, которая с великим трудом от рук отмывается. Впрочем находится там и свойственная всем горячим ключам разноцветная глина, також известь,

квасцы и горючая сера. Во всех вышеописанных ключах вода густа, и протухлыми яйцами пахнет» (Крашенинников, 1755, с. 185).

Большая часть гидротермально-измененных пород окрашена в охристо-желтые цвета, однако на самом активном участке поля, где разгружаются особо кислые источники, породы значительно светлее и порой имеют идеально белый цвет, представляя собой эталонные образцы опалитов.

Аналогично Верхнему полю вулкана Бурлящий термальное поле Северного кратера Центрального Семячика характеризуется разгрузкой сильнокислых термальных вод, при том что глубинные растворы являются слабощелочными. Из-за высоких содержаний H₂S в поднимающемся флюиде pH в отдельных кипящих котлах достигает экстремальных значений (1,4).

В процессе полевых работ в 2020 году совместно с сотрудниками института вулканологи и сейсмологии ДВО РАН на данном термальном поле автором были отобраны 7 образцов андезитов различной степени гидротермальной преобразованности. Схема опробования и фотографии самих образцов, подготовленных к испытаниям, выстроенных слева направо в соответствии с увеличением степени их опализированности, представлены на рис. 35.



Рис. 35. Схема отбора образцов на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика и образцы, выстроенные слева направо по увеличению степени измененности

Отраженная на рис. 35 часть поля как раз является наиболее активным участком, на котором начинает преобладать белый цвет измененных пород, а на местах выхода паровых струй наблюдаются значительные наросты кристаллов серы.

Неизмененные образцы андезитов (ЦС-1/20 и ЦС-2/20) были отобраны выше по склону, где отсутствуют следы гидротермальных преобразований. Образец ЦС-8/20 был отобран в центральной части поля (левее сфотографированной области) из активной паровой струи. Остальные образцы отбирались от обнажений на прогретой части поля. Параллельно отбору образцов производились испытания обнажений при помощи молотка Шмидта (по 20 ударов в различные точки с расстоянием между точками не менее 5 см).

Выделение ряда измененности (рис. 35) для данного термального поля, как и для Верхнего поля вулкана Бурлящий, было также не слишком простой задачей. Однако автор руководствовался теми же принципами, которые были описаны ранее, и основной характеристикой для выделения ряда измененности среди опалитов была стпень сохранности псевдоморных структур по исходным породам. Как будет показано далее, данная методика оправдала себя, так как по результатам анализа химического состава пород при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta M ряд, выделенный по микроописанию шлифов, практически совпал с рядом, выделенным по процентному содержанию кремния в изучаемых породах.

В процессе маршрута по верхней кромке циркообразной структуры Центрального Семячика были отобраны 4 образца неизмененных вулканогенных пород. Для них также был проведен полный комплекс исследований, результаты которых позволили сделать вывод о том, что среди эффузивного комплекса пород на Центральном Семячике встречаются породы как среднего, так и основного составов. Однако наибольшее сходство с породами, подвергающимися гидротермальным преобразованиям, показывают образцы, непосредственно отобранные вблизи термального поля (ЦС-1/20 и ЦС-2/20).

Выводы к главе 2:

- Исследуемые термальные поля расположены в пределах крупных вулканических районов Камчатки со сложным строением, представляющих собой кальдеры с множеством посткальдерных вулканических построек.
- В локальном плане исследуемые термальные поля расположены на четвертичных вулканических постройках, которые в местах выхода термальных флюидов на поверхность сложены преимущественно массивными вулканогенными породами основного и среднего составов (андезитами и андезибазальтами).
- Термальные поля, изучаемые в рамках данной работы, находятся на регрессивных стадиях развития, на что указывают относительно малые площади, занятые современными разгрузками, в сравнении с большими площадями, занятыми гидротермально измененными породами и массивными глинистыми чехлами.

- 4. На Восточно-Паужетском термальном поле разгружаются преимущественно слабощелочные и субнейтральные термальные воды, в результате чего слагающие его основание андезиты подвергаются активной аргиллизации, а строение поля в разрезе в общих чертах можно описать как трехслойное: нижним горизонтом являются измененные андезиты различной степени преобразованности, выше по разрезу залегают метасоматические брекчии, переходящие в горизонт гидротермлаьных глин, строение которого неоднородно и может быть разделено на отдельные слои.
- 5. На Южно-Камбальном Центральном термальном поле разгружаются термальные воды, гидрогеохимические параметры которых обладают высокой контрастностью. В частности, водородный показатель (pH) в различных разгрузках изменяется в пределах от 8,0 до 2,8, что приводит к значительному разнообразию образующихся на данном термальном поле гидротермально-метасоматических пород, среди которых встречаются как аргиллизированные, так и опализированные разности, а также из-за специфических условий на данном термальном поле образуются специфические карбонатизированные аргиллизиты.
- 6. На Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий и термальном поле Северного кратера Центрального Семячика вследствие разгрузки сильнокислых и ультракислых термальных вод (pH которых достигает 1,4) происходит активная опализация исходных массивных андезибазальтов, в результате чего они превращаются в высокопористые, состоящие в основном из аморфного кремнезема породы.

Глава 3. Методика исследований

При некотором обобщении методику данной работы можно разделить на 4 глобальных этапа: предварительные исследования, полевые работы, лабораторные работы и обработка результатов. На этапе предварительных исследований главным образом производился аналитический обзор литературы на тему гидротермальных преобразований пород на термальных полях с разными гидрогеохимическими условиями, в результате чего для исследований были выбраны 4 термальные поля. Выбранные термальные поля, с одной стороны, слагаются схожими исходными вулканогенными породами, а с другой стороны, характеризуются различными гидрогеохимическими условиями, что делает эти объекты оптимальными для непосредственного изучения самих процессов аргиллизации и опализации. Далее на этапе полевых исследований непосредственно на термальных полях производились маршрутные исследования, отбор образцов скальных грунтов различной степени преобразованности, измерение гидрогеохимических параметров разгружающихся термальных вод, а также на всех полях, кроме Восточно-Паужетского, – испытание обнажений при помощи молотка Шмидта. После доставки отобранных образцов в МГУ имени М.В. Ломоносова начинался этап лабораторных исследований, который включал в себя подготовку проб правильной геометрической формы, а также шлифов и порошков для дальнейших исследований, определение показателей физических и физико-механических свойств, изучение строения при помощи оптической и электронной микроскопии, а также компьютерной томографии, изучение химического и минералогического составов методами рентгеновской дифрактометрии и РФ спектрометрии. Завершающим этапом методики была обработка результатов, их сравнительный анализ и обобщение.

В процессе выполнения данной работы были изучены 104 образца андезитов и андезибазальтов различной степени изменённости, из которых были подготовлены 368 проб правильной формы. Образцы были отобраны из обнажений молотком или при помощи портативной буровой установки на основе шуруповерта (рис. 36), а также из керна скважин и доставлены в Москву, где хранились при комнатных условиях. Образцы были отобраны в ходе научных экспедиций в различных районах Камчатки в 2017-2022 г.г. сотрудниками и студентами кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (при участии автора), совместно с сотрудниками лабораторий геотермии и минералогии института Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.



Рис. 36. Портативная буровая установка на базе шуруповерта и точки отбора на обнажении ЦС-3/20

Для проведения лабораторных испытаний из всех отобранных образцов скальных грунтов на лабораторных буровом и отрезном станках были приготовлены пробы правильной геометрической формы В виде цилиндров или прямоугольных параллеленипедов. Согласно нормативам, установленным в ГОСТ 21153.2-84, отношение высоты к диаметру должно находиться в пределах от 0,7 до 2. Все плоские поверхности проб были обработаны на шлифовальном станке. Все работы по подготовке проб производились с использованием воды. Однако в связи с возможностью разрушения в процессе пробоподготовки было принято решение испытывать часть образцов в виде исходного керна с отшлифованными боковыми поверхностями. Такой способ испытания дает возможность более точно определить свойства исследованных грунтов, так как в образце большего размера меньшую роль играет масштабный эффект и меньше нарушается

структура грунтов из-за отсутствия стадии выбуривания цилиндрических образцов меньшего размера.

В процессе выполнения работы из каждого образца грунта готовилась серия проб, включающая в себя:

- Несколько проб цилиндрической формы (до 18). Необходимым количеством цилиндров было четыре (два для испытаний на одноосное сжатие и два для испытаний на одноосное растяжение), однако из некоторых образцов не удалось получить такого количества цилиндров в связи с недостаточно большими размерами образцов и их высокой трещиноватостью (некоторые образцы после выбуривания разваливались).
- 2. Кусочек породы для изготовления шлифа с наиболее характерным строением и по возможности наличием отличающих его элементов.
- Порошок (~50 г) для определения плотности твердых частиц, гигроскопической влажности и минерального состава.
- 4. Эталонный образец, который должен четко отражать структурно-текстурные особенности образца и храниться в коллекции.

В процессе выполнения работы были определены (измерены или рассчитаны) следующие показатели физических и физико-механических свойств исследуемых андезитов:

- 1. Плотность воздушно-сухого грунта (ρ).
- 2. Плотность водонасыщенного грунта (рвод).
- 3. Плотность твердых частиц (р_s) (прибор В.Я. Калачева ПЭЛа)
- 4. Гигроскопическая влажность (Wg).
- 5. Пористость (n).
- 6. Водопоглащение (W_п).
- 7. Открытая пористость (n_o).
- 8. Магнитная восприимчивость (χ).
- 9. Скорость продольных волн по оси цилиндров в воздушно-сухом состоянии грунта (V_p) (метод ультразвукового просвечивания, прибор "Ультразвук").
- Скорость поперечных волн по оси цилиндра в воздушно-сухом состоянии грунта (V_s).
- 11. Коэффициент Пуассона по оси цилиндра (µ дин).
- 12. Динамический модуль упругости по оси цилиндра (Е дин).
- 13. Скорость продольных волн по оси цилиндров в водонасыщенном состоянии грунта (V_{p в}).

- 14. Скорость продольных волн по оси цилиндров в водонасыщенном состоянии грунта (V_{s в}).
- 15. Прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии (Rc) (Пресс ZDM 10t и ИП-1А-1000).
- 16. Прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии (R_{с в}).
- 17. Коэффициент размягчаемости (Кр).
- 18. Прочность на одноосное растяжение в воздушно-сухом состоянии (R_p).
- 19. Прочность на одноосное растяжение в водонасыщенном состоянии (R_p _B).

Все измерения проводились в лабораториях кафедры инженерной и экологической геологического факультета МГУ по стандартным методикам (Фролова, 2015).

Также, как указывалось ранее, на всех опробованных обнажениях всех термальных полей, кроме Восточно-Паужетского (так как на нем отбор происходил из скважин), были произведены определения высоты упругого отскока при помощи молотка Шмидта (рис. 37) RGK SK-60 (тип N). В Российской Федерации данный метод стандартизован лишь для определения прочности бетонов, однако в ряде зарубежных стандартов (ISRM, ASTM) его применение регламентировано и для горных пород. Существует целый ряд различных методик применения молотка Шмидта. Согласно некоторым из них, следует производить удары в одну и ту же точку на обнажении, но, согласно большинству методик, каждый новый удар следует производить в новой точке, находящейся на расстоянии не менее 5 см друг от друга, при этом количество ударов и методика вычесления итогового значения разнятся. В данной работе на каждом обнажении производились по 20 ударов в различные точки с расстоянием между точками не менее 5 см. А в качестве итогового значения принималось среднее арифметическое от всех 20 произведенных ударов. Стоит отметить, что на отдельных образцах ввиду их неоднородности отчетливо выделялись области с закономерно повышенными и пониженными значениями упругого отскока. Расстояние между такими областями могло не превышать 3-5 см. В частности, подобная картина наблюдалась на образце БУ-6/20, рассченном рядом трещин, заполненных прочными вторичными минералами. Для подобных образцов фиксировались все полученные значения, однако для итоговых построений брались величны упругого отскока, полученные на основной массе породы.



Рис. 37. Молоток Шмидта на обнажении на термальном поле Центрального Семячика

Для получения дополнительного понимания деталей процесса опализации в лабораторных условиях при содействии сотрудников кафедры геохимии и гидрогеологии геологического факультета МГУ был произведен ряд экспериментов по «кипячению» образцов неизмененных андезитов с Южно-Камбального Центрального термального поля в 10% растворе серной кислоты при различной температуре и различной длительности взаимодействия. Для проведения такого эксперимента были подготовлены 20 цилиндров неизмененных андезибазальтов диаметром 1,5 см, на 16 из которых было произведено воздействие серной кислоты. В процессе эксперимента образец загружался в специальный герметичный гидротермальный пенал (рис. 38), в который заливалась кислота в объеме, пятикратно превышающем объем цилиндра. Затем эти реакторы помещались в шкафтермостат при температурах 20, 50, 100 и 170 °С на сроки в 1, 3, 7 и 14 дней. Таким образом были получены 16 цилиндров различной степени опализированности и 4 цилиндра неизмененных андезибазальтов. Для всех подготовленных проб до начала эксперимента и по завершении были произведены измерения всех стандартных возможных показателей свойств, а также произведено томографическое исследование каждого образца до и после «кипячения».



Рис. 38. Гидротермальные реакторы в шкафу-термостате и принципиальная схема экспериментальной установки

Одновременно с изучением физических и физико-механических свойств пород были изучены петрографические особенности пород. Состав и строение пород изучались микроскопическим методом с использованием оптического поляризационного микроскопа Olympus BX41. С помощью этого метода были определены структура, текстура, основные породообразующие, акцессорные и вторичные минералы, характер вторичных изменений и характер трещиноватости. Все шлифы и их характерные особенности были сфотографированы с помощью цифровой камеры OLYMPUS SP-500UZ.

Также производился анализ состава и строения изучаемых образцов при помощи методов растровой электронной микроскопии на микроскопе LEO 1450VP с микроанализатором INCA 300, который применялся для изучения элементного состава образцов (работы выполнены к.г.-м.н. Черновым М.С.). А также при помощи микроскопа JSM-6460LV в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии геологического факультета МГУ.

Для более детального изучения минерального состава использовался метод рентгеновской дифрактометрии. Работы выполнены с использованием рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета им. М.В. Ломоносова. (Работы выполнены вед. инж. С.А. Гараниной, ст.н.с., к.г.-м.н. В.В. Крупской). Проведен количественный минеральный анализ 18 образцов. Для изучения строения образцов в объеме применялся метод томографии с помощью томографа Yamato TDM1000H-II (работы выполнены инженером Ермолинским А.Б.). Суммарно выполнены 46 съемок образцов. Этот метод показал особенную эффективность в экспериментах по получению гидротермально измененных пород в лабораторных условиях путем их «кипячения» в растворе серной кислоты, так как была возможность зафиксировать строение объема образца до и после «кипячения».

При помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta M (рис. 39), предоставленного для проведения анализов институтом физики Земли РАН, был изучен химический состав всех рассматриваемых образцов. Анализ производился на торцевых поверхностях подготовленных цилиндров или на гранях прямоугольных параллеленипедов. При помощи данного прибора был произведён анализ содержания всех элементов с атомной массой более 24 (элементов тяжелее натрия), за исключением инертных газов. Все элементы легче магния при анализе объединяются в группу «легких элементов», и их содержание определяется в сумме без возможности дифференциации. Для каждого образца производилось по 3 или более замера на различных плоскостях (различных цилиндрах) и рассчитывался средний состав по результатам этих изменений.



Рис. 39. Рентгенофлуоресцентный спектрометр Olympus Vanta M, установленный в раму для анализов в лабораторных условиях

Для проверки данных, полученных при помощи этого прибора, был проведен ряд дополнительных анализов, позволивших получить состав тех же самых пород, однако уже на порошковых пробах на приборе «Спектроскан MAKC-GV». Данные, полученные двумя различными методами, показали достаточно хорошую сходимость, из-за чего результаты, полученные при помощи портативного спектрометра «Olympus Vanta M», рассматриваются как достоверные.

Выводы к главе 3:

- Основой методики данного исследования является историко-геологических подход, согласно которому инженерно-геологические особенности горных пород определяются их генезисом, характером постгенетических преобразований и текущим пространственным положением.
- 2. В процессе полевых исследований были отобраны 104 образца, из которых были подготовлены 368 проб правильной геометрической формы, что позволило получить большое количество данных (более 3000 значений показателей физических и физикомеханических свойств) об изменении состава и свойств пород в процессе гидротермальных преобразований.
- 3. В данной работе использованы стандартные методики подготовки образцов и определения их состава и свойств в лабораторных условиях.
- На ряде образцов андезибазальтов были проведены эксперименты в герметичных гидротермальных пеналах по выяснению результатов их взаимодействия с концентрированным раствором H₂SO₄.
- 5. В качестве экспресс-методов оценки свойств гидротермально измененных пород на термальных полях в данной работе использованы молоток Шмидта и портативный рентгенфлуорисцентный спектрометр.
Глава 4. Закономерности изменения состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой среднекислых до слабощелочных термальных вод

4.1 Изменение состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой среднекислых до слабощелочных термальных вод 4.1.1. Изменение состава, строения и свойств пород на Восточно-Паужетском термальном поле

Андезиты, слагающие основание Восточно-Паужетского термального поля, в значительной степени аргиллизированы. Для получения детальной информации об особенностях протекания процесса аргиллизации на термальном поле был пробурен ряд скважин, 6 из которых значительно затронули скальное основание, залегающее под глинистым чехлом. 5 скважин были пройдены в области распространения андезитов, а одна скважина (наиболее восточная) вскрыла залегающую непосредственно под глинистым чехлом толщу туфов с большим количеством обломков разнородных вулканогенных пород (Большаков и др., 2023а). Все отобранные образцы андезитов (с учетом отобранных на небольшом удалении от поля образцов) были разделены на 4 группы по степени их аргиллизированности: неизмененные, слабо измененные, средне измененные И метасоматические брекчии. При этом, так как данные образцы подвержены процессу аргиллизации, в названиях групп для образцов с этого термлаьного поля термин является синонимом термину «аргиллизированные». Разделение «измененные» производилось по результатам макро- и микроописания, а также на основании данных рентгеновской дифрактометрии.

<u>Неизмененные (исходные) андезиты</u> были отобраны для получения наиболее полной картины последовательного изменения андезитов под действием аргиллизации. Приблизительно в 50 м от термального поля был отобран образец, который можно считать неизмененным (рис. 40). Данный образец имеет темно-серый цвет, порфировую структуру и массивную текстуру (рис. 40А).



Рис. 40. Неизмененный андезит А – макрофотография, Б – общий вид в шлифе при скрещенных николях (Pl – плагиоклаз, KFs – калиевый полевой шпат, CPx – клинопироксен)

Среди минералов-вкрапленников преобладают плагиоклазы (рис. 40Б), размер зерен которых достигает 1,5 мм. Также присутствуют пироксены и калиевый полевой шпат, каждый из которых занимает около 20% от общего объема вкрапленников. Основная масса породы интерсертально-гиалопилитовая и представлена микролитами вышеперечисленных минералов и вулканическим стеклом. Следы вторичных изменений практически отсутствуют.

Для неизмененных андезитов характерны стандартные значения плотности (2,71 г/см³), невысокая пористость (2,6 %), высокий динамический модуль упругости (62,7 ГПа), высокая прочность на одноосное сжатие (142,3 МПа) и на разрыв (21,4 МПа). Дополнительно следует отметить, что все изученные показатели демонстрировали небольшой разброс значений, что можно объяснить высокой однородностью отобранного образца.

<u>Слабо измененные андезиты</u>, рассматриваемые в данной работе, представлены двумя образцами: образцом «пропаренного» андезита из активной паровой струи (рис. 41) и образцом андезита из скважины 102, пробуренной недалеко от Восточно-Паужетского термального поля на склоне Камбального хребта в XX веке.



Рис. 41. Слабо измененный андезит

А – макрофотография, Б – общий вид в шлифе при скрещенных николях
 (Pl – плагиоклаз, KFs – калиевый полевой шпат, CPx – клинопироксен)

В окрасе андезитов этой группы появляется буроватый оттенок, порфировая структура сохраняется, однако макроскопически заметны изменения, затрагивающие минералы-вкрапленники. В порах и трещинах наблюдаются вторичные минералы, в связи с чем текстуру можно охарактеризовать как миндалекаменную (рис. 41А). Основным минералом-вкрапленником является плагиоклаз, который занимает приблизительно 70-75% от общего объема вкрапленников, в то время как пироксены и полевые шпаты занимают оставшуюся четвертую часть кристаллической части породы. Важно отметить,

что непосредственно в основании Восточно-Паужетского поля андезиты, измененные подобным образом, могут отсутствовать ввиду ограниченной мощности лавового потока, перекрывающего туфы паужетской свиты и общего значительного уровня гидротермальной преобразованности разреза термального поля. Вместе с тем можно смело утверждать, что в ходе эволюции термального поля на начальных стадиях его развития андезиты проходили через определённый этап, на котором степень их измененности была именно такой, а поэтому изучение этой группы пород необходимо для более глубокого понимания ранних этапов протекания процесса аргиллизации (Большаков и др., 2023а).

<u>Средне измененные андезиты</u> (рис. 42) залегают в основании разреза термального поля, изученного при помощи скважин на глубину до 10 метров. При этом глубина кровли от поверхности в случае толщи средне измененных андезитов колеблется в пределах от 4 м до 7,5 м.



Рис. 42. Средне измененный андезит А – макрофотография, Б – общий вид в шлифе при скрещенных николях (Pl – плагиоклаз, KFs – калиевый полевой шпат, CPx – клинопироксен)

Средне измененные андезиты имеют буро-серый цвет, порфировую структуру и миндалекаменную текстуру, сильно трещиноваты. Макротрещины шириной до 10-15 мм выполнены в основном минералами кремнезема, оксидами железа, карбонатами, цеолитами и пиритом. Микротрещины прослеживаются за счет окрашивания гидрооксидами железа. Толща средне измененных андезитов включает линзы и жеоды, выполненные кварцем, опалом, карбонатами и цеолитами. Зоны, вскрытые скважинами, состоящие полностью из вторичных минералов (фрагменты андезитов отсутствуют), достигают мощности в 15-20 см. Состав сложный и включает перечисленные выше вторичные минералы, а также оксиды железа; на стенках каверн образуются крупные кристаллы пирита; зеленая окраска фрагментов обусловлена развитием вероятно, хлорит-смектитов смектитов И, (Большаков и др., 2023а).

Вторичные изменения в андезитах данной группы активно развиваются по зернам минералов-вкрапленников. Основная масса и трещины во вкрапленниках чаще всего замещаются на глинистые минералы и минералы группы цеолитов. В крупных трещинах заметно развитие множества других минералов, например кальцита, кварца, гипса, опала и др. (рис. 42А).

<u>Метасоматические брекчии (сильно измененные андезиты)</u> представляют собой переходную толщу между средне измененными андезитами и гидротермальными глинами. Эти специфические образования возникают выше по разрезу, где степень трещиноватости андезитов значительно возрастает, и они распадаются на обломки, превращаясь в метасоматические брекчии. Фрагменты андезитов имеют размер от 2 мм до 3 см и более. Форма преимущественно изометричная, со сглаженными краями, хотя зачастую встречаются и вытянутые фрагменты (рис. 43). Обломки весьма сильно изменены, причем степень аргиллизированности значительно меняется внутри отдельных обломков, увеличиваясь от центральной части к периферии. Обломки скреплены полиминеральным цементом, который представлен целым рядом вторичных минералов: смектитов, хлоритов, кварца, опала, кальцита, цеолитов, сульфидов (табл. 2).



Рис. 43. Метасоматическая брекчия А – макрофотография, Б – общий вид в шлифе при скрещенных николях; пунктиром обозначены границы обломок - цемент (Pl – плагиоклаз, KFs – калиевый полевой шпат, CPx – клинопироксен)

Основной точкой зрения на вопрос образования метасоматических брекчий является гипотеза, согласно которой они образуются путем переработки и замещения исходных андезитов вторичными минералами, сопровождающегося их растрескиванием, постепенным разрастанием трещин, вплоть до распада исходной породы на отдельные обломки, которые скрепляются новообразованным метасоматическим цементом в результате действия фрагментарного метасоматоза (Царев, 1984). Стоит отметить, что мощность метасоматических брекчий значительно изменяется в различных частях поля и, соответственно, в скважинах, варьируя от 20-40 см до первых метров. При этом брекчии могут встречаться в разрезе в виде линз в толще средне измененных андезитов, вероятно, из-за того, что основным фактором, определяющим степень переработки участка массива, является доступность этого участка для агрессивного флюида, из-за чего можно предположить, что вблизи крупных трещин, расположение которых в массиве может быть весьма хаотичным, степень преобразованности будет значительно выше.

Таблица 2

	Содержание минералов, %												
)PI	т)	ИT,	1H-			Цеолиты							
Состав проб	Плагиоклазы (альбит-анорти	Пироксены (авгі ферросилит)	КПШ (микрокли ортоклаз)	KBapu	Калыцит	Клиноптилолит, гейландит	Стильбит	Гипс	тифиП	Гематит	типпИ	Смектит	Каолинит
Цемент метасоматической брекчии	3,1	7,0	12,5	10,8	5,7	6,6	16,6	0,8	2,0	0,4	0,4	31,5	3,1
Метасоматическая брекчия	11,9	4,7	12,5	16,5	3,7	10,7	4,3	0,7	0,2	0,9	1,2	29,5	2,7
Средне измененный андезит	24,4	5,9	13,3	13,5	2,2	4,4	1,0	0,5	0,1	1,4	1,3	28,0	4,0
Вторичные минералы из трещин средне измененного андезита	0,7	0,5	0,9	1,2	42,1	1,6	31,3	0,5	7,9	0	0,5	12,3	0,8

Минеральный состав измененных андезитов и продуктов их гидротермальной переработки (по данным рентгеновской дифрактометрии)

По результатам рентгеновской дифрактометрии и анализу микростроения в шлифах выявлена принципиальная последовательность гидротермальных преобразований андезитов. Вторичные изменения сначала затрагивают вулканическое стекло, постепенно полностью преобразовывая его (Большаков и др., 2023а). Далее происходит замещение наиболее неустойчивых минералов, которое начинается по периферии кристаллов, а также по трещинам, разбивающим минералы-вкрапленники. В средне изменённых андезитах практически все плагиоклазы и пироксены частично, а некоторые и полностью, замещены вторичными минералами (рис. 42). В конечном итоге андезиты распадаются на фрагменты и превращаются в метасоматические брекчии с полиминеральным цементом, в составе которого преобладают глинистые минералы, цеолиты, кварц и кальцит (рис. 43).

Изменения в составе и строении андезитов в ходе гидротермальной переработки закономерным образом вызывают изменение их свойств. Осредненные значения показателей состава, физических и физико-механических свойств андезитов приведены в таблице 3. Показатели физических и физико-механических свойств андезитов различной степени

ень Эния	ectbo 6	вин	ρ	ρs	n	\mathbf{W}_{π}	no	Vp	Vs	µ дин	Е дин	Rc	Rp	χ
Степо измено Количо	Значе	г/см ³	г/см ³	%	%	%	км/с	км/с	д.е.	ГПа	МПа	МΠа	СИ* 10 ⁻³	
Ные		Среднее	2,71	2,78	2,6	0,3	0,9	5,6	3,0	0,30	62,7	142,3	21,4	31,1
ленен	9	Мин.	2,68		1,5	0,3	0,8	5,3	2,7	0,24	51,2	129,7	20,3	30,0
Неизм		- Макс.	- 2,74	2,78	- 3,5	-0,4	- 1,0	- 6,1	3,2	- 0,34	- 69,6	- 154,4	- 22,4	- 32,3
) Hble		Среднее	2,62	2,79	6,0	1,0	2,7	4,1	2,0	0,34	30,3	114,2	8,5	26,3
Слабс снен	10	Мин.	2,55	2 70	2,7	0,9	2,4	2,8	1,4	0,25	15,1	87,0	5,3	19,9
МЕН ИЗМ		- Макс.	2,70	2,79	8,5	1,2	3,1	5,5	2,7	- 0,39	- 52,9	- 155,0	12,6	42,3
e Ible		Среднее	2,48	2,81	11,4	1,3	2,5	3,9	2,1	0,31	28,0	42,53	4,73	25,8
редно ененн	34	Мин.	2,31	2,61	3,8	0,6	1,0	2,5	1,4	0,21	12,5	19,7	2,1	12,6
С ИЗМ		- Макс.	- 2,71	- 2,99	- 22,8	- 2,9	- 3,7	- 4,9	- 2,6	- 0,39	- 46,5	- 69,8	- 11,4	- 38,8
ские		Среднее	2,28	2,80	18,1	4,2	9,3	3,0	1,6	0,27	17,0	20,65	2,72	18,8
оматиче рекчии	28	Мин.	1,75	2,57	8,2	2,5	5,3	1,2	0,8	0,13	3,1	2,3	0,7	2,3
Meraco		Макс.	- 2,47	2,98	32,3	5,7	12,2	4,4	2,4	0,38	35,4	50,3	4,0	31,6

измененности

Большая часть исследованных параметров закономерно изменяется при увеличении степени гидротермальной преобразованности пород. Вместе с изменением средних значений параметров при увеличении степени преобразованности увеличивается и разброс значений, что можно объяснить увеличением как количества исследованных проб, так и неоднородности пород, а значит, влиянию масштабного эффекта на показатели свойств отдельных цилиндров. Так, плотность андезитов уменьшается с 2,71 г/см³ у неизмененных образцов до 2,28 г/см³ у метасоматических брекчий, а отдельные значения у образцов с наименьшим соотношением объема обломков к цементу достигают величины 1,75 г/см³ (рис. 44). Такое значительное падение плотности связано как с меньшей плотностью вторичных минералов, так и с одновременно увеличивающейся пористостью.



Рис. 44. Изменение плотности андезитов Восточно-Паужетского термального поля

Несмотря на достаточно однозначное снижение плотности у образцов различных групп, тенденция изменения плотности пород с глубиной для пяти рассматриваемых в данной работе скважин не является настолько ясной (рис. 45). Из рис. 45 отчетливо видно, что изменение плотности по глубине вовсе не линейно, а обладает значительным разбросом значений.



Рис. 45. Изменение плотности пород в зависимости от глубины в различных скважинах Восточно-Паужетского термального поля

Это, вероятно, связано с тем, что степень измененности пород по разрезу достаточно отчетливо изменяется, на что в свою очередь значительное влияние может оказывать проницаемость толщи, а сеть трещин, по которым может циркулировать термальная вода и пар, крайне неоднородна. Однако из данного рисунка видно, что с увеличением глубины (примерно с 6 м) разброс в значениях плотностей снижается, что, вероятно, связано с большей однородностью массива.

Плотность водонасыщенного грунта была определена для всех групп исследованных образцов после их недельного водонасыщения, несмотря на то, что некоторые образцы метасоматических брекчий в процессе водонасыщения полностью теряли связность и разрушались (рис. 46).



Рис. 46. Образец ВПП-2/18-14, рассыпавшийся после недельного водонасыщения

Однако неразрушившихся образцов оказалось достаточно для того, чтобы получить надежные данные о плотности водонасыщенных образцов каждой из групп. В целом динамика изменения носит схожий характер с изменением плотности исследуемых грунтов в воздушно-сухом состоянии. Плотности закономерно снижаются с увеличением измененности, а разброс значений, наоборот, увеличивается.

Плотности твердых частиц у всех четырех групп образцов практически не отличаются. Так, наименьшее значение (2,77 г/см³) этого показателя демонстрируют метасоматические брекчии, а наибольшее – средне изменённые андезиты (2,80 г/см³), однако из-за увеличенного количества образцов в группах метасоматических брекчий и средне измененных андезитов наблюдается и значительный разброс этого параметра

(от 2,57 г/см³ до 2,98 г/см³ и от 2,61 г/см³ до 2,99 г/см³, соответственно). Такую картину можно объяснить двоякостью процесса гидротермального изменения: с одной стороны, первичные минералы и вулканическое стекло, обладающие большей плотностью, заменяются на менее плотные глинистые минералы и минералы группы цеолитов, а с другой стороны, одновременно с этим происходит кристаллизация достаточно тяжелых минералов, например пирита и гематита (Большаков и др., 2023а).

Пористость андезитов значительно увеличивается в процессе гидротермальных преобразований (рис. 47). Для неизмененных образцовы андезитов средняя величина пористости – 2,6%, слабо измененных андезитов– 6,0%, средне измененных – 11,4%, а метасоматические брекчии обладают средней пористостью 18,1%. Такое изменение пористости связано с постепенным выщелачиванием термальными водами изначальных андезитов.



Рис. 47. Изменение пористости андезитов Восточно-Паужетского термального поля

Подобное увеличение пористости отчетливо демонстрирует, что в процессе гидротермальной аргиллизации пород преобладает именно процесс выщелачивания. А из результатов анализа полученных данных, как будет показано далее, следует вывод, что именно пористость оказывает определяющее влияние как на деформационные, так и на прочностные свойства андезитов. Тенденция изменения пористости пород с глубиной для каждой из скважин носит схожий характер с аналогичной тенденцией, рассмотренной для плотности. В верхней части разреза наблюдается максимальная изменчивость величины пористости, которая снижается с глубиной (рис. 48) Вероятно, это также связано с гораздо большей неоднородностью массива в отношении проницаемости в верхней его части.



Рис. 48. Изменение пористости пород в зависимости от глубины в различных скважинах Восточно-Паужетского термального поля

Одновременно с пористостью увеличиваются такие взаимосвязанные показатели, как водопоглощение и открытая пористость. У образцов неизмененных андезитов величина водопоглощения крайне мала и равна 0,3%, а открытая пористость – 0,9%, для слабо измененных - 1,0% и – 2,7% соответственно для средне измененных – 1,3% и 2,5%, а образцы метасоматических брекчий в среднем характеризуются величиной водопоглощения 4,2% и открытой пористостью 9,3%. Основной причиной такого роста этих показателей также является процесс выщелачивания исходных андезитов (Большаков и др., 2023а).

Аргиллизация значительным образом оказывает влияние и на упругие свойства андезитов. Так, скорости продольных и поперечных волн равномерно уменьшаются с

увеличением степени преобразованности пород: от Vp=5,6 км/с в неизмененных андезитах до Vp=3,0 км/с в метасоматических брекчиях (рис. 49). Скорость поперечных волн изменяется аналогичным образом, и в среднем Vs меньше соответствующих значений Vp приблизительно в 2 раза.



Рис. 49. Изменение скорости продольных волн в андезитах Восточно-Паужетского термального поля

Основными причинами этих изменений, вероятно, также являются увеличение пористости и изменение минерального состава породы. Однако дополнительное немаловажное влияние оказывает развитие в породах большого количества трещин и других неоднородностей, которые незначительно увеличивают численный показатель пористости, но в то же время выступают серьезным препятствием для упругих волн. Так, на рис. 50 отчетливо отображена зависимость скорости продольных волн от пористости для образцов всех изучаемых групп (Большаков и др., 2023а).



Рис. 50. Зависимость скорости продольных волн от пористости андезитов Восточно-Паужетского термального поля

По результатам измерений скоростей упругих волн стандартным расчетным методом была определена величина динамического модуля упругости, а следовательно, его величина имеет аналогичный тренд на уменьшение с увеличением степени изменения изучаемых грунтов (рис. 51). В образцах неизмененных андезитов его среднее значение равно 62,7 ГПа, в слабо измененных - 30,3 ГПа, в средне изменённых андезитах – 28,0 ГПа, а в образцах метасоматических брекчий – 17,0 ГПа (рис. 51).



термального поля

84

Характер изменения динамического модуля упругости по глубине напоминает аналогичные зависимости для плотности и пористости и также характеризуется большой изменчивостью (рис. 52).



Рис. 52. Изменение динамического модуля упругости пород в зависимости от глубины в различных скважинах Восточно-Паужетского термального поля

Прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии уменьшается приблизительно в 7 раз с увеличением степени изменения (рис. 53). Прочность неизмененных андезитов равна 142,3 МПа, слабо измененных – 114,2 МПа, средне измененных – 42,5 МПа, а для метасоматических брекчий – 20,7 МПа. Вероятно, такой характер изменения прочности вызван значительным увеличением пористости в целом и трещиноватости в частности, так как образующиеся по трещинам минералы имеют гораздо более слабые контакты, чем породообразующие минералы изначальных андезитов. Причем стоит отметить, что наибольший разброс значений достигается у образцов не самой многочисленной группы (слабо измененных андезитов). Возможно, это связано с тем, что прочность в образцах этой группы гораздо больше зависит от масштабного эффекта и определяется наличием или отсутствием в породе крупных неоднородностей, которые оказывают решающий эффект на величину прочности (Большаков и др., 2023а).



термального поля

Следует также отметить, что образцы различных групп характеризуются отличающимися характерами разрушения. Так, образцы неизмененных, слабо измененных и некоторых (с наибольшим соотношением цемента к обломкам) брекчий разрушались либо по серии вертикальных трещин, либо с образованием двух встречных конусов. В то же время образцы средне измененных андезитов в основном разрушались по уже существующей в образце системе трещин, а оставшаяся часть метасоматических брекчий разваливалась на обломки по контактам обломок - цемент (рис. 54)







Рис. 54. Характер разрушения образцов андезитов и метасоматических брекчий Восточно-Паужетского термального поля

а-разрушение метасоматической брекчии с образованием двух конусов; б- разрушение средне измененного андезита по трещинам; в – разрушение метасоматической брекчии по границам обломков

86

Как и для рассмотренных ранее других параметров, для прочности на одноосное сжатие наблюдается тесная корреляция с величиной пористости, причем зависимость имеет экспоненциальный характер. Из рис. 55 отчетливо видно, что прочность андезитов резко падает при увеличении пористости и выходит на некоторое пологое плато со значениями 10-20 МПа. Коэффициент корреляции для такой зависимости составляет 0,81, что указывает на тесную корреляционную связь между параметрами (Большаков и др., 2023а).





Прочность на разрыв в воздушно-сухом состоянии изменяется аналогично прочности на одноосное сжатие в зависимости от степени гидротермальной преобразованности. При этом разрушение проб метасоматических брекчий в основном происходило по контактам обломков, а средне, слабо и неизмененные андезиты разрушались с образованием двух полуцилиндров.

Из-за изменения минерального состава закономерно уменьшается величина магнитной восприимчивости (рис. 56). Неизмененные андезиты характеризуются величиной магнитной восприимчивости, равной 31,1 СИ*10⁻³, слабо измененные – 26,3 СИ*10⁻³, средне измененные – 25,8 СИ*10⁻³, а метасоматические брекчии – 18,8 СИ*10⁻³. Высокие значения магнитной восприимчивости в исходных породах связаны с наличием в их составе минералов, обладающих ферромагнитными (титаномагнетит) и парамагнитными (авгит) свойствами.



Снижение магнитной восприимчивости практически в два раза с увеличением степени изменения породы объясняется замещением первичных, более магнитных минералов на менее магнитные, вторичные (кварц, глинистые минералы, цеолиты и др.). И хотя среди вторичных минералов в большом количестве образуется пирит, он не оказывает существенного влияния на магнитную восприимчивость в сравнении с первичным титаномагнетитом. Зависимость магнитной восприимчивости от глубины в рассматриваемых скважинах является хаотичной (рис. 57) и, как в ранее рассмотренных случаях, лишь свидетельствует о сильнейшей изменчивости всех параметров массива, вероятно, за счет неоднородной проницаемости для агрессивного флюида. Однако все же наблюдается общий тренд повышения значений с увеличением глубины.



Рис. 57. Изменение магнитной восприимчивости пород в зависимости от глубины в различных скважинах Восточно-Паужетского термального поля

В целом магнитная восприимчивость имеет определенную корреляционную связь с величнами плотности (рис. 58), пористости и другими показателями свойств, что позволяет рассматривать ее как косвенный показатель экспресс-оценки степени измененности и свойств аргиллизированных эффузивных пород, так как магнитная восприимчивость даже в полевых условиях определяется очень быстро и не требует использования дорогостоящего оборудования.



Рис. 58. Взаимосвязь магнитной восприимчивости и плотности андезитов

Восточно-Паужетского термального поля

89

Дополнительно, по результатам бурения, последующего макро- и микроописания отобранных образцов, а также по результатам определения показателей свойств был составлен сводный схематический разрез, отражающий принципиальное строение Восточно-Паужетского термального поля с вынесенными показателями плотности, модуля деформации и магнитной восприимчивости (рис. 59). Для выноса на разрез были выбраны именно эти три свойства, так как по ним имеется достаточно большое количество определений, что дает возможность с большей достоверностью соединять точки отдельных определений в единую кривую, а с другой стороны, эти три свойства относятся к различным группам, что делает особенно интересным взгляд на их соотношение.

Одним из самых очевидных выводов, который можно сделать на основании изучения данного разреза, является факт тесной взаимосвязи показателей всех нанесенных свойств. Общие тенденции и закономерности изменения видны, несмотря даже на высокую динамичность самих показателей, которая отчётливо заметна как на самом разрезе, так и на рис. 50, 55, 58. Также из данного разреза видно, что не всегда показатели свойств метасоматических брекчий оказываются меньше показателей, наблюдаемых в этой же скважине у образцов, отнесенных к группе средне измененных андезитов. Основной причиной этого является неоднозначность разделения образцов на группы из-за наличия масштабного эффекта. Так, отдельные образцы метасоматических брекчий можно было однозначно идентифицировать как брекчию, однако конфигурация трещин в образце была такова, что один или два крупных обломка андезита практически полностью определяли итоговые значения показателей свойств. Но тем не менее, как считает автор, полноценно нивелировать влияние масштабного эффекта невозможно, а достоверность разделения на группы подтверждается гистограммами, отражающими изменение средних показателей свойств по группам.



Рис. 59. Схематический разрез Восточно-Паужетского термального поля с вынесенными показателями динамического модуля упругости (Ε, ГПа), магнитной восприимчивости (χ*10⁻³ СИ) и плотности (ρ, г/см³)

4.1.2. Изменение состава, строения и свойств пород на Южно-Камбальном

Центральном термальном поле

Породы, слагающие Южно-Камбальное Центральное термальное поле, ввиду особенностей разгрузок термальных вод, выражающихся в большой контрастности показателей кислотности и минерализации, описанных ранее, подвержены процессам как аргиллизации, так и опализации. Такие особенности гидротермальных преобразований делают процесс расположения образцов в ряду по увеличению степени изменения не самой очевидной задачей. Однако ориентируясь на макро- и микроописание образцов, дополненное данными о химическом составе пород, выделить определенный ряд изменения все же возможно. Таким образом, для упрощения и схематизации процесса гидротермальных преобразований на данном термальном поле все отобранные образцы были отнесены к одной из пяти групп: неизмененные, слабо измененные, средне измененные, сильно измененные, опалиты и карбонатизированные, полностью измененные андезибазальты. При этом, так как основным процессом на данном термального поля термин «измененные» является синонимом термину «аргиллизированные».

Группа неизмененных образцов представлена двумя образцами, отобранными за пределами современных границ термального поля (образцом ЮКЦ-1/21 и ЮКЦ-1/22-1). Образцы имеют темно-серый цвет, порфировую структуру и массивную текстуру (рис. 60).



Рис. 60. Неизмененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-1/22-1 слева, ЮКЦ-1/21 справа)

Вкрапленники представлены плагиоклазами, пироксенами и калиевыми полевыми шпатами. Размеры вкрапленников плагиоклаза варьируются в пределах от 0,5 мм до 2 мм, а их содержание приближается к 30% от общего объема породы (рис. 61). У крупных вкрапленников плагиоклазов достаточно отчетливо заметна неоднородность состава в центральной и периферийных частях. Эта разница состава была подтверждена путем исследования состава вкрапленников при помощи микрозондового анализа. Так, центральные части представлены более основным битовнитом, а периферийные – лабродором. В меньшем количестве представлены пироксены, имеющие размер 0,5 – 1 мм, содержание которых приблизительно равно 5-6%. Интересным является тот факт, что данная порода характеризуется наличием трех пироксенов: пижонита, авгита и бронзита. Также в шлифах изредка встречаются зерна калиевых полевых шпатов. Основная масса породы представляет собой смесь микролитов кислых плагиоклазов и вулканического стекла, занимающего пространство между кристаллами.



Рис. 61. Неизмененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля под микроскопом в скрещенных николях (ЮКЦ-1/22-1 слева, ЮКЦ-1/21 справа) Pl – плагиоклаз

Для неизмененных андезибазальтов характерны стандартные значения плотности (2,68 г/см³), низкая пористость (5,0 %), а также высокие значения прочностных и деформационных свойств (Rc=137,4 МПа, Е_{дин}=52,9 ГПа).

В результате начала воздействия агрессивных термальных вод описанные выше андезибазальты начинают преобразовываться. На Южно-Камбальном Центральном термальном поле были отобраны 4 образца, которые были объединены в группу слабо измененных андезибазальтов. В эту группу были включены образцы ЮКЦ-3/21, ЮКЦ-9/21, ЮКЦ-2.1/21 и ЮКЦ-8/21, из которых в лабораторных условиях была подготовлена 21 проба правильной геометрической формы. Для этой группы характерны светло-серые и коричнево-серые окраски, ее образцы имеют порфировую структуру и массивную текстуру (рис. 62). У образцов этой группы начинают гораздо более явно (на макроуровне) выделяться вкрапленники, видимо подверженные гидротермальным преобразованиям, однако помимо этого факта, а также не слишком значительного изменения цвета, сложно выделить другие признаки произошедших с образцами гидротермальных преобразований.



Рис. 62. Слабо измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-2.1/21 слева сверху, ЮКЦ-3/21 слева снизу, ЮКЦ-8/21 справа)

Под микроскопом гидротермальные изменения заметны в гораздо большей степени (рис. 63). Так, на рис. 63 отчетливо видны поврежденные вкрапленники плагиоклаза, в которых вторичные изменения в основном развиваются по параллельным структурам двойникования кристаллов, а также имеют отчетливо зональный характер. То есть вкрапленники в значительно большей степени подвержены изменениям в центральных частях, которые, как было описано ранее, имеют более основный состав. Во вкрапленниках, которые в большей степени замещаются опалом, местами наглядно наблюдаются трещины, разбивающие данный кристалл и иногда распространяющиеся на небольшое расстояние от вкрапленника в основную массу. Параллельно вторичные изменения, которые выражаются как в аргиллизации, так и опализации, заметны в основной массе. При этом изменения начинаются с вулканического стекла, а микролиты остаются относительно стабильными, что, вероятно, также связно с их более кислым составом. Редкие кристаллы пироксенов в образцах этой группы оказываются практически полностью замещены глинистыми минералами или опалом. Рудные минералы, такие как магнетит и изредка титаномагнетит, практически не подвержены гидротермальным преобразованиям, что объясняет сохранившуюся на достаточно высоком уровне у данных образцов величину магнитной восприимчивости, которая в среднем для группы равна 22,6 СИ*10-3.



Рис. 63. Слабо измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля под микроскопом в скрещенных николях (ЮКЦ-2.1/21 слева, ЮКЦ-3/21 справа); Pl – плагиоклаз

Свойства слабо измененных андезибалазьтов, несмотря на относительную локальность минералогических преобразований, достаточно отчетливо изменяются. Относительно неизмененных образцов плотность снижается на 0,15 г/см³, пористость увеличивается в два раза и достигает 10%, причем увеличивается и соотношение объема открытых пор к общей пористости. Также снижаются скорости упругих волн, динамический модуль упругости (на 20% и 35% соответственно), прочности на одноосное сжатие и на разрыв (на 20% и 45% соответственно).

Следующая стадия преобразования пород на Южно-Камбальном Центральном термальном поле представлена группой средне измененных андезибазальтов (рис. 64). Эта группа включает в себя 5 образцов (ЮКЦ-2.2/21, ЮКЦ-5/21, ЮКЦ-1/22-2-3, ЮКЦ-4/21, ЮКЦ-1/22-2), из которых были подготовлены 28 проб.



Рис. 64. Средне измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-2.2/21 слева сверху, ЮКЦ-4/21 слева снизу, ЮКЦ-5/21 справа сверху, ЮКЦ-1/22-2-3 справа снизу)

Образцы этой группы характеризуются еще более светло-серыми окрасками, сохраняющейся порфировой структурой и массивной текстурой. Порфировые вкрапленники в даных образцах окончательно дифференцируются от основной массы, окрашиваясь в белый цвет за счет значительных изменений в их составе. Пожалуй, самым заметным макроскопическим изменением относительно образцов предыдущей группы является широко развитая трещиноватость, вдоль сети которой в отдельных образцах видна повышенная гидротермальная преобразованность, проявляющаяся в наибольшем осветлении именно этих областей.

В шлифах (рис. 65) образцов этой группы отчетливо видны масштабы минералогических изменений. Сам характер изменений весьма схож с предыдущей описанной группой, однако значительно увеличиваются объемы преобразований. Так, от четверти до половины объема крупных вкрапленников плагиоклаза оказываются замещены на глинистые минералы, и даже в большей степени – опал. При этом отчетливо видны описанные выше трещины, которые зачастую оказываются залечены вторичными минералами группы карбонатов.



Рис. 65. Средне измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля под микроскопом (ЮКЦ-5/21 слева сверху, ЮКЦ-1/22-2 слева снизу, ЮКЦ-4/21 справа сверху, ЮКЦ-1/22-2-3 справа снизу) РІ - плагиоклаз

Свойства средне измененных андезитов продолжают снижаться по крайне схожему с описанным выше тренду изменения, за исключением магнитной восприимчивости. В образцах данной группы магнитная восприимчивость принимает околонулевые значения,

что говорит о практически полном разложении минералов пара- и ферромагнетиков. Данное изменение происходит крайне резко, особенно с учетом того, что остальные породообразующие минералы оказываются преобразованы не столь радикально, в сравнении с предыдущей группой. Таким образом, можно сказать, что момент практически полной потери магнитной восприимчивости является некой реперной точной в процессе гидротермальных преобразований вулканогенных пород

Два отобранных образца были объединены в группу сильноизмененных андезибазальтов. Образцы этой группы из-за своей низкой прочности и большого количества трещин достаточно плохо поддавались выбуриванию, вследствие чего было принято решение подготавливать из них прямоугольные параллелепипеды (рис. 66). Суммарно из двух образцов были подготовлены 16 проб. Образцы этой группы при макроскопическом изучении радикально отличаются от предыдущих за счет приобретения бежевых окрасок и крайне широкого распространения трещин.



Рис. 66. Сильно измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-6/21 сверху, ЮКЦ-7/21 снизу)

При детальном рассмотрении шлифов этих образцов (рис. 67) можно заметить, что образцы оказываются радикально преобразованы, причем в образце ЮКЦ-6/21 еще присутствуют в определенном количестве (10-15% от общего объема породы) остатки неизмененных плагиоклазов, представляющих собой наиболее стабильные периферийные части кристаллов. Остальная же масса породы практически полностью замещена вторичными минералами. В то же время образец ЮКЦ-7/21 можно считать полностью преобразованным, обладающим псевдоморфной структурой и массивной текстурой. Псевдоморфозы по порфировой структуре исходных андезибазальтов неразличимы на макроуровне, однако отчетливо выделяются в шлифах. Так, на рис. 67 они дополнительно дешифрированы белым пунктиром.



Рис. 67. Сильно измененные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля под микроскопом (ЮКЦ-6/21 сверху, ЮКЦ-7/21 снизу; слева н+, справа н-)

С минералогической точки зрения в данных породах вторичные минералы представлены как глинистыми минералами (смектитом и каолинитом) так и минералами кремнезема (опалом, кристобалитом). При этом глинистые минералы слагают более 50% породы, но при водонасыщении большая часть проб не сохраняла структурную прочность, проявляющуюся в сопротивлении как одноосному сжатию, так и разрыву. В то же вермя 2 пробы во время водонасыщения разрушились по крупным трещинам. Из этого факта можно сделать вывод, что как остатки первичных минералов, так и вторичные минералы кремнезема, цементирующие основную глинистую массу, во многом контролируют прочностные свойства данных образцов.

При этом показатели свойств сохраняют тренд, определенный предыдущими группами, но скачок в величинах изменения является более значительным. Так, пористость увеличивается до 39,7% относительно 15,4% у предыдущей группы, плотность уменьшается до 1,72 г/см³ относительно 2,35 г/см³. Показатели прочностных и деформационных свойств также снижаются в 2-5 раз, а магнитная восприимчивость остается на околонулевых значениях.

Несколько в иных гидрогеохимических условиях происходило образование опалитов, локально распространенных на Южно-Камбальном Центральном термальном поле. На одном из так называемых «серных бугров», который представляет собой бывшую точку разгрузки особенно кислых термальных вод, был отобран образец опалита (рис. 68), из которого были подготовлены 8 проб.



Рис. 68. Опалит с Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-1/22-3)

Макроскопически это светло-серо-желтые образования с псевдоморфной структурой и достаточно массивной текстурой, в которой иногда встречаются отдельные крупные поры и трещины. Желтые оттенки цвету данного образца придает сера, количество которой достигает 30%, по данным рентгеновской дифрактометрии, однако сами кристаллы серы практически неразличимы как на макроуровне, так и в проходящем свете в шлифах.

Под микроскопом анализ строения возможен фактически лишь при одном николе, так как опал, достаточно равномерно распределенный по образцу, изотропен в скрещенных николях, из-за чего различить какие-то определяющие признаки становится практически невозможно. В то же время при одном николе отчетливо заметны как пустые поры (рис. 69), так и заполненные скрытокристаллической серой. В основной массе породы угадываются псевдоморфозы по минералам вкрапленникам, которые имеют вытянутую таблитчатую форму. Это позволяет сделать вывод, что исходной породой для данных образований также являлись андезибазальты. Вместе с тем большую часть структуры основной массы, скорее всего, можно определить как колломорфную, образовавшуюся за счет выпадения опала из термальных растворов при изменении их гидрогеохимических параметров.



Рис. 69. Опалит с Южно-Камбального Центрального термального поля под микроскопом (н-)

Особо агрессивные условия кислотного выщелачивания, в которых образовались эти породы, определяют и их свойства. Пожалуй, одним из самых важных показателей, определяющих свойства данного образца, является крайне высокая пористость, которая у отдельных проб достигает 60%. Такой пористостью определяются низкие показатели плотности, а также прочностных и деформационных свойств.

Так как Южно-Камбальное Центральное термальное поле обладает невероятной контрастностью гидрогеохимических показателей разгружающихся термальных вод на крайне небольших расстояниях, на самом термальном поле возникает большое количество специфических образований. Таких образований являются карбонатные конкреции (Рычагов и др., 2021), образующиеся за счет кристаллизации из термальных растворов различных карбонатов. Так, в результате бурения на термальном поле с глубины более 10м были отобраны образцы скальных грунтов основания термального поля, которые представляют собой сцементированные карбонатами арглизированные образования. Всего из 4 образцов керна были подготовлены 9 проб данных образований (рис. 70). Породы представляют собой образования серо-белого цвета со скрытокристаллической структурой и массивной текстурой. В строении пород отчетливо выделяется большое количество трещин, залеченных как карбонатами, так и тонкодисперсным пиритом.



Рис. 70. Карбонатизированные аргиллизированные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля (ЮКЦ-1/19-53 слева сверху, ЮКЦ-1/19-51 слева снизу, ЮКЦ-1/19-50 справа сверху, ЮКЦ-1/19-57 справа снизу)

В шлифах описываемых образцов отчетливо выделяются псевдоморфные структуры по минералам вкрапленникам характерной для плагиоклазов формы (рис. 71), а также в большом количестве присутствуют трещины, залеченные карбонатами (в основном кальцитом). Размер трещин достигает 2-3 мм в поперечнике, а размеры псевдоморфоз вторичных минералов соответствуют размерам вкрапленников в исходных андезибазальтах. Таким образом, по наблюдаемой минеральной ассоциации и строению породы можно предположить, что исходные породы в данном случае были сначала аргиллизированы и превращены в глину с псевдоморфной структурой, а затем в результате гидрогеохимических условиях ИЗ термальных растворов изменения В начали кристаллизоваться карбонаты, которые и сцементировали аргиллизированные, вероятно, дисперсные грунты. Однако стоит учитывать, что по наблюдениям на множестве термальных полей подобные образования, вероятно, широко не являются распространенными и представляют собой определенного рода исключение из общих закономерных тенденций изменения вулканогенных пород на термальных полях.



Рис. 71. Карбонатизированные аргиллизированные андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля в шлифах в двух николях (ЮКЦ-1/19-51 слева сверху, СЮКЦ-1/19-50 справа сверху, ЮКЦ-1/19-53 снизу)

У образцов этой группы, относительно сильно измененных андезибазальтов, немного увеличиваются показатели плотности, а также показатели деформационных и прочностных свойств, а величина пористости снижается, что, вероятно, связано с процессами цементации аргиллизированных пород карбонатами. Сравнивать свойства данных пород с опалитами, вероятно, некорректно, так как они, судя по всему, образованы в различных условиях и различными минеральными ассоциациями.

Величины основных показателей свойств всех описанных групп образцов приведены в таблице 4. Приведенные в ней значения для большей наглядности были нанесены на ряд гистограмм и графиков. Цвета столбцов обозначают принадлежность того или иного образца к определенной группе, а горизонтальной чертой этого же цвета отмечена средняя арифметическая величина рассматриваемого показателя для каждой из групп образцов.

cTB0 5	БИЛ		ρs	n	Wπ	no	Vp	Vs	Е дин	Rc	Rp	χ
Количе проб	Значен	r/cm ³	Γ/cM^3	%	%	%	KM/C	KM/C	ГПа	МПа	МПа	CM^* 10 ⁻³
12	Среднее	2,68	2,83	5,0	0,3	0,9	5,17	2,76	52,9	137,4	15,9	28,2
	Мин.	2,61	2,82	2,3	0,2	0,4	4,61	2,16	33,4	93,4	12,6	8,3
	- Макс.	- 2,75	- 2,83	- 7,5	0,7	- 1,9	- 5,92	- 3,16	- 64,0	- 184,9	- 24,9	40,4
	Среднее	2,53	2,81	10,1	1,5	3,6	4,17	2,18	32,6	111,9	8,8	22,6
21	Мин.	2,08	2,71	4,8	0,5	1,2	3,01	1,54	16,4	52,8	7,3	9,2
	- Макс.	- 2,73	- 2,89	- 24,7	- 5,2	- 11,0	- 4,90	- 2,55	- 45,9	- 134,9	- 12,3	- 33,3
28	Среднее	2,35	2,78	15,4	2,3	5,2	3,24	1,67	18,0	53,3	6,4	0,40
	Мин. - Макс.	2,04 - 2,50	2,73 - 2,82	9,2 - 25,4	0,8 - 3,7	1,9 - 7,6	1,92 - 4,00	1,08 - 2,27	7,1 - 31,6	23,6	1,7 - 8,2	0,04 - 1,15
	Среднее	1,72	2,86	39,7	13,2	21,9	2,32	1,20	7,3	10,0	0,77	0,33
16	Мин. - Макс.	1,46 _ 2,11	2,85 _ 2,86	26,2 - 48,6	5,6 - 22,5	9,7 	1,29 - 3,61	0,74 - 2,05	2,5 - 17,4	8,8 - 11,5	0,46 - 1,07	0,18 - 0,49
	Среднее	1,23	2,88	57,3	28,8	35,2	1,20	0,70	1,3	3,1	0,46	0,09
8	Мин. -	1,13	2.88	53,3	22,0	29,6	0,93	0,50	0,8	2,6	0,16	0,07
	Макс.	1,34	2,00	60,8	36,5	41,1	1,80	1,05	3,5	3,6	0,75	0,12
9	Среднее	1,79	2,76	35,2	8,7	17,3	2,88	1,63	3,9	5,8	0,38	0,10
	Мин. - Макс.	1,66 - 2,04	2,68 - 2,83	27,8 - 40,5	7,4 - 10,0	15,0 - 19,7	1,90 - 2,26	1,24 - 2,26	7,1 - 21,1	3,0 - 8,5	0,27 - 0,50	0,06 - 0,12
	одловнигоу 12 12 21 28 16 8 9	BRIH PBRE STATE12Среднее12Мин. Смакс.21Среднее21Мин. Смакс.28Мин. Смакс.28Среднее16Мин. Смакс.16Среднее9Среднее9Мин. Смакс.	виннернорнорнорнорнорнорнорнорнорнорнорнорнор	P P P P P P P P <th>Purphy Purphy Purphy Purphyρ ρ ρ purphyρ ρ ρ purphyn purphyCPertuee2,682,835,00MHH. Make.2,612,822,332,752,832,752,837,55MHH. Make.2,032,8110,1MHH. Make.2,082,714,82,732,892,474,8MHH. Make.2,082,732,84MHH. Make.2,042,739,22,502,822,542,54MHH. Make.1,462,8526,23,102,112,8639,74,82,112,8639,74,82,112,8639,710MHH. Make.1,462,8526,23,811,132,8853,360,811,132,8853,39,941,132,682,7,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,882,3,39,941,132,882,3,39,941,132,882,3,39,941,132,3,360,89,941,132,3,42,3,39,941,3,42,3,42,3,59,941,3,42,3,42,3,59,951,402,402,3,59,94<th>ранны ранны<br< th=""><th>P ρ n W_{n} n_{o} \overline{v} <</th><th>P ρ n Wn no Vp $\overline{v}_{\overline{S}}$ $\overline{v}_{\overline{S}}$</th><th>Po p m Wn no Vp Vs $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{23}$ $\overline{23}$ $\overline{0.1}$ $\overline{0.9}$ $\overline{1.7}$ $\overline{2.76}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{1.61}$ $\overline{2.82}$ $\overline{2.3}$ $\overline{0.2}$ $\overline{0.4}$ $\overline{4.61}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.9}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.83}$ $\overline{7.5}$ $\overline{0.7}$ $\overline{1.9}$ $\overline{5.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.81}$ $\overline{1.91}$ $\overline{1.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.90}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.93}$ $\overline{2.41}$ $\overline{2.8}$ $\overline{1.92}$ $\overline{2.91}$ $\overline{2.91}$</th><th>ρ ρ_{n} n W_{n} n_{o} Vp Vs H_{HH} T_{o} T_{o} T_{o} T_{o} S_{o} S_{o}</th><th>Po Po PonNN<th>Portion ρ ρ</th></th></br<></th></th>	Purphy Purphy Purphy Purphyρ ρ ρ purphyρ ρ ρ purphyn purphyCPertuee2,682,835,00MHH. Make.2,612,822,332,752,832,752,837,55MHH. Make.2,032,8110,1MHH. Make.2,082,714,82,732,892,474,8MHH. Make.2,082,732,84MHH. Make.2,042,739,22,502,822,542,54MHH. Make.1,462,8526,23,102,112,8639,74,82,112,8639,74,82,112,8639,710MHH. Make.1,462,8526,23,811,132,8853,360,811,132,8853,39,941,132,682,7,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,8860,89,941,132,882,3,39,941,132,882,3,39,941,132,882,3,39,941,132,3,360,89,941,132,3,42,3,39,941,3,42,3,42,3,59,941,3,42,3,42,3,59,951,402,402,3,59,94 <th>ранны ранны<br< th=""><th>P ρ n W_{n} n_{o} \overline{v} <</th><th>P ρ n Wn no Vp $\overline{v}_{\overline{S}}$ $\overline{v}_{\overline{S}}$</th><th>Po p m Wn no Vp Vs $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{23}$ $\overline{23}$ $\overline{0.1}$ $\overline{0.9}$ $\overline{1.7}$ $\overline{2.76}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{1.61}$ $\overline{2.82}$ $\overline{2.3}$ $\overline{0.2}$ $\overline{0.4}$ $\overline{4.61}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.9}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.83}$ $\overline{7.5}$ $\overline{0.7}$ $\overline{1.9}$ $\overline{5.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.81}$ $\overline{1.91}$ $\overline{1.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.90}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.93}$ $\overline{2.41}$ $\overline{2.8}$ $\overline{1.92}$ $\overline{2.91}$ $\overline{2.91}$</th><th>ρ ρ_{n} n W_{n} n_{o} Vp Vs H_{HH} T_{o} T_{o} T_{o} T_{o} S_{o} S_{o}</th><th>Po Po PonNN<th>Portion ρ ρ</th></th></br<></th>	ранны <br< th=""><th>P ρ n W_{n} n_{o} \overline{v} <</th><th>P ρ n Wn no Vp $\overline{v}_{\overline{S}}$ $\overline{v}_{\overline{S}}$</th><th>Po p m Wn no Vp Vs $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{23}$ $\overline{23}$ $\overline{0.1}$ $\overline{0.9}$ $\overline{1.7}$ $\overline{2.76}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{1.61}$ $\overline{2.82}$ $\overline{2.3}$ $\overline{0.2}$ $\overline{0.4}$ $\overline{4.61}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.9}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.83}$ $\overline{7.5}$ $\overline{0.7}$ $\overline{1.9}$ $\overline{5.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.81}$ $\overline{1.91}$ $\overline{1.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.90}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.93}$ $\overline{2.41}$ $\overline{2.8}$ $\overline{1.92}$ $\overline{2.91}$ $\overline{2.91}$</th><th>ρ ρ_{n} n W_{n} n_{o} Vp Vs H_{HH} T_{o} T_{o} T_{o} T_{o} S_{o} S_{o}</th><th>Po Po PonNN<th>Portion ρ ρ</th></th></br<>	P ρ n W_{n} n_{o} \overline{v} <	P ρ n Wn no Vp $\overline{v}_{\overline{S}}$	Po p m Wn no Vp Vs $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{8}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ $\overline{9}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{12}$ $\overline{12}$ $\overline{23}$ $\overline{23}$ $\overline{0.1}$ $\overline{0.9}$ $\overline{1.7}$ $\overline{2.76}$ 12 $\overline{10}$ $\overline{1.61}$ $\overline{2.82}$ $\overline{2.3}$ $\overline{0.2}$ $\overline{0.4}$ $\overline{4.61}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.9}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.83}$ $\overline{7.5}$ $\overline{0.7}$ $\overline{1.9}$ $\overline{5.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.95}$ $\overline{2.81}$ $\overline{1.91}$ $\overline{1.92}$ $\overline{3.16}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.90}$ $\overline{2.16}$ $\overline{10}$ $\overline{1.91}$ $\overline{2.93}$ $\overline{2.41}$ $\overline{2.8}$ $\overline{1.92}$ $\overline{2.91}$	ρ ρ_{n} n W_{n} n_{o} Vp Vs H_{HH} T_{o} T_{o} T_{o} T_{o} S_{o}	Po Po PonNN <th>Portion ρ ρ</th>	Portion ρ

Таблица показателей свойств пород Южно-Камбального Центрального термального поля

Результаты определения основных показателей свойств для удобства анализа были нанесены на ряд гистограмм, на которых обозначены все отобранные образцы. При этом единым цветом отображаются образцы, принадлежащие к одной группе. Горизонтальной чертой этого же цвета обозначены средние значения показателя для той или иной группы, а численные значения этих показателей приведены в прямоугольниках соответствующего цвета. Составленные гистограммы позволяют более наглядно определить тенденции изменения свойств в процессе гидротермальных преобразований на Южно-Камбальном Центральном термальном поле.

Так, первым рассматриваемым параметром является плотность (рис. 72). У неизмененных андезибазальтов она имеет стандартные величины и в среднем равна 2,68 г/см³. Далее, при увеличении степени изменения плотность начинает снижаться и достигает 1,72 г/см³ у группы сильноизмененных андезибазальтов. При этом у опалитов, образовавшихся в несколько иных условиях, плотность снижается до величины 1,23 г/см³, а у заключительной группы карбонатизированных сильно измененных андезибазальтов за счет кристаллизации большого количества вторичных минералов плотность повышается по отношению как к опалитам, так и к аргиллизированным сильно измененным андезибазальтам и имеет величину 1,79 г/см³.



Рис. 72. Изменение плотности пород Южно-Камбального Центрального термального поля

Во многом изменение плотности определяется изменением пористости, которая в общем возрастает по мере увеличения степени измененности (рис. 73). У исходных пород она имеет величину 5,0%, достаточно характерную для эффузивных пород с массивной текстурой, а по мере увеличения степени измененности возрастает до 39,7% у группы

сильно изменных андезибазальтов, но в результате кристаллизации карбонатов на определенном этапе развития термального поля пористость для пород, подвергшихся этим процессам, немного снижается и принимает значение 35,2%. При этом вследствие специфических условий образования, в которых преобладает процесс сернокислотного выщелачивания, максимальными значениями пористости (57,3%) обладают опалиты.



Рис. 73. Изменение пористости пород Южно-Камбального Центрального термального поля

Совместно с составом, строением и физическими свойствами значительным изменениям подвергаются и показатели физико-механических свойств. В частности, по мере преобразования исходных пород происходит снижение величин скоростей продольных и поперечных волн, а также определяемый с их помощью динамический модуль упругости (рис. 74). Так, скорости продольных волн в неизмененных образцах составляют 5,17 км/с, а в процессе гидротермальных преобразований снижаются приблизительно в 2 раза для аргиллизированных пород и в 4 раза для опализированных. При этом за счет карбонатизации аргиллизированных пород их скорости возрастают приблизительно на 25% относительно группы сильно измененных андезибазальтов (рис. 74а).



Рис. 74. Изменение скорости продольных волн (а) и динамического модуля упругости (б) пород Южно-Камбального Центрального термального поля

Схожая тенденция наблюдается и в отношении динамического модуля упругости (рис. 75), который у неизмененных образцов равен 52,9 ГПа, а в процессе аргиллизации снижается до 7,3 ГПа и затем за счет цементации карбонатами возрастает до 12,6 ГПа. Минимальными значениями динамического модуля упругости (1,6 ГПа) обладают опалиты, для которых, таким образом, этот показатель снижается более чем в 33 раза относительно исходных пород.

Прочностные характеристики пород, основной из которых является прочность на одноосное сжатие, также радикально снижаются в процессе гидротермальных преобразований (рис. 75). Неизмененные андезибазальты, характеризующиеся высокой (137,4 МПа) прочностью на одноосное сжатие, постепенно преобразуются, что приводит к снижению этой величины, причем на начальных стадиях это снижение минимально и отдельные образцы слабо измененных андезибазальтов даже имеют прочность, сопоставимую с исходными породами. Однако в среднем группа слабо измененных андезибазальтов теряет около 20% исходной прочности, средне измененные образцы характеризуются величиной 53,3 МПа, а сильно измененные – 10,0 МПа. При этом, в отличие от ряда предыдущих показателей, карбонатизированные сильно измененные образцы обладают меньшими показателями (5,8 МПа), чем группа сильноизмененных андезибазальтов. В то же время весьма закономерным образом наименьшей прочностью (3,1 МПа) характеризуются опалиты.



107

Рис. 75. Изменение прочности пород Южно-Камбального Центрального термального поля на одноосное сжатие

Довольно заметным образом отличается тренд изменения величины магнитной восприимчивости в описываемом ряду. Как можно видеть из гистограммы, представленной на рис. 76, значительной величиной магнитной восприимчивости обладают только первые две группы андезибазальтов, что, с одной стороны, подтверждает корректность выделения групп, а с другой стороны, показывает, что потеря породами магнитной восприимчивости на Южно-Камбальном термальном поле происходит достаточно резко, ведь даже самый аргиллизированный образец из группы слабо измененных андезибазальтов имеет магнитную восприимчивость 17,0 СИ*10⁻³, а для всех последующих образцов в ряду это значение не превышает 1 СИ*10⁻³.



Рис. 76. Изменение магнитной восприимчивости пород Южно-Камбального Центрального

термального поля

Тесно связанным с физическими и физико-механическими свойствами, а также вероятно, отчасти их определяющим параметром является пористость. Отдельные взаимосвязи представлены на рис. 77 в виде графиков. Достаточно предсказуемо общая пористость оказывается связана с величиной открытой пористости (рис. 77а), однако, что интересно, доля открытых пор в отношении к общему их объему по мере увеличения степени преобразованности изменяется незначительно и у группы слабо измененных андезитов составляет 36%, а у сильно измененных образцов и у опалитов составляет 52% и 62%, соответственно. В отношении деформационных и прочностных характеристик, таких как динамический модуль упругости (рис. 77б) и прочность на одноосное сжатие (рис. 77в), наблюдаются достаточно отчетливые экспоненциальные зависимости с коэффициентами детерминации, равными 0,79 и 0,90, соответственно.



Рис. 77. Взаимосвязь пористости и различных свойств (а – открытой пористости, б – динамического модуля упругости, в – прочности на одноосное сжатие) пород Южно-Камбального Центрального термального поля
Выводы к подразделу 4.1:

- Андезиты, слагающие основание Восточно-Паужетского термального поля, под действием околонейтральных и слабощелочных термальных вод оказываются подвержены процессу аргиллизации, в результате чего глинистые минералы, в основном представленные смектитом, а также цеолиты и кальцит начинают играть значительную роль в составе породы.
- 2. Значительно изменяются свойства андезитов Восточно-Паужетского термального поля: происходит снижение плотности (с 2,71 г/см³ у неизмененных андезитов до 2,28 г/см³ у метасоматических брекчий), увеличение пористости (с 2,6% до 18,1%), 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.
- 3. Гидротермально измененная толща Восточно-Паужетского термального поля характеризуется зональным строением, имеющим принципиальное сходство с зоной гипергенеза (корой выветривания): трещинная зона аргиллизированных пород переходит вверх по разрезу в метасоматические брекчии, а затем в дисперсный горизонт гидротермальных глин.
- 4. Андезибазальты 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, а образцы, отобранные на самых кислых участках термального поля, и вовсе представляют собой опалиты.
- 5. Свойства андезибазальтов Южно-Камабльного Центрального термального поля также подвергаются значительным изменениям: происходит увеличение пористости (с 5,0% у образцов неизмененных андезибазальтов до 39,7% у сильно измененных аргиллизированных андезибазальтов и 57,3% у опалитов), снижение плотности (с 2,68 г/см³ до 1,72 г/см³ у наиболее аргиллизированных образцов и 1,23 г/см³ у опалитов), деформационных (динамический модуль упругости с 52,9 ГПа до 7,3 ГПа у аргиллизитов и 1,3 ГПа у опалитов) и прочностных (прочность на одноосное сжатие с 137,4 МПа до 10,0 МПа у аргиллизированных образцов и 3,1 МПа у опалитов) характеристик. Однако этот тренд сменяется на образцах карбонатизированных измененных андезибазальтов, которые за счет цементирующего воздействия карбонатных минералов, представленных кристаллизовавшихся В основном кальцитом, разворачивают тренд изменения свойств в обратную сторону.

4.2 Изменение состава, строения и свойств пород на термальных полях с разгрузкой сильнокислых термальных вод

4.2.1 Изменение состава, строения и свойств пород на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий

На Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий разгружаются по большей части кислые термальные воды, из-за чего на всей площади поля, а особенно в его южной части, широко распространены опалиты. Результаты, полученные на образцах с этого термального поля, крайне интересны, так как позволяют проследить динамику развития опалитов во времени. Так, несмотря на то, что химический и минеральный состав исходных пород достаточно быстро преображается, в опалитах продолжают наблюдаться процессы изменения, в основном в отношении их строения.

По итогам произведенных исследований микро-, макростроения и данных о минеральном составе, полученных при помощи рентгеновской дифрактометрии, был выделен ряд изменения, принципиально отражающий последовательность изменений, происходящих в образцах андезибазальтов на термальных полях, характеризующихся разгрузкой сильнокислых термальных вод (от исходного неизмененного андезибазальта до радикально преобразованного опалита, имеющего колломорфную структуру). Таким образом, была выделена следующая последовательность изменения на изученых образцах (от неизмененного до полностью преобразованного): БУ-1/20, БУ-7/20, БУ-3/20, БУ-5/20, БУ-2/20, БУ-4/20, БУ-6/20. При этом в связи с высокой динамичностью условий на термальных полях, высокой скоростью процесса опализации, а также ограниченностью обнажений на термальных полях среди изученных образцов лишь образец БУ-1/20 может быть охарактеризован как андезибазальт, а остальные образцы являются опалитами различной степени измененности. Основные показатели строения и свойств всех изученных образцов с Верхнего термального поля приведены в таблице 5. Структура построения данной таблицы аналогична таблицам 3, 4.

Неизмененные андезибазальты (образец БУ-1/20) темно-серого цвета обладают порфировой структурой и массивной текстурой (рис. 78). Выходят на поверхность в виде обнажения на относительно небольшом удалении (~75 м на восток) вверх по склону от самого активного участка термального поля (Большаков, 2021а).



Рис. 78. Образец неизмененного андезибазальта (БУ-1/20)

В описываемом образце преобладающая часть (до 80%) вкрапленников представлена плагиоклазами, реже встречаются полевые шпаты (~ 10%) и пироксены (~ 10%), а рудные минералы занимают менее 1%. Зерна плагиоклаза имеют вытянутую форму с отношением длины к ширине в среднем 3:1, при этом отдельные кристаллы наибольшего размера достигают 1,3 мм в длину, а средняя длина кристаллов приблизительно равна 0,4 мм. Изредка в отдельных вкрапленниках наблюдаются точечные области, в основном привязанные к системе трещин, по которым развиваются вторичные минералы, однако масштабы их распространения несущественны и не влияют на основные свойства. Полевые шпаты представлены крупными кристаллами неправильной формы, которые иногда образуют сростки, размеры которых в поперечнике достигают 4-5 мм. Вторичные изменения в полевых шпатах отсутствуют (рис. 79).



Рис. 79. Неизмененный андезибазальт в шлифе при скрещенных николях. Pl – плагиоклаз

Пироксены представлены кристаллами субизометричной формы, размером от 0,1 мм до 0,5 мм. Основная масса породы по большей части состоит из микролитов плагиоклаза и вулканического стекла, которое уступает в объемах микролитам, а следовательно, структура основной массы описываемого андезибалальта - интерсертальная. Неизмененные андезибазальты имеют высокую плотность ($\rho = 2,74$ г/см³), низкую пористость (n = 6 %), высокие показатели упругих ($V_p = 5,5$ км/с; $E_y = 61,4$ ГПа) и прочностных ($R_c = 133$ МПа, $R_p = 33$ МПа) свойств, а также высокий показатель магнитной восприимчивости ($\chi = 25,6$ СИ*10⁻³).

За счет воздействия сильнокислых термальных вод андезибазальты превращаются в опалиты и продолжают активно изменяться уже после практически полного преображения минерального состава. Начальный этап развития опалитов хорошо продемонстрирован на примере образца EV-7/20 (рис. 80). Данный образец можно охарактеризовать и как опализированный андезибазальт, и как опалит, так как в нем присутствую участки с различной степенью измененности, однако по результатам анализа шлифов было принято решение охарактеризовать его как опализированный андезибазальт. На данном этапе опалит обладает двухцветной (бело-бежевой и серой) окраской, причем светло-бежевые и белые участки приурочены к трещинам, по которым, вероятно, наиболее активным образом

мигрировали термальные воды и шло активное выщелачивание. Вблизи зон, подверженных активным преобразованиям, образец характеризуется псевдоморфной структурой, повторяющей исходную порфировую. Псевдоморфозы, образованные по всем крупным вкрапленникам, отчетливо дешифрируются в шлифе при одном николе (рис. 81). В образце БУ-7/20 значительная часть породы замещена вторичными минералами (в основном опалом), и лишь небольшая часть минералов-вкрапленников на отдельных, наименее измененных участках оказывается не подвержена процессу опализации (Большаков, 2021а).



Рис. 80. Образец БУ-7/20 (опализированный андезибазальт начальной стадии изменения)

Процесс опализации в естественных условиях представляется весьма сложным и неодносторонним благодаря высокой динамичности условий на термальных полях. Одновременно с выщелачиванием протекают и процессы новообразования вторичных минералов в пустотах измененных пород. В результате опализированные образцы начальных стадий преобразования характеризуются значительно сниженными показателями плотности (до 2,16 г/см³), однако не настолько существенно увеличивается пористость (до 9 %), что можно объяснить снижением плотности твердых частиц

относительно неизмененного образца (с 2,91 г/см³ до 2,38 г/см³) за счет изменений в минеральном составе породы. Эти изменения, в свою очередь, оказывают значительное влияние на прочностные и деформационные характеристики. Так, прочности на одноосное сжатие и на разрыв вместе с модулем упругости снижаются практически в 2,5 раза относительно неизмененного образца (табл. 5). Стоит заметить, что важным индикатором степени преобразованности исходной породы В опалит является магнитная восприимчивость, которая крайне резко снижается под действием процесса опализации. Так, уже на данном этапе преобразования порода практически полностью теряет магнитную восприимчивость за счет разрушения первичных пара- и ферромагнитных минералов (Большаков, 2021а).



Рис. 81. Опализированный андезибазальт (БУ-7/20) в шлифе (н-)

Следующий этап преобразования андезибазальта показан на примере образца *БУ-3/20*. На этой стадии продолжающегося выщелачивания на макроуровне породы окончательно преобразовываются в опалиты и практически полностью теряют исходные серые цвета окраски, за исключением небольших областей светло-серого цвета. (рис. 82). Данный образец обладает псевдоморфной структурой, а на микроуровне (в шлифах) отсутствуют неизмененные первичные минералы-вкрапленники. При этом стоит отметить, что в шлифах при одном николе отчетливо видна первичная структура исходной породы, которая оказывается полностью выщелочена и замещена опалом, а в скрещенных николях совершенно изотропна (рис. 83).



Рис. 82. Образец БУ-3/20 (опалит начальной стадии изменения)

Вероятно, одним из важнейших изменений в описываемом образце относительно образца БУ-7/20 является существенное понижение величины плотности до 1,79 г/см³, которое, видимо, происходит за счет значительного увеличения пористости (28 %), благодаря продолжению протекания процесса кислотного выщелачивания. Такое существенное увеличение пористости сказывается на величине прочностных и деформационных свойств. Так, динамический модуль упругости и прочность на одноосное сжатие снижаются практически в 2 раза относительно предыдущего образца в рассматриваемом ряду (табл. 5).



Рис. 83. Опалит начальной стадии изменения (БУ-3/20) в шлифе (н-)

Далее в выделенном ряду изменения опалитов располагается образец *БУ-5/20*. Он, как и предыдущие два опалита, имеет псевдоморфную структуру, однако в строении данного образца эта структура уже выражена значительно менее ярко, и в общей массе породы уже выделяются лишь отдельные явные псевдоморфозы по бывшим минераламвкрапленникам. Отдельные темные точки на фоне однородной светло-бежевой массы (рис. 84), судя по всему, являются небольшими участками, на которых сосредоточены рудные минералы, в основном представленные пиритом. В то же время основная масса породы значительно преображается и характеризуется хаотичной пористой текстурой, средний размер пор в которой имеет величину 50-100 мкм (рис. 85).



Рис. 84. Образец БУ-5/20 (опалит средней стадии изменения)

В образце БУ-5/20 показатели практически всех изучаемых свойств достаточно слабо отличаются от аналогичных для предыдущего образца (БУ-3/20), при этом для части показателей установившаяся тенденция изменения сохраняется, а для некоторых показателей свойств меняется на обратную, хоть и незначительно (табл. 5). В описываемом образце незначительно снижается величина пористости (на 3%), однако плотность продолжает снижаться (1,77 г/см³), что связано с продолжением снижения величины плотности твердых частиц, которая в этом образце достигает минимального значения среди всех образцов с данного термального поля (2,35 г/см³). При этом показатели деформационных свойств (скорость продольных волн и динамический модуль упругости) снижаются, а изменение прочностных показателей соответствует общему тренду (табл. 5). Вероятнее всего, подобные неоднородности в тенденциях изменения свойств для описываемого образца связаны с особенностями сочетания процессов выщелачивания и новообразования различных минералов в данном образце (Большаков, 2021а).



Рис. 85. Опалит средней стадии изменения (БУ-5/20) в шлифе (н-)

Пятый в выделенном ряду изменения образец - *БУ-2/20*. Этот образец имеет светлобежевую расцветку, в которой выделяются небольшие включения светло-серого и белого цвета (рис. 86). Отличительной особенностью этого образца является появление колломорфной структуры на отдельных участках, при которой в породе отчетливо выделяются поры, заполненные вторичными минералами, среди которых однозначно преобладает опал, возникший, по-видимому, не путем замещения исходных минералов, а за счет выпадения из раствора. При этом в описываемом образце все еще присутствуют единичные псевдоморфозы по кристаллам первичных минералов (рис. 87).



Рис. 86. Образец БУ-2/20 (опалит средней стадии изменения)

Тенденция изменения свойств для этого образца соответствует той, что мы наблюдали для первых трех образцов. У данного образца относительно предыдущих дальше увеличивается пористость и величина водопоглощения, а плотность и показатели упругих и прочностных свойств уменьшаются. Интересным для анализа является тот факт, что у данного образца плотность твердых частиц (2,48 г/см³) превышает аналогичную для образцов БУ-7/20 (2,38 г/см³) и БУ-5/50 (2,35 г/см³), что, вероятно, свидетельствует об образовании из гидротермальных растворов минералов с большей плотностью. Таким образом, можно утверждать, что процесс выщелачивания в таких породах по скорости превосходит процесс отложения новых минералов, так как плотность опалитов, несмотря на рост плотности твердых частиц, продолжает снижаться. Также стоит отметить, что начиная с этого образца в выделенном ряду опализации плотность твердых частиц продолжит возрастать (Большаков, 2021а).



Рис. 87. Опалит средней стадии изменения (БУ-2/20) в шлифе при одном николе (белой линией обозначены границы псевдоморфоз минералов-вкрапленников)

Предпоследний образец в описываемом ряду - *БУ-4/20*. От рассмотренных ранее образцов данный опалит отличается на макроуровне особенно равномерной светлобежевой расцветкой (рис. 88), а на микроуровне - явно выраженной колломорфной структурой (рис. 89). Причем в данном образце большее количество пор оказывается заполнено вторичным опалом и другими низкотемпературными минералами кремнезема, а измененные участки исходных андезибазальтов занимают менее 40% общего объема породы. Основными минералами, слагающими данный образец, согласно данным рентгеновской дифрактометрии, являются опал, тридимит, алунит и глинистые минералы (смектит и каолинит) (Большаков, 2021а).



Рис. 88. Образец БУ-4/20 (опалит завершающей стадии изменения)

Образец БУ-4/20 имеет плотность 1,60 г/см³, таким образом, продолжая тенденцию разуплотнения, несмотря на немного увеличивающуюся величину плотности твердых частиц. Главным образом это связано с продолжением увеличения величины пористости до 36 %, (табл. 5). Показатели физико-механических свойств продолжают изменяться согласно выявленной тенденции снижения: скорость продольных волн снижается до 2,7 км/с, динамический модуль упругости - до 8,6 МПа, а прочность на одноосное сжатие - до 17,7 МПа.



Рис. 89. Опалит завершающей стадии изменения (БУ-4/20) в шлифе (н-)

Последняя стадия развития опалитов в описываемом ряду представлена образцом *БУ-6/20* (рис. 90). Основная масса данного образца как на микро-, так и на макроуровне практически полностью идентична предыдущему образцу БУ-4/20. Отличительной особенностью данного образца является сеть трещин, заполненных вторичными минералами, основными из которых являются минералы кремензема: опал, тридимит, кристобалит, кварц (рис. 91), а также алунит.



Рис. 90. Образец БУ-6/20 (опалит завершающей стадии изменения)

Ширина отдельных трещин в обнажении превышала 4 см. Также в данном образце рентгеновской дифрактометрией выявлено высокое содержание каолинита (>40%), которое, вероятно, завышено из-за значительного объема аморфной фазы и трудности количественной интерпретации минерального состава подобных образцов. Однако, несмотря на существенное количество глинистых минералов в данном образце, они не оказывают определяющего влияния на свойства породы. Так, при водонасыщении практически не изменяются показатели скорости прохождения упругих волн, а также прочности как в воздушно-сухом, так и водонасыщенном состояниях являются практически идентичными. Вероятно, это явление можно объяснить «бронирующим» эффектом выпадающего из раствора опала на участках породы, обогащенных глинистыми минералами (Большаков, 2021а).



Рис. 91. Опалит завершающей стадии изменения (БУ-6/20) в шлифе (н-) Ор – опал, Q –

При описании данных пород в обнажении (рис. 92) было отчетливо заметно, что вторичные минералы белого цвета, заполняющие трещины в породе, значительно отличаются от основной массы и обладают повышенной твердостью, плотностью и, вероятно, прочностными характеристиками относительно основной массы опалита (Большаков, 2021а).



Рис. 92. Образец БУ-6/20 в обнажении

Так, например, величины высоты упругого отскока для трещин составляли 25 единиц, в то время как для основной массы высота упругого отскока в среднем была равна 10 единицам. Несмотря на это, прочность породы в целом снизилась (табл. 5) по сравнению с предыдущим образцом, что объясняется появлением неоднородностей в виде упомянутых трещин, по которым зачастую и происходило разрушение в условиях одноосного сжатия. Вместе с этим за счет кристаллизации в трещинах различных модификаций кварца значительно возрасла плотность твердых частиц (до $2,70 \text{ г/см}^3$), несмотря на что, плотность самого опалита все же снижается (до $1,55 \text{ г/см}^3$) за счет продолжающегося увеличения пористости, которая в данном образце достигла максимального значения в 42,6 %. Динамический модуль упругости практически не изменился относительно предыдущего образца (повысился на 0,1 МПа), а прочность снизилась до минимального среди рассматриваемых образцов значения в 16,6 МПа.

По результатам всех произведенных определений показателей свойств, а также, на основании последовательности изменний опалитов в выделеннмом ряду была составлена таблица 5.

Показатели физических и физико-механических свойств андезибазальтов и опалитов с

Верхнего термального поля вулкана Бурлящий

Степень изменения	№ образца	Количество проб	Значения	ρ	ρs	n	Wπ	no	Vp	Vs	Е дин	Rc	Rp	χ
				Γ/cM^3	Γ/cM^3	%	%	%	KM/C	KM/C	ГПа	МПа	МПа	CM^* 10^{-3}
Неизмененный андезибазальт	BV -1/20	9	Среднее	2,74	2,91	5,7	0,1	0,4	5,5	2,9	61,4	133,0	20,9	25,6
			Мин. - Макс.	2,73 - 2,76	2,91	5,3 - 6,1	0,1 _ 0,4	0,2 - 1,0	4,5 - 6,2	2,5 - 3,3	44,0 - 83,1	110,8 - 164,7	15,7 	24,6
Опализированный андезибазальт	BY -7/20	4	Среднее	2,16	2,38	9,2	1,5	3,3	4,2	2,2	27,4	54,47	4,4	0,06
			Мин. - Макс.	2,12 	2,38	6,3 	0,8 - 2,2	1,8 - 4,7	4,0 - 4,7	1,8 - 2,7	19,3 - 33,5	54,47	4,4	0,06
Опалит с псевдоморфной структурой	EV-3/20	5	Среднее	1,79	2,48	27,8	7,5	13,4	3,3	1,9	16,1	33,4	5,8	0,68
			Мин. - Макс.	1,75 - 1,82	2,48	26,6 	5,4 - 9,6	9,6 - 17,3	2,9 - 3,6	1,2 - 2,2	7,1 	26,7 - 40,2	5,8	0,39 - 0,84
	EY-5/20	4	Среднее	1,77	2,35	24,5	5,4	9,6	3,4	1,9	16,2	32,5	3,4	0,46
			Мин. - Макс.	1,74 - 1,85	2,35	21,4 	4,3 - 5,9	7,5 - 10,4	3,3 - 3,6	1,8 - 2,0	14,6 - 17,4	32,5	3,4	0,39 - 0,51
	BY -2/20	9	Среднее	1,69	2,48	31,8	10,6	17,6	3,1	2,4	13,4	19,5	2,5	0,54
			Мин. - Макс.	1,55 - 1,86	2,48	25,0 	6,4 - 17,1	11,3 26,5	2,6 _ 3,7	1,5 - 2,1	8,9 - 19,1	9,8 - 37,3	2,2 - 2,8	0,42 - 0,66
Опалит с колломорфной структурой	B Y-4/20		Среднее	1,60	2,50	36,1	13,6	21,8	2,7	1,4	8,6	17,7	1,9	0,03
		7	Мин. - Макс.	1,54 - 1,63	2,50	34,8 - 38,4	12,2 - 15,4	19,8 - 23,7	2,4 - 2,9	1,3 - 1,6	6,9 - 10,5	15,4 - 19,9	1,8 - 1,9	0,03
	EV-6/20	7	Среднее	1,55	2,70	42,6	18,6	28,5	2,6	1,5	8,7	16,6	2,5	0,03
			Мин. - Макс.	1,40 - 1,69	2,70	37,3 - 48,0	14,0 	23,7 - 35,2	2,2 - 3,2	1,2 - 1,8	6,2 - 13,9	10,5 	1,3 - 3,7	0,03 - 0,06

На основании данных, приведенных в табл. 5, был выявлен ряд закономерностей в динамике протекания процесса опализации на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий и его влиянии на свойства образцов в процессе их преобразования. Эти закономерности выражены в виде гистограмм, приведенных на рис. 93.



Рис. 93. Изменение свойств (а – плотности, б – плотности твердых частиц, в – пористости, г – динамического модуля упругости, д – прочности на одноосное сжатие, е – магнитной восприимчивости) пород Верхнего термального поля вулкана Бурлящий в процессе гидротермальной переработки

Из приведенных гистограмм отчётливо видно, что часть свойств закономерно и постепенно изменяется в процессе опализации, а часть показателей либо изменяется крайне

резко, либо вообще не имеет четкой зависимости от степени измененности. Так, видно, что плотность в воздушно-сухом состоянии постепенно изменяется от от 2,74 г/см³ у неизмененных андезибазальтов до 1,55 г/см³ у опалита максимальной степени измененности. При этом важно отметить, что плотность закономерно снижается, несмотря на отсутствие четкого тренда в изменении плотности твердых частиц (рис. 93б), что, вероятно, объясняется двусторонним характером воздействия гидротермальных растворов, которые, с одной сторны, приводят к выщелачиванию и замещению, в результате чего плотность твердых частиц снижается, но в то же время происходит и кристаллизация новых минералов из гидротермальных растворов, которые могут повышать значения этого показателя. Так, плотность твердых частиц снижается с характерных для неизмененных андезибазальтов 2,91 г/см³ до 2,35 г/см³ у образца БУ-5/20 (четвертого в выделенном ряду изменения), после чего плотность твердых частиц начинает плавно расти, достигая 2,70 г/см³ у последнего образца в ряду. Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что на величину плотности в большей степени влияет именно пористость (рис. 93в), которая в процессе опализации увеличивается с 6% (у образца БУ-1/20) до 43% (у образца БУ-6/20). В процессе опализации значительные изменения претерпевают не только физические, но и физико-механические свойства. Так, по мере увеличения степени измененности в изученных образцах снижаются скорости упругих волн (продольных с 5,5 км/с до 2,6 км/с, а поперечных с 2,9 км/с до 1,4 км/с), а также связанный с ними динамический модуль упругости уменьшается с 61,4 ГПа до 8,6 ГПа у предпоследнего образца (рис. 93г). Слабое увеличение среднего значения и разброса значений динамического модуля упругости в последнем образце объясняется повышенной неоднородностью образца, при которой внутри него встречается ряд трещин, заполненных плотными вторичными минералами, обладающими повышенными относительно основной массы значениями динамического модуля упругости. Схожим с деформационными характеристиками образом изменяются и показатели прочностных свойств. Так, прочность образцов на одноосное сжатие (рис. 93д) снижается приблизительно в 8 раз в выделенном ряду (у неизмененных анезибазальтов она составляет 133,0 МПа, а у максимально преобразованного опалита – 16,6 МПа). Дополнительно следует отметить, что все изученные образцы являются неразмягчаемыми, даже несмотря на то, что в образцах опалитов в значительных количествах присутствует каолинит, что говорит о решающем влиянии опала и других минералов кремнезема на формирование прочностных свойств опалитов (Большаков, 2021а). Несколько выделяется в приведенных тенденциях тренд изменения магнитной восприимчивости в процессе опализации (рис. 93е). Практически полная потеря магнитной восприимчивости происходит уже на самых ранних этапах опализации (исходные породы имеют величину магнитной восприимчивости 25,6 СИ*10⁻³, а все остальные образцы, представленные опалитами, характеризуются значениями, которые колеблются в пределах от 0,03 СИ*10⁻³ до 0,68 СИ*10⁻³), что подтверждается данными, полученными и на других термальных полях.

В процессе анализа полученных данных были также получены несколько закономерностей, демонстрирующих взаимосвязь отдельных показателей свойств между собой. Из рис. 94 отчетливо видно, что существует явная зависимость величин скорости продольных волн, динамического модуля упругости и прочности на одноосное сжатие от пористости. Отчетливо видно, что пористость неизмененного андезибазальта имеет слабый разброс, но в то же время при близких значениях пористости величина динамического модуля упругости может различаться практически в 2 раза (~ 42-84 ГПа). В то же время при повышении пористости уже до 10% происходит резкое снижение прочностных и деформационных характеристик, которые впоследствии для большей части опалитов различаются не столь значительно. Это наблюдение позволяет сделать вывод, что наиболее значимые изменения в физико-механических свойствах происходят на начальных стадиях опализации вулканогенных пород и, судя по тесной корреляционной связи, заметной на графиках (рис. 94), во многом контролируются именно пористостью.



Рис. 94. Зависимость различных свойств (а – скорости продольных волн, б – динамического модуля упругости, в – прочности на одноосное сжатие, г – открытой пористости) пород Верхнего термального поля вулкана Бурлящий от пористости

Из рис. 94г отчетливо видно, что общая пористость тесно связна с открытой пористостью, причем характер взаимосвязи не линеен. Отношение среднего показателя величины общей пористости к величине открытой пористости в процессе опализации уменьшается с 13,0 для неизмененных андезибазальтов до 1,5 для образца БУ-6/20, представляющего собой самый измененный образец опалита. Подобное изменение объясняется постепенным объединением закрытых пор в общую сеть в процессе опализации.

4.2.2. Изменение состава, строения и свойств пород на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика

Термальное поле Северного кратера Центрального Семячика характеризуется разгрузкой экстремально кислых термальных вод (pH в отдельных кипящих котлах достигал 1,4), из-за чего на поле так же, как и на вулкане Бурлящий, широко распространены опалиты, однако на Центральном Семячике опалиты можно назвать более «чистыми», так как в них гораздо меньше примесей отличных от опала минералов. Эталонным образцом опалита представляется образец ЦС-4/20, плотность воздушно-сухого грунта у отдельных цилиндров которого достигает величин 0,8 г/см³.

Как и на предыдущих описанных термальных полях, на этом поле была отобрана серия образцов, из которых впоследствии был составлен ряд изменения, отражающий принципиальные моменты гидротермальных преобразований вулканитов на данном термальном поле. Схема отбора была представлена выше, а образцы были расставлены в ряд следующим образом: ЦС-1/20, ЦС-2/20, ЦС-8/20, ЦС-7/20, ЦС-6/20, ЦС-3/20, ЦС-4/20. Методика выделения ряда аналогична предыдущим рассмотренным рядам и основывается на макро- и микроописании, а также на данных о минеральном составе.

Помимо образцов непосредственно с термального поля и неизмененных образцов, отобранных на минимально возможном расстоянии от термального поля на Центральном Семячике, был произведен отбор разностей неизмененных пород по кромке циркообразной структуры Северного кратера для более детального понимания строения вулкана. В результате были отобраны 5 образцов вулканогенных пород (рис. 95).

Для всех отобранных образцов были определены свойства, подготовлены и изучены шлифы, а также изучен их химический состав. Все образцы представляют собой вулканогенные породы от базальта до андезита с рядом сходств и различий, которые, однако, не слишком радикально влияют на их свойства. В результате было принято решение рассматривать в качестве неизмененных пород для ряда изменения как раз образцы ЦС-1/20

и ЦС-2/20, отобранные недалеко от термального поля, так как именно они с наибольшей вероятностью подвергаются опализации на этом термальном поле.



Рис. 95. Породы, слагающие верхнюю кромку Северного кратера Центрального Семячика

Таким образом, группа неизмененных образцов представлена двумя образцами (ЦС-1/20 и ЦС-2/20). Оба образца были отобраны за пределами термального поля выше по склону от самого активного «серного» участка термального поля (рис. 96). В обоих образцах отсутствуют признаки гидротермальных преобразований, однако один из них является более массивным, а второй более пористым (рис. 96). Оба образца имеют темносерые цвета и порфировую структуру.



Рис. 96. Неизмененные андезибазальты термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-1/20 слева, ЮКЦ-2/20 справа)

Вероятно, они все-таки представляют собой образцы двух разных лавовых потоков, хотя и были отобраны от обнажений на расстоянии около 20 метров друг от друга. Такой вывод можно сделать, основываясь на различиях в микростроении двух образцов, особенно отчетливо заметных под микроскопом (рис. 97). Из основных отличий можно выделить различия как в составе, так и строении основной массы. В образце ЦС-1/20 в заметных количествах (~5-7%) присутствуют пироксены, которые не обнаружены в образце ЦС-2/20, а также в отношении строения можно наблюдать, что соотношение вкрапленников и микролитов основной массы гораздо более однородно в образце ЦС-1/20, чем в ЦС-2/20 (рис. 97), что может свидетельствовать о различных условиях поступления и охлаждения порций магмы, сформировавших эти породы.



Рис. 97. Неизмененные андезибазальты термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в скрещенных николях (ЦС-1/20 слева, ЮКЦ-2/20 справа)

Свойства двух образцов, объединенных в группу неизмененных андезибазальтов, в ряде показателей оказываются весьма схожи, а в ряде показателей значительно различаются, что, скорее всего, связано в основном с наличием длинных, вытянутых субгоризонтальных пор, размер которых в отдельных случаях может быть сравним с половиной диаметра самого цилиндра.

На термальном поле из активно прогревающегося участка с рядом кислых разгрузок был отобран образец опализированного андезибазальта, который имеет желтовато-серый цвет, порфировую структуру и массивную текстуру (рис. 98). Опализация в данном образце находится на самой начальной стадии и на макроуровне заметна лишь за счет незначительного изменения окраски.



Рис. 98. Опализированный андезибазальт термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-8/20)

В шлифе по своему строению порода значительно напоминает образец ЦС-2/20, за исключением отсутствия макропор. Гидротермальные изменения имеют слабовыраженный концентрический характер и развиваются в основном по плоскостям двойникования кристаллов плагиоклаза (рис. 99). Стоит отметить, что подобным изменениям подвержена лишь часть (около 30%) от общего объема вкрапленников. Также частично опализации подвержены вулканическое стекло основной массы и часть рудных минералов.



Рис. 99. Опализированный андезибазальт термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в скрещенных николях (ЦС-8/20)

Свойства образца ЦС-8/20 изменяются закономерным образом по сравнению с образцом ЦС-1/20, так как оба имеют массивную текстуру. Но относительно образца ЦС-2/20 изменения многих показателей контринтуитивны (повышаются плотность, упругие и прочностные свойства). Это связано с его (образца ЦС-2/20) изначально заниженными показателями, объясняющимися высокой первичной пористостью и масштабным эффектом, описанными ранее.

В выделенном нами ряду, как и на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий, практически отсутствуют переходные разности между слабо измененными андезитами и полноценными опалитами. Вероятно, это происходит из-за специфики процесса кислотного выщелачивания, которое было продемонстрировано в работе (Ладыгин и др., 2014), где изучались образцы обломков вулканогенных пород, выщелачивающихся в кислотных поверхностных термальных водах ручья на вулкане Баранского. Это исследование показало, что процесс кислотного выщелачивания происходит скачкообразно и переходные зоны между областями с различной степенью преобразованности крайне малы. Вероятно, на термальных полях этот процесс носит более выраженный характер, из-за чего отобрать переходную разность не представляется возможным.

Следующим образцом в выделенном ряду изменения является опалит ЦС-7/20-Б (рис. 100), отобранный на переферийной части самого активного «серного участка» термального поля. В данном образце минимально присутствуют первичные вулканогенные минералы, а от андезибазальтов остается в основном лишь облик структуры, псевдоморфозы которой достаточно явно выделяются на микроуровне. Образец имеет контрастную окраску с белыми и темно-серыми участками, вероятно объясняющуюся всетаки частично оставшимися, не полностью опализированными участками сильно преобразованных андезибазальтов.



Рис. 100. Опалит начальной стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-7/20)

На микроуровне в данном образце отчетливо распознаются псевдоморфозы по порфировой структуре исходных пород, а также интересной особенностью является наличие концентрических слоистых опаловых образований в порах, которые хорошо видны на рис. 101. Во всех порах минерал изотропен в скрещенных николях, что позволяет сделать вывод о том, что это вторичный, новообразованный из раствора опал. Таким образом, можно утверждать, что даже в этом образце уже происходит не только выщелачивание, но и отложение вторичных минералов из термального раствора, что говорит о потенциальной одновременности протекания этих процессов, особенно если оперировать понятием геологического времени.



Рис. 101. Опалит начальной стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в одном николе (ЦС-7/20)

Свойства этого образца изменяются так же резко, как его состав и строение. Плотность уменьшается до 1.56 г/см³, пористость возрастает до 29%, резко падает плотность твердых частиц, а также показатели прочностных и деформационных свойств.

Опалитом, отображающим следующую стадию преобразования пород в процессе кислотного выщелачивания, является ЦС-6/20 (рис. 102), отобранный в нескольких метрах от предыдущего рассмотренного образца. Он имеет достаточно равномерную свелобежевую окраску, в нем даже на макроуровне видна псевдоморфная структура с более белыми вкрапленниками и более бежевой основной массой. Образец выглядит весьма плотным, и, вероятно, однородности степени своей преобразованности он обязан более спокойным условиям фильтрации кислых термальных вод на участке его образования.



Рис. 102. Опалит средней стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-6/20)

Строение породы в шлифе очень схоже с предыдущим образцом (рис. 103). В нем так же широко распространены псевдоморфозы по кристаллам первичных минералов и заметно множество пор, в которых концентрическими слоями отлагается опал. Основное различие этого образца от предыдущего состоит в том, что в нем присутствуют участки с колломорфной структурой, в которых процесс отложения опала из раствора имеет значительно больший масштаб. Исходя из схожести образцов на уровне микростроения и значительного различия на макроуровне можно предположить, что данный образец формировался в схожих гидрогеохимических условиях, но иных гидрогеодинамических (вероятно более спокойных).



Рис. 103. Опалит средней стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в одном николе (ЦС-6/20)

В то же время на самом активном «серном участке» термального поля, где в настоящее время разгружаются самые кислые термальные воды, были отобраны два образца (в верхней и в нижней части). Образец из нижней части (ЦС-3/20) представлен на рис. 104. Внешне он имеет схожие черты и с образцом ЦС-7/20, и с образцом ЦС-6/20. С одной стороны, он обладает контрастными окрасками, а с другой, отдельные пробы по своему строению напоминают предыдущий описанный образец. Вероятно, такие различия проб в рамках одного образца связаны с тем, что пробы этого образца, в отличие от предыдущих двух, подготавливались непосредственно в поле из обнажения при помощи портативной буровой установки на базе шуруповерта. Таким образом, расстояние, на котором располагались пробы в массиве, достигает примерно 60-70 см, в то время как пробы предыдущих образцов были подготовлены из относительно небольших кусков пород, отобранных молотком из обнажения, за счет чего степень их однородности значительно выше.



Рис. 104. Опалит завершающей стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-3/20)

Наиболее отчетливо различия данного образца от предыдущих заметны в шлифе. В проходящем свете структуру данного опалита можно охарактеризовать как хаотичноколломорфную (рис. 105). Характерные псевдоморфозы все еще присутствуют, хотя и слаборазличимы, в то же время в основной массе породы отсутствуют какие-либо характерные закономерности строения, вероятнее всего вызванные хаотичным и массовым отложением опала из раствора, распределение которого носит равномерный и бесструктурных характер.



Рис. 105. Опалит завершающей стадии изменения с термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в одном николе (ЦС-3/20)

Показатели свойств в этом образце продолжают изменяться согласно намеченному тренду снижения плотности, упругих и прочностных свойств и роста пористости, однако в данном образце по ряду параметров наблюдается наибольший разброс значений относительно средней величины, что, скорее всего, связано с описанной выше методикой отбора образцов, что в очередной раз демонстрирует то, насколько изменчивы как сами гидротермально измененные породы, так и другие факторы, определяющие степень их преобразованности.

Последний образец, отражающий конечную стадию развития опалита, – ЦС-4/20. Он был отобран в правом борту в верхней части ручья, протекающего по самому активному участку термального поля. Образец практически идеально белого цвета (рис. 106), порой лишь с небольшим бежевым оттенком. Структура колломорфная, текстура у большей части образцов массивная, а у нескольких – пористая. Данный образец отличается практически идеальной однородностью, что позволяет предположить, что протекание активных изменений в нем завершено и в массиве он находится в некотором состоянии «баланса» с окружающими гидрогеохимическими условиями.



Рис. 106. Полностью преобразованный опалит с термального поля Северного кратера Центрального Семячика (ЦС-4/20)

Под микроскопом в шлифе строение этого опалита (рис. 107) частично напоминает предыдущий образец, однако в нем окончательно пропадают какие-либо признаки, позволяющие напрямую определить протопороду, из которой данный опалит сформировался, однако, учитывая схожесть в строении с предыдущим образцом, в котором такие признаки есть, можно сделать предположение, что она также является андезибазальтом. У данного образца по результатам измерений определена невероятно высокая пористость (до 63,8% у отдельных проб) при отсутствии явно различимых невооруженным взглядом и в проходящем свете пор, что позволяет сделать вывод о том, что размер пор крайне мал. Также несмотря на большую пористость данного образца в сравнении с предыдущим, он обладает меньшей открытой пористость отдельных проб в воздушно-сухом состоянии достигает 0,79 г/см³, при начале водонасыщения этих образцов они всплывали, однако в течение нескольких часов все-таки погружались на дно из-за того, что величина открытой пористости хоть и обладает значительным разбросом значений, все же остается существенной.



Рис. 107. Полностью измененный опалит с термального поля Северного кратера Центрального Семячика под микроскопом в одном николе (ЦС-4/20)

Показатели прочностных и деформационных характеристики этого образца являются минимальными для всего описанного ряда, что весьма закономерно, при его величине пористости и особенности строения.

Более детально основные характеристики образцов из описанного ряда изменения представлены в таблице 6.

Показатели физических и физико-механических свойств андезибазальтов и опалитов с

Верхнего термального поля вулкана Бурлящий

Степень изменения	№ образца	Количество проб	Значения	ρ	ρs	n	Wπ	no	Vp	Vs	Е дин	Rc	Rp	χ
				Γ/cM^3	Γ/cM^3	%	%	%	KM/C	KM/C	ГПа	МПа	МПа	CM^* 10 ⁻³
Неизмененный андезибазальт	ЦС-1/20	8	Среднее	2,90	3,01	3,5	0,2	0,6	5,3	2,6	54,4	157,4	14,6	21,1
			Мин.	2,89	3,01	2,7	0,1	0,3	4,2	2,0	50,6	138,7	11,6	16,5
			- Макс.	2,93		4,0	0,4	1,2	5,8	3,0	- 67,5	176,2	- 17,7	24,5
	ЦС-2/20	8	Среднее	2,61	2,90	9,9	1,6	4,2	3,9	2,1	30,3	55,1	9,3	26,9
			Мин.	2,58	2,90	8,9	1,4	3,7	3,5	1,6	18,4	37,2	8,3	19,3
			- Макс.	2,64		- 11,1	2,0	5,1	- 4,6	2,4	40,0	73,2	10,3	35,0
)пализированный андезибазальт	ЦС-8/20	9	Среднее	2,66	3,01	11,6	0,6	1,6	4,3	2,2	36,0	95,1	8,5	14,1
			Мин.	2,60	3,01	10,0	0,4	1,1	3,8	1,9	27,6	88,4	8,3	10,6
			- Макс.	- 2,71		- 13,6	_ 0,9	- 2,3	- 4,5	_ 2,5	- 42,8	- 102,7	- 8,7	- 16,8
Опалит с псевдоморфной структурой	ЦС-7/20	10	Среднее	1,56	2,20	29,1	11,7	17,6	2,8	1,5	9,5	16,6	2,0	0,06
			Мин	1 3 2	2,20	10.1	3.8	67	23	1.2	5.0	15.1	15	0.04
			- -	-		-	- -	- 20.7	2,5 - 2,5	1,2 - 1.0	- 15 7	-	- 2 4	0,04 - 0.06
		12	макс.	1,70		39,0	22,4	29,7	3,5	1,9	13,7	10,2	2,4	0,00
	ЦС-6/20		Среднее	1,40	2,17	35,7	18,6	25,1	2,5	1,4	7,1	21,7	2,2	0,38
			Мин.	1,22	2,17	26,6	9,0	13,8	2,1	1,2	5,1	17,8	1,6	0,06
			- Макс	- 1.59		- 43.7	- 29.3	- 35.8	-	- 1.7	- 10.9	- 25.6	- 2.5	- 1.71
			THURE.	,		-).	-)-) -	, -	, .	-)-	-) -	,	, ·
Опалит с колломорфной структурой	ЦС-3/20	12	Среднее	1,24	2,21	43,8	31,7	34,1	2,2	1,2	5,2	11,9	1,3	0,06
			Мин.	0.85	2,21	28,7	12.9	19.5	1.5	0.9	1.7	6.5	0.9	
			- Marce	-		- 63.4	- 70.6	- 57.1	- 2 8	- 17	- 10 4	-	- 19	0,06
			IVIAKC.	1,50		05,4	70,0	57,1	2,0	1,7	10,4	17,0	1,9	
	ЦС-4/20	19	Среднее	1,07	2,19	51,3	29,1	28,8	1,3	0,68	1,31	3,3	0,66	0,06
			Мин.	0,79	2,19	43,4	12,3	14,9	0,9	0,5	0,61	2,0	0,4	
			- Макс	- 1,24		- 63.8	- 60.7	- 53.2	- 2,2	-0.9	- 2,50	- 5.8	- 0.9	0,06
				*			,	ý	,	,	ŕ	,	,	

Для более наглядной демонстрации информации из табл. 6 был составлен ряд гистограмм, отражающих динамику изменения различных свойств в процессе опализации на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика (рис. 108).



Рис. 108. Изменение свойств (а – плотности, б – плотности твердых частиц, в – пористости, г – скорости продольных волн, д – динамического модуля упругости, е – прочности на одноосное сжатие) в процессе опализации на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика

Отчетливо видно, что, как и на предыдущих рассмотренных термальных полях, на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика в процессе опализации

снижается плотность пород (с 2,90 г/см³ до 1,07 г/см³), а у отдельных проб она достигает величины 0,79 г/см³ (рис. 108а). Основной причиной такого снижения также служит увеличение пористости за счет активного кислотного выщелачивания. Пористость в процессе опализации на данном термальном поле достигает 51,4 % у самого измененного образца, а у отдельных проб - 63,8% при исходной пористости неизмененных андезибазальтов в 3,5% (рис. 108в). В отличие от предыдущих рассмотренных термальных полей, здесь процесс гидротермального преобразования протекает более односторонним образом, в результате чего можно наблюдать более закономерную картину изменения плотности твердых частиц. Для первых трех образцов, представляющих неизмененные или слабоизмененных вулканитов среднего и основного составов, а для последующих четырех образцов, представляющих собой опалиты различной степени преобразованности, она изменяется от 2,17 г/см³ до 2,21 г/см³, что объясняется всьма однородным минеральным составом, который приблизительно на 90% представляен опалом (рис. 1086).

Физико-механические свойства при увеличении степени опализированности пород закономерно снижаются, за исключением образца ЦС-8/20 (третьего в выделенном ряду). Для показателей как деформационных, так и упругих свойств он превышает по показателям менее измененный предыдущий образец ЦС-2/20, однако в данном случае этот факт объясняется специфической пористой текстурой образца ЦС-2/20, которая была описана ранее и явно оказывает влияние на показатели физико-механических свойств. В остальном скорости продольных волн (рис. 108г) в процессе опализации снижаются в 4 раза (с 5,33 км/с до 1,32 км/с), динамический модуль упругости (рис. 108д) падает более чем в 40 раз (с 54,4 ГПа до 1,31 ГПа), а прочность на одноосное сжатие (рис. 108е) снижается приблизительно в 47,5 раз (со 157,4МПа до 33,3 МПа). При этом водонасыщение не оказывает значительного влияния на прочностные свойства, и все опалиты оказываются неразмягчаемыми.

Схожим с предыдущими рассмотренными рядами образом оказываются взаимосвязаны отдельные показатели свойств между собой (рис. 109). Согласно полученным корреляционным зависимостям, показателем, во многом определяющим величину прочностных и деформационных свойств образцов различной степени измененности, является пористость, увеличивающаяся в процессе опализации. Интересной для рассмотрения является также взаимосвязь общей и открытой пористости (рис. 109а). Из графика отчетливо видно, что по мере опализации доля открытых пор от общего их числа достигает 80%, тогда как у неизменнного андезибазальта (ЦС-1/20) этот показатель не превышает 17%. При этом на графике отчетливо выделяется отдельное облако значений, в

котором при значениях общей пористости 45-55% величина открытой пористости находится приблизительно в пределах 15-30%. Оно сложено значениями пористостей, определенных у образца ЦС-4/20, то есть самого последнего в выделенном ряду, для которого наблюдается самое высокое среднее значение общей пористости. Такую особенность (пониженную открытую пористость) у этого образца можно объяснить изоляцией части порового пространства за счет описанного выше выпадения из раствора вторичного опала, который изменяет структуру образца на колломорфную. Для дополнительной отчетливости на этом графике стрелками отражена принципиальная последовательность изменения образцов, из которой отчетливо видна описанная выше тенденция.



Рис. 109. Зависимость различных свойств (а – открытой пористости, б – скорости продольных волн, в – динамического модуля упругости, г – прочности на одноосное сжатие) пород различной степени опализированности от пористости

4.2.3 Изменение состава, строения и свойств андезибазальтов в условиях моделируемого сернокислотного выщелачивания

В связи с тем, что процесс сернокислотного выщелачивания в природных условиях происходит весьма быстро и в реальных условиях представляется весьма затруднительным отобрать образец начальной стадии опализации, было принято решение произвести моделирование данного процесса в лабораторных условиях. Для этого, как было указано ранее, были подготовлены 20 цилиндров неизмененного андезибазальта диаметром 1,5 см с Южно-Камбального Центрального термального поля, 16 из которых были подвергнуты термической обработке в 10% растворе серной кислоты при температурах 20, 50, 100, 170°С в течение срока от 1 до 14 дней. Все образцы были сфотографированы до и после воздействия раствора кислоты (рис. 110). Все фотографии сделаны при помощи сканера Ерson Perfection 2400 при абсолютно идентичных настройках съемки как до, так и после проведения эксперимента, что позволяет корректным образом сравнивать внешний облик образцов до и после воздействия



Рис. 110. Общий вид адезибазальтов Южно-Камбального Центрального термального поля до и после взаимодействия с раствором серной кислоты

Из данного рисунка даже невооруженным взглядом отчетливо видно, что по мере увеличения температуры и длительности обработки внешний облик пород также заметно изменяется. Гораздо более контрастными становятся минералы-вкрапленники, которые в неизмененных породах являются прозрачными и поэтому практически не выделяются на фоне основной массы, а по мере увеличения интенсивности выщелачивания окрашиваются белым за счет минеральных преобразований в кристаллах. Вслед за вкрапленниками светлеет и основная масса породы. Одним из самых значимых и макроскопически заметных эффектов, наблюдаемых в образцах, подвергшихся сернокислотному выщелачиванию в лабораторном эксперименте, является неравномерное изменение и сопутствующее ему увеличение объемов основной массы породы и минералов-вкрапленников, что приводит к макроскопически заметному растрескиванию породы, которое зачастую происходит по границе вкрапленника и основной массы (рис. 111). При этом увеличение объемов самых крупных вкрапленников было заметно даже невооруженным взглядом по появлению положительного рельефа у этих вкрапленников после взаимодействия с раствором серной кислоты на абсолютно полированных гладких торцах и весьма ровных боковых поверхностях цилиндров. Микрофотографии были получены при помощи цифрового микроскопа Levenhuk DTX 90.



Рис. 111. Трещины, развивающиеся по границам вкрапленников и основной массы, в образцах опализированных андезибазальтов Южно-Камбального Центрального термального поля

Для более детального понимания последовательности и результатов минералогических преобразований в процессе экспериментальной опализации был подготовлен ряд шлифов (рис. 112) из образца неизмененного андезибазальта, а также образцов, подвергшихся обработке при 20, 50 и 170 градусах. При этом шлифы были

подготовлены из образцов в форме пластин, которые были подвергнуты абсолютно идентичной обработке, как и цилиндры при соответствующих температурах в течение 9 дней.



Рис. 112. Образцы андезибазальтов, в различной степени подверженных экспериментальной опализации, под микроскопом в одном (справа) и двух (слева) николях

Исходя из информации, полученной при помощи изучения шлифов в проходящем свете, можно утверждать, что механизм опализации, протекающий в описываемых образцах, практически полностью идентичен механизму, наблюдаемому на реальных

142

термальных полях, характеризующихся разгрузкой ультракислых термальных вод. Так, в начале сернокислотному выщелачиванию оказываются подвержены центральные части крупных вкрапленников и вулканическое стекло основной массы, а далее опализация развивается по периферийным частям крупных вкрапленников и микролитам, которые имеют более кислый состав.

Дополнительно необходимо отметить, что в связи с ограниченностью времени воздействия и объема взаимодействующего раствора (ввиду протекания эксперимента в закрытой системе) опализация развивается не равномерно по всему объему образца, а согласно основным принципам диффузионного взаимодействия твердых веществ и жидкостей. То есть в периферийной части изменения гораздо значительнее, чем внутри образцов. Так, шлифы, приведенные на рис. 112, были подготовлены именно из периферийных частей опализированных пластин. Для оценки темпов продвижения диффузионного слоя к центральным частям образцов, а также для определения влияния эксперимента на строение образцов был применен метод компьютерной томографии. Все образцы были сняты до и после воздействия раствора серной кислоты, что позволило оценить, в каком объеме образцы подвержены опализации. Так, на рис. 113 представлены результаты съемки образца, взаимодействовавшего с раствором серной кислоты в течение 14 суток при температуре 50 градусов.



Рис. 113. Томограммы образца андезибазальта, подвергшегося кислотному выщелачиванию при температуре 50 градусов в течение 14 суток

Из приведенных на рис. 113 данных отчетливо видно, что в результате проведенного эксперимента строение образца существенно изменилось. Ожидаемым образом наибольшим изменениям была подвергнута поверхностная часть образцов, формирующая в процессе реакции диффузионный слой. В максимально измененных образцах отчетливо дифференцируемая толщина этого слоя достигает 2-2,5 мм, то есть объем значительно изменненного диффузионного слоя может достигать приблизительно 40% от объема образца. Однако, как будет видно далее, изменения, вероятно, затрагивают и центральную часть породы, но в менее значительных масштабах, что приводит к радикальному снижению прочностных и деформационных свойств андезибазальтов. Вероятно, весьма значительный вклад в протекание реакции вносит растрескивание образцов из-за их неоднородного состава и различных механизмов реакций отдельных частей породы, что было описано ранее. За счет этого растрескивания значительно упрощается миграция растворов, опализирующих породу, что в свою очередь вызывает дальнейшее развитие трещиноватости, из-за чего диффузию в таких образцах невозможно описать классическими термодинамическими уравнениями.

Помимо данных об изменении строения, был получен и ряд показателей, демонстрирующих процесс изменения свойств образцов по мере протекания процесса опализации (рис. 114). Так, для всех образцов до и после воздействия раствора кислоты определялся весь стандартный набор показателей свойств, уже описанных ранее. Закономерным образом единственным показателем, который для всех цилиндров определялся только один раз, была прочность на одноосное сжатие. Однако 4 контрольные образца, которые не подвергались экспериментальной опализации, были разрушены в неизмененном виде и показали достаточно близкие значения. Таким образом, для всех остальных образцов это значение было принято за исходную величину прочности на одноосное сжатие.

Из приведенных на рис. 114 графиков отчетливо видно, что изменения свойств пород хорошо коррелируют с длительностью обработки. Наиболее отчетливые зависимости были получены для показателей снижения плотности и снижения магнитной восприимчивости, измеряющихся в процентах и определяемых как отношение разницы показателя до и после реакции к изначальной величине (*снижение плотности* = (р_{неизм}-р_{изм})/р_{неизм}).

144


Рис. 114. Изменение свойств в зависимости от длительности и температуры опализации

Из этих двух графиков видно, что скорость изменения свойств снижается со временем, что связано в основном с ростом диффузного слоя, замедляющего протекание реакции. С другой стороны, отчетливо видно, что скорость изменения свойств зависит от температуры. Например, за одинаковый промежуток времени при температуре 20°C величина снижения плотности меньше приблизительно в 3,5 раза, чем при температуре 50°C. В то же время разница для температурных ветвей 50°C, 100°C и 170°C не столь велика, что можно объяснить нелинейной зависимостью скорости химической реакции от температуры, описанной в уравнении Аррениуса. Уменьшение скорости продольных волн и уменьшение прочности на одноосное сжатие, которые были рассчитаны аналогичным

145

образом, носят несколько более хаотичный характер, особенно в области наибольших изменений. Вероятнее всего, это связано с тем, что, в отличие от двух предыдущих показателей, эти свойства в значительно меньшей степени контролируются закономерными химическими преобразованиями, а гораздо больше зависят от изменений в строении образцов. Как было показано ранее, на наиболее высоких стадиях преобразования в образцах начинают появляться системы трещин, вызванные неоднородным строением породы и особенностями процесса опализации крупных вкрапленников. В связи с этим изменение показателей прочностных и деформационных свойств в зависимости от времени обработки не образует достаточно правильной закономерности, однако в общих чертах угадывается схожий с первыми двумя графиками тренд. Вероятно, аналогичным образом изменяется и величина открытой пористости, определенная через плотность в водонасыщенном состоянии. Такой вывод можно сделать исходя из тренда изменения двадцатиградусной кривой и первых трех точек для остальных кривых. К сожалению, из-за частичного разрушения образцов, не нанесенных на график, по углам торцов не удалось достоверно определить величину их открытой пористости.

Для того чтобы нивелировать недостатки экспериментов в закрытой системе, при помощи прибора «Эксперт-001» и электрода «ЭСК-10601/7» (рис. 115) были измерены водородные показатели исходного раствора серной кислоты и всех образованных в результате протекания реакции растворов. Измерения были проведены после калибровки прибора на стандартных буферных растворах. Эти измерения, с учетом известных объемов образца и раствора в реакции, позволили определить количество прореагировавшей серной кислоты.



Рис. 115. Прибор «Эксперт-001» и электрод «ЭСК-10601/7» в процессе измерений

На основании полученных данных был составлен ряд графиков, отражающих зависимость изменения свойств образцов от количества прореагировавшей кислоты (рис. 116). Из них отчетливо видно, что на наблюдаемом участке изменения присутствует прямая корреляция изменения физических, физико-механических и магнитных свойств с количеством прореагировавшей кислоты.



Рис. 116. Изменение свойств андезибазальтов в зависимости от количества прореагировавшей H₂SO₄, отнесенной к объему образца

Как и в зависимости от длительности обработки, в зависимости от количества прореагировавшей серной кислоты, отнесенной к объему образца, снижение плотности и магнитной восприимчивости демонстрируют весьма закономерную взаимосвязь, что, вероятно, объясняется в основном прямой химической природой изменения этих показателей при изменении минерального состава. Коэффициенты детерминации на наблюдаемом участке для выявленной линейной зависимости составляют 0,96 и 0,93 для снижения плотности и снижения магнитной восприимчивости, соответственно. В то же время графики снижения прочностных и деформационных характеристик имеют несколько больший разброс (коэффициент детерминации равен 0,75 и 0,84 для снижения скоростей продольных волн и прочности на одноосное сжатие, соответственно), что объясняется лишь косвенной зависимостью физико-механических свойств от изменений в химическом и минеральном составах. Гораздо большее влияние на физико-механические свойства оказывает индуцирующаяся в результате минеральных преобразований трещиноватость, которая поначалу развивается в диффузном слое, однако впоследствии затрагивает центральные части испытываемых цилиндров.

147

Выводы к подразделу 4.2:

- Андезибазальты Верхнего термального поля вулкана Бурлящий под действием сильнокислых и ультракислых термальных вод претерпевают интенсивную опализацию, в результате которой большая часть породы оказывается замещена опалом и в значительно меньшем количестве каолинитом, причем, несмотря на отсутствие значительных различий в составе опалитов, их строение продолжает активно изменяться в процессе их дальнейшего сернокислотного выщелачивания, что в основном выражается в изменении структуры с псевдоморфной на колломорфную.
- 2. Под действием опализации изменяется не только состав и строение, но и свойства андезибазальтов Верхнего термального поля вулкана Бурлящий. У измененных пород возрастает пористость (с 5,7% у неизмененных андезибазальтов до 48% у отдельных проб наиболее измененных опалитов), снижается плотность (с 2,74 г/см³ до 1,55 г/см³), 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) свойств.
- 3. На термальном поле Северного кратера Центрального Семячика под действием ультракислых термальных вод исходные андезибазальты оказываются выщелочены таким образом, что до 98% их состава оказываются представлены SiO₂, однако в опалитах, как и на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий, прослеживается тенденция преобразования строения образцов в результате дальнейшего их изменения.
- 4. Изменение андезибазальтов на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика 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/см³ до 0,79 г/см³ у отдельных проб наиболее измененных опалитов), а прочностные и деформационные характеристики снижаются более чем в 40 раз (динамический модуль упругости достигает снижается с 54,4 ГПа до 1,3 ГПа, а прочность на одноосное сжатие с 157,4 МПа до 3,3 МПа).
- Под действием растворов серной кислоты в условиях лабораторного эксперимента андезибазальты с порфировой структурой претерпевают интенсивное растрескивание, вызванное неоднородным увеличением объема отдельных компонентов породы.
- 6. Моделирование процесса сернокислотного выщелачивания в лабораторных условиях позволяет получить ряд показателей, описывающих скорость изменения свойств пород в процессе опализации. На начальном этапе опализации величина снижения плотности, магнитной восприимчивости, а также прочности на одноосное сжатие и скорости продольных волн зависит от количества прореагировавшей серной кислоты линейным образом.

4.3. Сравнительный анализ изменений состава и свойств пород на термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик

В результате анализа всех полученных в ходе исследований данных было достоверно определено, что все рассматриваемые термальные поля образовались на вулканических постройках четвертичного возраста и, согласно представлениям ряда ученых, находятся в периферийных частях крупных кальдер. Материнские породы, подверженные гидротермальным преобразованиям, на изучаемых термальных полях весьма схожи как в отношении состава, так и в отношении их свойств. Практически все они являются андезитами и андезибазальтами (рис. 117) с порфировой структурой и массивной текстурой.





Все они обладают низкой пористостью, типичными для средних и эффузивных пород значениями плотности и высокими значениями прочностных и деформационных свойств. Таким образом, рациональным представляется процесс сравнения различных термальных полей и образующихся на них гидротермально измененных пород между собой.

На всех рассмотренных термальных полях разгружаются термальные воды, характеризующиеся различными гидрогеохимическими параметрами, наиболее важным из которых является водородный показатель (рН), который во многом контролирует образующиеся в результате взаимодействия вод с породами минеральные ассоциации. Так, Восточно-Паужетском термальном поле в результате взаимодействия на с околонейтральными слабощелочными термальными водами протекает процесс аргиллизации, в результате которого образуется ряд минералов, основными из которых являются смектиты, цеолиты и кальцит, а в меньших количествах обнаруживаются каолинит, опал, кварц. В то же время на Южно-Камбальном Центральном термальном поле за счет особенно высокой контрастности условий, при которых разгружаются как щелочные, так и кислые воды, в различных частях поля протекает процесс как аргиллизации, так и опализации, при котором в минеральном составе начинают

преобладать минералы, стабильные в кислых условиях (каолинит и опал). На термальных полях массива Большой Семячик происходит разгрузка кислых термальных вод, в результате которой также образуются опалиты. На Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий величина pH достигает 2,9, а минеральный состав измененных пород в основном представлен опалом и каолинитом, который присутствует в ощутимых количествах (до 40%, согласно данным рентгеновской дифрактометрии). Самые кислые термальные воды (рН до 1,4) разгружаются на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика, в результате чего образующиеся там опалиты представляют собой практически мономинеральные образования. Таким образом, можно сделать вывод, что при изменении кислотности среды от слабощелочной до ультракислой в первом приближении происходит изменение образующихся вторичных минералов гидротермально измененных пород от цеолитов и смектитов к каолиниту и опалу. В связи с этим фактом встает 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 гидротермальных полей и смены гидрогеохимических условий на площадях минимального размера. Весьма целесообразным для такой дифференциации оказывается применение коэффициента размягчаемости, так как в нем косвенно выражается влияние минерального состава на свойства пород, причем особенно явно на прочностные свойства. Так как на структуры, сложенные опалом, водонасыщение не оказывает значтельного влияния в отношении их прочностных свойств, в отличие от структур, сложенных глинистыми минералами, у опалитов коэффициент размягчаемости всегда оказывается выше 0,75. В то же время у аргиллизированных пород значительным образом снижаются прочностные показатели или образцы вовсе разрушаются при водонасыщении, что позволяет классифицировать их как дисперсный грунт, который и образуется в конце процесса аргиллизации и представляет из себя глинистый грунт. Таким образом, пожалуй, главным различием процессов аргиллизации и опализации является конечный продукт каждой из разновидностей гидротермальных преобразований, так, в случае аргиллизации конечным продуктом является дисперсный глинистый грунт, а в случае опализации – скальный или полускальный грунт.

Для более наглядной демонстрации сходств и различий термальных полей был составлен ряд графиков, отражающих взаимосвязи отдельных показателей свойств между собой, для образцов со всех четырех термальных полей. Первый из таких графиков отражает взаимосвязь открытой пористости с общей пористостью (рис. 118). Из него достаточно отчетливо видно, что на разных полях эта взаимосвязь достаточно близка, хотя и частично отличается. Так, для образцов с Восточно-Паужетского термального поля

150

отстутсвуют образцы с пористостью выше 30%, что связано с описанными выше особенностями процесса аргиллизации, в результате которого отдельные образцы, у которых пористость была выше этого значения, теряли при водонасыщении структурную прочность и разрушались, из-за чего достоверно определить их открытую пористость было невозможно. В то же время если оценивать угол наклона апроксимирующей прямой, то он будет наименьшим среди всех рассмотренных полей. Несколько большим углом наклона обладает линейный тренд для Южно-Камбального Центрального термального поля, далее следует Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий, и завершает этот ряд термальное поле Северного кратера Центрального Семячика, что полностью согласуется с выделенным рядом термальных полей по уменьшению среднего показателя pH разгружающихся на нем термальных вод. Несколько выделяется из общих трендов облако точек, принадлежащее образцам с Центрального Семячика, для которых характерны колломорфные структуры, то есть образовавшиеся за счет выпадения из растворов в поровом пространстве пород опала. Этот вторичный опал, с одной стороны, понижает значение общей пористости, а с другой стороны, закупоривает часть уже существующих пор, что приводит к более значительному снижению открытой пористости. А в случае отсутствия этих образцов на графике отчетливо видно, что тренд для всех остальных пород, слагающих термальное поле Северного кратера Центрального Семячика, имеет линейный характер и угол наклона к оси абсцисс является наибольшим.



Рис. 118. Взаимосвязь открытой пористости и общей пористости для образцов различной

степени гидротермальной измененности с различных термальных полей

При этом если разделить данный график на два (один для аргиллизированных образцов, а второй – для опализированных), то тенденции станут значительно более явными. Для обеих групп образцов было принято решение выделить принципиальные стадии их изменения. В качестве количественной меры степени измененности предлагается использовать пористость, так как этот показатель у массивных неизмененных андезитов и андезибазальтов со всех рассатриваемых термальных полей находится в достаточно узком диапазоне, а в процессе гидротермальных преобразований закономерно увеличивается. В то же время, как это было показано ранее, пористость тесным образом взаимосвязана с показателями физико-механических свойств (табл. 7, 8).

Таблица 7

Степень аргиллизи- рованности	Пористость, %	Основные структурно- текстурные особенности	Общий вид	Характерные показатели свойств
Неизмененные	<7%	Неизмененная порода, вторичные изменения		р=2,65-2,90 г/см ³
		отсутствуют или носят		Един=40-/0111а
		незначительный, елиничный характер		Rc=120-180 МПа
Слабо аргиллизированные	7% - 12%	Вторичные замещения		2
		заметны макро- и		-2.40.2.60 - 10.3
		микроскопически,	AL STREET	0=2,40-2,00 17CM
		сохраняют массивную	the state of the	Е _{дин} =20-40 ГПа
		текстуру, хотя локально		Rc=40-120 МПа
		могут быть значительно		
		преобразованы		
Средне аргиллизированные	12% - 20%	Макроскопически		
		заметна широко развитая	A-	р=2,20-2,40 г/см ³
		трещиноватость,		Е _{дин} =5-25 ГПа
		опрелеляющее влияние		Rc=10-50 МПа
		на свойства пород		
Сильно аргиллизированные	>20%	В строении породы		
		выделяются отдельные		$p=1.70-2.20 \text{ r/cm}^3$
		области, практически		
		полностью сложенные	A second	Е _{дин} =3-15 111а
		ГЛИНИСТЫМИ	a stranger	Rc=5-15 МПа
		размягчаемы	- to sty	

Принципиальные группы аргиллизированных образцов по степени их преобразованности

Численной границей неизмененных образцов в обоих случаях служит величина пористости 7%, а последующие деления для двух рассматриваемых процессов различаются. В случае рассмотрения аргиллизированных андезитов и андезибазальтов следующей выделяемой стадией являются слабо аргиллизированные образцы, в которых замещения заметны макро- и микроскопически, однако породы сохраняют массивную текстуру, хотя локально могут быть значительно преобразованы. Верхняя граница пористости для таких пород на исследованных образцах приблизительно составляет 12%.

Следующая стадия (12-20%) представлена средне аргиллизированными андезитами и андезибазальтами, в которых активно начинают проявляться процессы растрескивания, а сами трещины начинают оказывать определяющее влияние на свойства пород.

Завершающая стадия аргиллизации массивных вулканогенных скальных грунтов среднего и основного составов (сильно аргиллизированные) имеет пористость выше 20% и представлена значительно размягчаемыми породами, часть из которых находится на грани превращения в дисперсный грунт, а в их строении выделяются отдельные области, практически полностью сложенные глинистыми минералами, оказывающими определяющее влияние на свойства образцов в целом. Таким образом, основные принципы разделения образцов на четыре указанные группы по степени аргиллизации кратко представлены в таблице 7.

В случае ряда опализированных образцов отличаются как идентификационные признаки различных групп, так и граничные значения пористости. Идентичным является лишь выделение группы неизмененных образцов (пористость <7%), что обусловлено схожестью неизмененных эффузивных пород среднего и основного составов как на полуострове Камчатка, так и на всей планете Земля.

Второй выделяемой группой образцов являются опализированные андезибазальты (диапазон пористости 7-20%), в которых процесс кислотного выщелачивания затронул значительную часть объема, однако в составе породы все еще присутствуют первичные минералы. Стоит отметить, что, как было указано ранее, на реальных термальных полях образцы в этой стадии изменения представлены весьма скудно, так как процесс кислотного выщелачивания после его активизации достаточно быстро преобразовывает породу, из-за чего она резко изменяет свой состав.

Третьей группой в ряду опализированных андезитов и андезибазальтов являются псевдоморфные опалиты (пористость 20-40%), которые, как следует из названия, обладают псевдоморфной структурой, а первичные минералы исходных вулканогенных пород полностью замещены опалом. Псевдоморфная структура в таких образцах всегда отчетливо заметна в шлифах и чаще всего отличима на макроуровне.

153

Таблица 8

Принципиальные группы опализированных образцов по степени их преобразованности

Степень опализированности	Пористость, %	Основные структурно- текстурные особенности	Общий вид	Характерные показатели свойств	Кол-во SiO ₂ , %
Неизмененные	<7%	Неизмененная порода, вторичные изменения отсутствуют или носят незначительный, единичных характер		р=2,65-2,90 г/см ³ Е _{дин} =40-70 ГПа Rc=120-180 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		р=2,00-2,50 г/см ³ Е _{дин} 20-40 ГПа Rc=50-100 МПа	
Псевдоморфные опалиты	20% - 40%	Весьма однородная светло-серая и светло- бежевая окраска, псевдоморфная структура, однородный состав, преимущественно представленный опалом		р=1,40-2,10 г/см ³ Е _{дин} =5-20 ГПа Rc=10-40 МПа	
Колломорфные опалиты	>40%	Белые цвета, однородная колломорфная структура иногда с небольшими вторичными макропорами		р=0,80-1,40 г/см ³ Е _{дин} =1-8 ГПа R _c =2-15 МПа	♦ 98%

Завершающая выделенная группа представлена колломорфными опалитами (пористость >40%), в которых перестают выделяться псевдоморфозы по исходным породам, и как структура, так и текстура породы становится хаотично-однородной. На макроуровне такие образцы имеют белый цвет, крайне низкую плотность, что отчетливо понятно даже по ощущению тяжести образца в руке. Их образование, вероятно, связано как с дальнейшим выщелачиванием даже кремнистого скелета породы, при котором разрушается облик исходной породы, так и с частичным отложением аморфного кремнезема из термальных растворов, из-за чего данная группа и была названа колломорфными опалитами. Таким образом, основные принципы разделения образцов на четыре указанные группы по степени опализации кратко можно представить в виде таблицы 8.

Для большей наглядности выделенные диапазоны пористости были нанесены на графики (рис. 119, 121, 123), отражающие взаимосвязь пористости с рядом других показателей. В первую очередь из рис. 119 можно заметить, что основные изменения в процессе аргиллизации происходят в значительно меньшем диапазоне пористости (до 25%), а группа точек в области пористости 40% соответствует образцам, которые приблизительно в равной степени были подвержены и процессу аргиллизации, и опализации. Так как эти образцы оказались в значительной мере размягчаемыми, было принято решение все-таки отнеси их к аргиллизированным. Также немногочисленность образцов в зоне сильно аргиллизированных образцов объясняется тем, что данная группа является практически переходной между скальными (рассматриваемыми в данной работе) и дисперсными грунтами. В то же время на правом графике, составленном для опализированных образцов, отчетливо заметно описанное ранее облако точек с пониженными значениями открытой пористости при высокой общей пористости, которое образуется из-за выпадения опала из раствора, что приводит к изоляции части пор. Также на графике заметен своеобразный «пустой» промежуток общей пористости ~13-19%, в котором должны находиться частично опализированные породы, крайне редко встречающиеся на реальных термальных полях по описанным выше причинам.



Рис. 119. Графики взаимосвязи отрытой и общей пористостей для андезитов и андезибазальтов, подвергшихся процессам аргиллизации (слева) и опализации (справа)

Деформационные свойства, как это было показано ранее на примерах отдельных термальных полей, тесно связаны с величиной пористости пород. Так, из рис. 120 видно, что в общем тренды изменения динамического модуля упругости в зависимости от пористости носят весьма схожий характер, однако, как и в предыдущем рассмотренном

155

случае, наибольшим образом, хотя и не слишком значительным, из общих трендов выбивается Восточно-Паужетское термальное поле, образцы с которого демонстрируют наиболее резкое падение величин упругих свойств при не столь высоких значениях пористости (15-20%). В то же время образцы с Южно-Камбального термального поля демонстрируют схожие с Восточно-Паужетским полем тренды в описанной выше области, а также отдельные точки располагаются в области наибольших значений пористости (50-60%), характерных для опалитов, что объясняется двоякостью процессов гидротермальных преобразований на этом термальном поле, описанной ранее. При этом зависимости, вероятно, носят экспоненциальный характер и характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации ($\mathbb{R}^2 > 0,73$), который закономерно возрастает тем сильнее, чем более кислые термальные воды разгружаются на том или ином поле. Вероятно, это можно объяснять наибольшей однонаправленностью процессов гидротермальных преобразований в кислых условиях.



Рис. 120. Зависимость динамического модуля упругости от пористости для образцов различной степени гидротермальной измененности с различных термальных полей

При разделении на два данных, приведенных на этом графике, аналогичным предыдущему разу способом также становится возможным получение некоторых выводов (рис. 121). Отчетливо видно, что для ряда, иллюстрирующего процесс опализации,

характерна гораздо более отчетливая зависимость динамического модуля упругости от пористости. Вероятно, это можно объяснить большей однородностью преобразования пород в процессе опализации, в отличие от процесса аргиллизации, при котором в образцах возникает особенно высокое количество трещин, неоднородность распределения которых в образце во многом вызывает повышенный разброс численных показателей деформационных свойств. При этом для опализированных образцов отчетливо видны несколько отличающиеся тенденции изменения у образцов с различных термальных полей, особенно в наиболее многочисленной области псевдоморфных опалитов. Судя по наличию хоть и близких, но явно отличающихся ветвей в этой области, можно предположить, что эта зависимость также во многом контролируется некоторыми различиями в составе и строении опалитов, образующихся в различных гидрогеохимических обстановках.





Рис. 121. Графики взаимосвязи пористости и динамического модуля упругости для андезитов и андезибазальтов, подвергшихся процессам аргиллизации (слева) и опализации (справа)

Изменение прочностных свойств гидротермально измененных пород на различных термальных полях происходит схожим с деформационными характеристиками образом. Выделенные тренды изменения прочности на одноосное сжатие от пористости (рис. 122) изменяются по экспоненциальному закону. Аналогично предыдущей рассмотренной зависимости показатели прочности и пористости изменяются схожим образом для всех полей, кроме Восточно-Паужетского, которое особенно явно выделяется на данном графике. Вероятно, такие различия можно объяснить тем фактом, что в процессе аргиллизации происходит достаточно интенсивное растрескивание пород, а в случае опализации порода изменяется более однородно, что заметно даже макроскопически по выделенным ранее рядам изменения на термальных полях. Таким образом, неоднородности в виде трещин играют значительную роль в снижении прочностных характеристик аргиллизированных пород. Как и в случае с динамическим модулем упругости, выделенные тренды для всех полей характеризуются наличием тесных корреляционных связей ($\mathbb{R}^2 > 0.80$).





Рис. 122. Зависимость прочности на одноосное сжатие от пористости для образцов различной степени гидротермальной измененности с различных термальных полей

В случае аналогичного уже дважды приведенному ранее разделению данных на два графика для образцов, подвергшихся аргиллизации и опализации, для зависимости прочности на одноосное сжатие от пористости также выделяется ряд показательных тенденций (рис. 123). Так, в случае аргиллизации по различию в тенденциях изменения для двух рассматриваемых термальных полей заметно, что падение прочности при увеличении пористости у образцов с Южно-Камабльного Центрального термального поля происходит значительно более плавно. Отчетливо видно, что при аналогичных значениях пористости у аргиллизированных образцов с Южно-Камбального Центрального термального поля происходит у аргиллизированных образцов с Южно-Камбального Центрального термального поля факт можно объяснить различиями в гидрогеохимических условиях и, следовательно,

возникающих различиях в минералогических ассоциациях в образцах с двух рассматриваемых термальных полей.



Рис. 123. Графики взаимосвязи пористости и прочности на одноосное сжатие для андезитов и андезибазальтов, подвергшихся процессам аргиллизации (слева) и опализации (справа)

Выводы к подразделу 4.3:

- Гидротермальные преобразования, протекающие на термальных полях Паужетско-Камбального района и массива Большой Семячик, различаются по характеру изменения как состава, так и свойств исходных вулканогенных пород, хотя на начальных этапах преобразования тенденции изменения свойств во многом схожи. Процесс опализации приводит к значительно более закономерному изменению свойств пород, из-за чего все зависимости, полученные для ряда опалитов, характеризуются более тесной корреляционной связью.
- 2. Для выделения отдельных групп измененных пород в процессе как аргиллизации, так и опализации наиболее целесообразным количественным показателем представляется пористость, увеличивающаяся в процессе гидротермальных преобразований, отдельные значения которой приблизительно отражают момент принципиальной трансформации состава и строения изменяемых пород. Для процесса аргиллизации за такие значения пористости приняты 7%, 12% и 20%, а для процесса опализации – 7%, 20% и 40%.

На основании данных, полученных о процессах аргиллизации и опализации, были составлены <u>первое и второе защищаемые положения</u>:

- 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 структурнотекстурные 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 в колломорфной структурой, соответственно.

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 процесс гидротермальных преобразований весьма чувствителен к изменению гидрогеохимических условий. В связи с их высокой динамичностью на термальных полях, а в частности Южно-Камбальном Центральном термальном поле, протекают процессы как аргиллизации, так и опализации. А эти процессы можно представить в виде сочетания выщелачивания, замещения и новообразования минералов. Так, в полостях пород на Южно-Камбальном Центральном термальном поле образуются как карбонаты (Рычагов и др., 2021), так и минералы кремнезема (опал, халцедон, кристобалит, кварц).

В процессе полевых работ на Южно-Камбальном Центральном термальном поле в 2019-2022 годах были отобраны несколько образцов андезибазальтов, в которых располагалось множество миндалин, заполненных в основном белыми прозрачными и непрозрачными минералами (рис. 124).



Рис. 124. Минадалины в образце андезибазальта с Южно-Камбального Центрального термального поля

Андезибазальты, вмещающие описываемые миндалины, практически полностью аналогичны образцам ЮКЦ-1/22-1 и ЮКЦ-1/21. На рис. 124 отчетливо видно, что миндалины окружены светло-желтой зоной измененных исходных пород. Для детального изучения состава как самих миндалин, так и приминдальных измененных зон было

подготовлено несколько прозрачно-полированных шлифов, захватывающих миндалину, приминдальную измененную зону и следующую за ней исходную породу (рис. 125, 126).



Рис. 125. Общий вид миндалины, приминдальной зоны и исходной породы в шлифе при одном (сверху) и двух (снизу) николях

Из рис. 125 отчетливо видно, что по мере приближения к миндалине порода значительным образом изменяется, что видно и в одном, и в двух николях. По характеру преобразований заметно, что в приминдальной зоне развивается процесс опализации, в результате которого в скрещенных николях порода заметно темнеет, так как опал изотропен. Характер опализации полностью аналогичен описанному выше для пород с Южно-Камбального Центрального термального поля. В зоне опализации вокруг миндалины наблюдается ряд концентрических трещин, окружающих саму миндалину. По большей части эти трещины заполнены пиритом. Подобная картина наблюдается во всех изученных шлифах (рис. 126) и подтверждается микрозондовыми исследованиями.



Рис. 126. Общий вид миндалины, приминдальной зоны и исходной породы в электронном микроскопе (сверху) и проходящем свете при одном (посередине) и двух (снизу) николях

Оба образца (рис. 125, 126) изменены аналогичным образом, а по данным микрозондового исследования удалось подтвердить как характер гидротермальных преобразований, так и состав минералов, слагающих миндалину. Периферийная часть миндалин в обоих образцах сложена опалом (рис. 127), далее, ближе к центру, начинает развиваться преимущественно кристобалит и халцедон, а в центральной части располагаются кристаллы кварца.





Строение периферийной части миндалин представляет особенный интерес, так как отражает особенности гидрогеохимической обстановки, при которых формировалась миндалина. В одном из образцов (рис. 127) периферийная часть миндалины была представлена опалом, который в виде глобулей нарастал на вытянутых игольчатых кристаллах зеленого цвета. В результате проведения микрозондовых исследований данный минерал был определен как феррофенгит (разновидность мусковита, близкая к селадониту). При этом селадонит описывается как один из наиболее распространенных в аргиллизированных породах низкотемпературных минералов, образованию которого способствует обогащенность субстрата железом И окислительный характер минералообразования в приповерхностных условиях (Метасоматизм и метасоматические породы, 1998).

Особый интерес представляет вопрос о том, каким образом изменяются свойства пород на профиле неизмененная порода – опализированный участок – миндалина. Для получения ответа в образце была выбрана одна из наиболее крупных миндалин, и из нее по обозначенному профилю были выбурены 6 цилиндров (рис. 128) и еще один цилиндр из более крупной миндалины, однако менее удачно расположенной в породе, из-за чего не представлялось возможным произвести вокруг нее выбуривание по профилю. В результате были получены 3 цилиндра макроскопически почти идентичного неизмененного андезибазальта, 3 цилиндра опализированного в разной степени андезибазальта с различиным, постепенно возрастающим слева-направо соотношением объема вмещающей породы к объему миндалины и цилиндр, полностью сложенный вторичными минералами кремнезема из миндалины. На этих цилиндрах были измерены величины плотности в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях, водопоглащение, открытая пористость, скорости продольных и поперечных волн, коэффициент Пуассона, динамический модуль упругости и прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии.



Рис. 128. Миндалина в андезибазальте с Южно-Камбального Центрального термального поля до и после выбуривания из нее цилиндров и сами цилиндры

Первыми тремя анализируемыми показателями являются плотности в воздушносухом и водонасыщенных состояниях, а также связанная с ними открытая пористость. На рис. 129 отчетливо видно, что плотность как в сухом, так и водонасыщенном состоянии для первых двух образцов практически идентична, затем немного снижается на третьем цилиндре, причем незначительную степень его изменения видно и макроскопически. На цилиндре №4 плотность в воздушно-сухом состоянии резко снижается с 2,72 г/см³ до 2,39 г/см³. Для всех последующих цилиндров наблюдается плавный рост, завершающийся на значении 2,57 г/см³ у образца, полностью сложенного вторичными минералами миндалины.



Рис. 129. Гистограмма изменения плотности в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях по профилю с рис. 128

При этом тренд изменения плотности в водонасыщенном состоянии абсолютно аналогичен описанному для воздушно-сухих образцов, за исключением того, что у цилиндров 4-6 она повысилась на 0,07-0,08 г/см³, что позволило рассчитать величину открытой пористости (рис. 130). Она для образцов 1-3 и 7 практически равна нулю, а у цилиндров, выбуренных из области, затронутой опализцацией, имеет максимальное значение у цилиндра номер 4, а затем постепенно снижается. Это, вероятно, связано с тем, что в цилиндрах 5 и 6 постепенно возрастает содержание новообразованных минералов миндалины, что уменьшает пористость.



Рис. 130. Гистограмма изменения открытой пористости по профилю с рис. 128

Далее интересные результаты были получены в отношении деформационных свойств (рис. 131). Динамический модуль упругости, полученный расчётным методом из плотности и скоростей упругих волн, изменяется по профилю схожим с плотностью образом. Первые три цилиндра имеют практически идентичный модуль (18,9 – 19,9 ГПа), далее происходит резкое падение величины деформационных свойств, которое сменяется плавным ростом с 4 по 6 образец и завершается максимальным значением в 20,4 ГПа у образца, отображающего свойства миндалины.



Рис. 131. Гистограмма изменения динамического модуля упругости по профилю с рис. 128

Прочностные свойства, а в частности прочность на одноосное сжатие, изменяются аналогичным образом (рис. 132). Различия трендов относительно плотности и динамического модуля упругости выражаются лишь в том, что цилиндр №3 показывает ощутимое снижение прочности относительно первых двух, что можно объяснить наличием минимального количества вторичных изменений, которые так или иначе оказывают влияние на прочность. Минимальное значение прочности достигается не образцом №4, а образцом №5, что, вероятнее всего, связано со специфическим строением цилиндра и особой формой границы вмещающей породы и миндалины, по которым и происходило разрушение образцов 4-6.



Рис. 132. Гистограмма изменения динамического модуля упругости по профилю с рис. 128

Несколько особый характер изменения в описываемом профиле имеет величина магнитной восприимчивости (рис. 133). В несколько упрощенном виде в этом изменении можно выделить 3 четких ступени. Первая ступень представлена первыми тремя образцами, которые имеют высокие значения магнитной восприимчивости, характерные для неизмененных андезибазальтов. Вторая ступень представлена образцами 4-6, в которых магнитная восприимчивость колеблется в пределах 1,5 – 3,5 СИ*10⁻³, однако весьма вероятно, что эти данные являются несколько завышенными, так как из-за небольшой площади торца исследуемых цилиндров образуется весьма высокий поправочный коэффициент, который преобразует даже сверхмалые измеренные значения в наблюдаемые нами. В основном сомнения связаны с тем фактом, что опалиты с термальных полей Большого Семячика при схожем строении обладали практически нулевой магнитной восприимчивостью. Истинно нулевые значения были получены для цилиндра №7, который полностью состоит из немагнитных минералов.



Рис. 133. Гистограмма изменения магнитной восприимчивости по профилю с рис. 128

167

При этом особый интерес вызывает само строение миндалин. Если более детально взглянуть на рис. 124, то можно обнаружить, что несколько миндалин представляют собой специфические агрегаты с отчетливо выделяющимся концентрическим полосчатослоистым рисунком (рис. 134). Как уже было сказано ранее, при помощи микрозондового анализа было достоверно установлено, что миндалины сложены различными минералами кремнезема, что дает возможность определить подобные образования с концентрической слоистостью как агаты. Однако, согласно господствующей гипотезе, в таких молодых толщах, как вершинные части постройки Камбального хребта, агаты не образуются. Для более детального взгляда на этот вопрос необходимо понять, что именно современное научное сообщество понимает под термином «агат» и какие существуют теории их образования.



Рис. 134. Миндалина с концентрическим полосчатым рисунком

Согласно определению, приведенному в Геологическом словаре (2010), агат – это скрытокристаллическая, тонковолокнистая разновидность халцедона, имеющая полосчатую или пятнистую текстуру, а также различные декоративные включения. Также не сформировано единое мнение относительно условий и механизмов их образования (Liesegang, 1915; Годовиков и др., 1987; Heaney, Davis, 1995; Кантор, 2006; Zenz, 2009; Спиридонов и др., 2014; Кигай, 2017; Götze et al., 2020; Moxon, Palyanova, 2020).

Сам термин «агат», вероятно, происходит от названия реки Ахатес (совр. р. Дирилло), расположенной на Сицилии. Первое упоминание агатов в литературе связано с

древнегреческим философом Теофрастом (IV-III в. до н. э.) и его трактатом «О камнях», в котором он описывает красоту и дороговизну агатов.

Существует множество гипотез образования агатов, которые можно условно разделить на три группы. Первой и самой древней гипотезой образования агатов, которой придерживается большая часть научного сообщества и сам автор, является «гипотеза протекания», согласно которой агаты образуются в полостях пород вследствие кристаллизации из протекающих по ним растворов кремнезема. Второй рассматриваемой гипотезой является так называемая «гипотеза созревания», выдвинутая Р. Лизегангом в начале XX века после открытия им эффекта периодического осаждения различных соединений в условиях диффузии в гелях (кольца Лизеганга). Эта гипотеза, хотя и имеет ряд сторонников, все же плохо подходит для объяснения генезиса всего многообразия образцов агатов, так как хорошо описывает теоретический механизм образования «идеального» агата с ровными концентрическими слоями различных оттенков и слабо подходит для объяснения агатов с чередованием облекающего и ониксового типов слоистостей (рис. 135), а также ряд других явлений, наблюдающийся в образцах агатов «не эталонного» строения.



Рис. 135. Агат с сочетанием облекающей и ониксовой слоистости

Третьей рассматриваемой гипотезой является гипотеза непосредственной кристаллизации расплавленного кремнезема в лавах в момент их излияния, то есть

одновременно с вмещающими породами. Такой точки зрения на рассматриваемый вопрос придерживается меньшее количество исследователей, но она все же существует, несмотря на то, что при всем обилии различных современных извержений вулканов по всему миру, не было обнаружено ни одного образца современных лав с миндалинами, заполненными какими-либо модификациями минералов кремнезема.

Многие ученые связывают происхождение агатов с толщами метавулканитов возрастом от миоцена до раннего протерозоя, которые в процессе геологического развития были подвержены региональному низкоградному метаморфизму (T=90-220°C, P=1-5 кб) цеолитовой фации (Спиридонов и др. 2014). В современных вулканитах, в том числе и на действующих термальных полях, агаты ранее не отмечались.

Таким образом, можно утверждать, что на Южно-Камбальном Центральном термальном поле образуются агаты, характеризующиеся особой высокодинамичной слоистостью (рис. 136), возраст которых не превосходит 235 тысяч лет (время заложения Камбального хребта, по данным Давыдовой и др., 2022), что позволяет классифицировать их как новый генетический тип (Большаков, 2021б).



Рис. 136. Молодые агаты с Южно-Камбального Центрального термального поля

Из нескольких образцов агатов были подготовлены прозрачно-полированные шлифы, на которых был детально исследован состав этих образований, а также отдельных включений. В результате было выяснено, что агаты сложены исключительно минералами кремнезема (рис. 137), а включения в большинстве своем представлены пиритом и его модификацией – марказитом.



Рис. 137. Молодой агат, снятый при помощи растрового электронного микроскопа, с нанесенными точками и результатами микрозондовых исследований отдельных слоев

Подготовленные шлифы были изучены в проходящем свете. Исследования показали, что изучаемые образцы обладают классическим для агатов строением и по большей части сложены халцедоном и кварцем. Слоистое строение агатов отчетливо прослеживается под микроскопом как при одном, так и при двух николях (рис. 138). Прослои халцедона имеют толщину от 50 до 500 мкм и периодически чередуются с кварцевыми прослоями, состоящими из зерен, достигающих размера 500 мкм в поперечнике. Соотношение халцедоновых и кварцевых прослоев в отдельных образцах различно.



Рис. 138. Молодой агат Южно-Камбального Центрального термального поля в шлифе (слева н+, справа н-)

Важно отметить, что выше рассматриваются образцы Южно-Камбального Центрального термального поля из-за того, что они являются наиблее показательными и были наиболее детально изучены. В процессе работ на различных термальных полях (Паужетско-Камбального района, массива Большой Семячик и Дачных термальных полях) также были обнаружены агаты (Большаков и др. 2021) в виде как вывалов на поверхности полей, так и непосредственно в породах, хотя такие образцы встречались гораздо реже. При этом вмещающие породы не обязательно оказываются представлены слабо измененными андезибазальтами с измененной каймой вокруг миндалины. На Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий были отобраны образцы агатов, залегающих в полностью преобразованном опалите. Таким образом, вероятно, агаты на термальных полях образуются путем выпадения кремнезема из пересыщенных растворов при смене гидрогеохимических условий в процессе их фильтрации по разрезам термальных полей. Согласно такому представлению, несущественной является стадия преобразования вмещающей породы, а определяющее влияние оказывает смена гидрогеохимических параметров раствора при его фильтрации по этим породам.

Выводы к главе 5:

- 1. В процессе гидротермальных преобразований, а в частности опализации, может происходить разнонаправленное воздействие термальных вод на породы, проявляющееся в изменении как строения, так и свойств пород, при котором на расстоянии в несколько сантиметров могут протекать процессы как выщелачивания, так и отложения новых минералов.
- 2. В результате разнонаправленного воздействия термальных растворов на строение андезибазальта аналогичным образом изменяются и свойства на минимальных расстояниях, что проявляется сначала в понижении плотности (с 2,72 г/см³ до 2,39 г/см³), прочностных (прочность на одноосное сжатие снижается с 205,6 МПа до 52,7 МПа) и деформационных (динамический модуль упругости с 19,9 ГПа до 12,2 ГПа) характеристик, а затем в значительном их же возрастании до приближенных к исходным значений.
- 3. На современных термальных полях, располагающихся на вулканических постройках четвертичного возраста, путем кристаллизации минералов кремнезема из термальных растворов образуются агаты со специфической, высокодинамичной слоистостью, возраст которых значительно меньше всех ранее известных разновидностей и которые можно рассматривать как новый генетический тип.

Таким образом, в результате анализа приведенных данных было сформулировано <u>третье защищаемое положение:</u> 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.

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

Термальные поля являются крайне высокодинамичными геологическими характеризующимися изменчивостью системами, значительной геохимических. геофизических, геологических и инженерно-геологических параметров. На небольших площадях происходят резкие изменения параметров флюидов, а также самих горных пород. Если определение таких параметров, как водородный показатель, температура или показателей, характеризующих различные геофизические поля, возможно произвести достоверно и за короткий срок в полевых условиях, то изучение свойств горных пород чаще всего требует отбора крупных образцов, их последующей доставки в лабораторию и длительной дальнейшей подготовки к испытаниям. Эти обстоятельства зачастую не позволяют с желаемой детальностью изучить изменчивость грунтов, а также их свойств в пространстве на термальных полях, так как отбор и транспортировка значительного количества крупных образцов становятся весьма затруднительными. В связи с этим на термальных полях крайне остро стоит вопрос применимости экспресс-методов, позволяющих в полевых условиях достоверно оценить степень изменения породы, а также величину показателей свойств измененных пород. В данной работе на трех различных термальных полях опробованы два косвенных экспресс-метода, позволяющие определять показатели физических и физико-механических свойств скальных грунтов различной степени гидротермальной преобразованности.

В качестве экспресс-методов оценки свойств скальных грунтов на термальных полях, как это было указано выше (см. главу 3), были применены определение высоты упругого отскока при помощи молотка Шмидта (RGK SK-60) и определение содержания кремния с помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра (Olympus Vanta M, ИФЗ РАН).

Применение молотка Шмидта для косвенной оценки пористости и показателей физико-механических свойств гидротермально измененных пород

Особенный интерес представляет метод определения высоты упругого отскока при помощи молотка Шмидта, так как его применение стандартизировано в Российской Федерации для бетонов (ГОСТ 22690-88), а за рубежом - и для горных пород (ASTM D 5873-05). Стоит отметить, что оптимальной методикой применения данного метода является отбор «базовой» коллекции образцов, для которых в лаборатории стандартными методами определяются все необходимые параметры свойств, а обнажения, из которых происходил отбор данных образцов, испытываются при помощи молотка Шмидта. В результате из полученных данных происходит построение корреляционных зависимостей,

которые в дальнейшем могут применяться для экспресс-оценки свойств на обнажениях аналогичных пород. В связи с этим в научном мире существует значительное количество публикаций, демонстрирующих множество уравнений корреляционных зависимостей, полученных для различных горных пород (Большаков и др. 20236; Фролова и др., 2023а; Фролова и др. 20236; Katz et. al., 2000; Aydin, Basu, 2005; Karaman, Kesimal, 2015). Аналогичный алгоритм действий следует применять и для метода определения содержания кремния с помощью портативного рентгенфлуоресцентного спектрометра. Более детально методика применения молотка Шмидта и рентгенфлуоресцентного спектрометра была рассмотрена выше. Стоит отметить, что в научном мире существуют публикации, описывающие применение молотка Шмидта для определения отдельных параметров гидротермально измененных вулканогенных пород. Так, в статье новозеландских исследователей (Mordensky et. al., 2018) описываются результаты применения молотка Шмидта для определения величины проницаемости измененных пород вулкана Руапеху. В результате проделанных работ исследователи пришли к выводу, что достоверное определение абсолютной величины проницаемости при помощи молотка Шмидта произвести невозможно, однако метод упругого отскока оказывается крайне эффективным для приблизительной и быстрой полевой оценки данного параметра, так как наблюдается явная корреляция величины упругого отскока и величины проницаемости, определенной при помощи полевого прибора непосредственно на том же обнажении.

Указанные методы применялись на всех исследованных термальных полях, за исключением Восточно-Паужетского, так как на нем отбор образцов производился из скважин, а на самом поле практически отсутствовали обнажения, которые можно было бы использовать для испытания молотком Шмидта.

Наибольшее количество образцов из обнажений было отобрано на Южно-Камбальном Центральном термальном поле, а следовательно, и наибольшее количество проведенных определений экспресс-методами также было выполнено именно там. В результате анализа полученных данных был построен ряд графиков, демонстрирующих взаимосвязь величины высоты упругого отскока (R_N) и различных показателей строения и свойств (пористости, скорости продольных волн и прочности на одноосное сжатие). В результате было выявлено, что имеет место тесная корреляционная связь величины упругого отскока с указанными показателями на Южно-Камбальном Центральном термальном поле (рис. 139).

В процессе построения данных зависимостей были опробованы различные условия проведения линии тренда. В качестве наиболее подходящей аппроксимирующей зависимости выбиралась та, коэффициент детерминации для которой имел наибольшее

значение. Так, зависимость высоты упругого отскока от пористости наилучшим образом аппроксимировалась степенной зависимостью, взаимосвязь упругого отскока и скорости продольных волн – линейной функцией, а упругого отскока и прочности на одноосное сжатие – степенной.



Рис. 139. Взаимосвязь высоты упругого отскока и различных показателей свойств пород Южно-Камбального Центрального термального поля: а – пористости, б - скорости распространения продольных волн, в - прочности на одноосное сжатие (стрелками показаны диапазоны разброса значений показателя)

Как будет показано далее, выбор именно таких аппроксимирующих зависимостей оказался оптимальным и для других исследованных термальных полей. Так как каждая точка на графике отражает положение среднего арифметического как высоты упругого отскока (из 20 определений), так и показателя свойств (от 1 до 18 определений), для большей наглядности на графиках в виде двунаправленных стрелочек нанесены диапазоны разброса указанных значений.

Пожалуй, основной выявленной взаимосвязью является корреляция пористости с высотой упругого отскока (рис. 139а), коэффициент детерминации для которой равен 0,86. Также, весьма ожидаемо, присутствует и достаточно тесная взаимосвязь высоты упругого отскока с показателями прочностных и деформационных свойств пород (рис. 1396, 139в). Это связано с описанной ранее зависимостью прочностных и деформационных характеристик пород различной степени гидротермальной преобразованности от пористости на Южно-Камбальном Центральном и других термальных полях.

Аналогичные описанным выше данные были получены и для Верхнего термального поля вулкана Бурлящий (рис. 140). Основным отличием, пожалуй, является несколько меньшее количество образцов, что обусловлено значительно большей труднодоступностью массива Большой Семячик. В остальном методика как отбора образцов и испытаний, так и последующей интерпретации данных полностью совпадала с описанной выше для Южно-Камбального Центрального термального поля. Так, на рис. 140 приведены графики, отражающие взаимосвязь высоты упругого отскока с различными показателями свойств.

Как и в случае Южно-Камабльного Центрального термального поля, наиболее отчетливая взаимосвязь наблюдается с величиной пористости (R²=0,90). А взаимосвязь с прочностными и деформационными характеристиками можно объяснить наличием зависимости этих свойств от пористости, что было показано ранее. Несмотря на то что образцы с Верхнего термального поля вулкана Бурлящий подвержены процессу опализации, а не аргиллизации (как на описанном выше Южно-Камбальном Центральном термальном поле), характер зависимостей остается весьма схожим. Так, для приведенных на рис. 140 взаимосвязей высоты упругого отскока с показателями физико-механических свойств тип аппроксимирующей линии тренда является аналогичным тому, что был выбран для образцов с Южно-Камабльного Центрального термального поля, а для пористости наиболее подходящей аппроксимирующей функцией оказалась экспоненциальная.





На термальном поле Северного кратера Центрального Семячика, как и на двух предыдущих термальных полях, все обнажения, от которых отбирались образцы, были испытаны при помощи молотка Шмидта (по 20 ударов). И для пород с этого термального поля данный метод также показал высокую эффективность, что выражается в тесной корреляционной связи (рис. 141) высоты упругого отскока с пористостью, а также показателями прочностных и деформационных свойств ($\mathbb{R}^2 > 0,91$).

Взаимосвязь высоты упругого отскока с пористостью, как и на двух описанных выше термальных полях, является наиболее тесной, а с прочностными и деформационными свойствами также весьма высока, однако несколько уступает пористости. В то же время можно отметить, что именно для образцов с этого термального поля наблюдаются наивысшие показатели коэффициента детерминации, в сравнении с предыдущими

178

описанными термальными полями. Вероятно, этот факт можно объяснить особенностями процесса опализации, при котором изменения хоть и протекают с большей скоростью, однако в итоге сами образцы опализированных пород характеризуются большей однородностью, в сравнении с образцами андезитов и андезибазальтов, подверженными процессу аргиллизации.



распространения продольных волн, в – прочности на одноосное сжатие) пород термального поля Северного кратера Центрального Семячика с высотой упругого отскока (стрелками показаны диапазоны разброса значений показателя)

Для большей наглядности все полученные зависимости для трех термальных полей были нанесены на общие диаграммы. В результате чего значительно более наглядно можно наблюдать сходства и различия в трендах взаимосвязей высоты упругого отскока с показателями строения и свойств. Так, результаты, демонстрирующие эффективность молотка Шмидта на всех трех термальных полях, представлены в виде ряда графиков

(рис. 142). Все представленные тренды для всех свойств характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации R^2 (> 0,81). Из приведенных графиков видно, что зависимости для образцов с Верхнего термального поля вулкана Бурлящий и термального поля Северного кратера Центрального Семячика являются крайне схожими, а для образцов с Южно-Камбального термального поля наблюдаются определенные различия, за исключением графика взаимосвязи высоты упругого отскока со скоростью продольных волн (рис. 142в), на котором все нанесенные точки образуют приблизительно одну и ту же линейную зависимость.



Южно-Камбальное центральное термальное поле

Рис. 142. Взаимосвязь пористости (а), плотности (б), скорости распространения

Вероятно, различия в трендах для термальных полей массива Большой Семячик и Южно-Камбального Центрального термального поля также объясняются различием гидрогеохимических условий на этих термальных полях и особенностями протекающих там процессов гидротермального изменения, описанных выше. Как было неоднократно
упомянуто ранее, самой важной зависимостью является зависимость высоты упругого отскока от пористости (рис. 142а), потому что практически все остальные значимые в инженерно-геологическом отношении показатели физических и физико-механических свойств тесно связаны с величиной пористости рассматриваемых образцов. Таким образом, наличие этой взаимосвязи в совокупности с приведенными ранее данными объясняет наличие других корреляционных связей с показателями физических и физикомеханических свойств.

Помимо количественной оценки свойств гидротермально измененных пород, в процессе полевых работ зачастую важным вопросом является даже качественная оценка степени измененности исследуемой породы. Для этих целей также весьма эффективным оказывается применение молотка Шмидта. Для более наглядного отображения взаимосвязи высоты упругого отскока и степени измененности пород был составлен ряд диаграмм, на которые были нанесены средние значения высоты упругого оскока для каждой из выделенных групп пород с каждого термального поля (рис. 143). На этих диаграммах отчетливо видно, что при увеличении степении измененности андезитов и андезибазальтов происходит закономерное уменьшение высоты упругого отскока. При этом данный тренд в равной степени достоверно наблюдается и у аргиллизированных, и у опализированных пород.



Рис. 143. Диаграмма изменения высоты упругого отскока в зависимости от степени измененности (а – Южно-Камбальное Центральное термальное поле; б – термальное поле Северного кратера Центрального Семячика; в – Верхнее термальное поле вулкана Бурлящий)

Использование портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра для косвенной оценки пористости и показателей физико-механических свойств гидротермально

измененных пород

Другим методом, продемонстрировавшим собственную эффективность для экспресс-оценки показателей свойств, является использование портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta M, с помощью которого было кремния определено содержание В процентах изучаемых В породах (Большаков и др. 2023б). Однако данный метод показал свою эффективность лишь для полей, на которых преобладает процесс сернокислотного выщелачивания, то есть полей массива Большой Семячик, что объясняется выщелачиванием практически всех петрогенных компонентов, кроме SiO₂, в процессе опализации, за счет чего процентное содержание Si значительно возрастает (рис. 144).

Преимуществами данного метода являются быстрота определения элементного состава и отсутствие длительной подготовки порошковых проб. Все измерения, нанесенные на график, были произведены на торцевых частях конкретных цилиндров, показатели свойств которых были определены в лаборатории. Этот факт позволяет значительно уточнить результаты эксперимента относительно порошковых проб за счет увеличенного количества изученных образцов. Однако для проверки результатов, получаемых при помощи этого прибора, из 16 образцов были подготовлены порошковые пробы, которые были исследованы на другом лабораторном спектрометре («Спектроскан MAKC-GV»). Полученные обоими методами данные показали достаточную сходимость, что свидетельствует о достоверности выявленных зависимостей (рис.144).

Отчетливо заметно, что процентное содержание кремния у пород термальных полей массива Большой Семячик тесно связано с величиной пористости, плотностью и динамическим модулем упругости. Достоверной корреляции с показателями прочностных свойств установить не удалось ввиду недостаточного количества испытаний. При этом аппроксимирующие кривые отчетливо формируют отдельные ветви зависимости, что объясняется более агрессивным процессом выщелачивания на термальном поле Северного кратера Центрального Семячика, из-за чего степень мономинеральности, вызывающая рост содержания Si, гораздо выше. При этом для образцов с Южно-Камбального термального поля никаких корреляций с элементным составом выявлено не было.



•- Южно-Камбальное Центральное термальное поле



(в) с процентным содержанием кремния в породах

183

Выводы к главе 6:

- На термальных полях, характеризующихся разгрузкой сильнокислых и ультракислых термальных вод, для косвенной экспресс-оценки свойств пород представляется целесообразным использование портативного рентгенфлуоресцентного спектрометра, позволяющего определить процентное содержание Si, которое возрастает в процессе опализации и коррелирует с показателями плотностных и деформационных свойств.
- 2. На всех термальных полях весьма эффективным методом экспресс-оценки свойств гидротермально измененных пород является молоток Шмидта, демонстрирующий высокую достоверность получаемых результатов как для аргиллизитов, так и для опалитов, хотя для некоторых показателей свойств взаимосвязи с высотой упругого отскока у разных групп измененных пород различаются.

Таким образом, на основании полученных данных было сформулировано <u>четвертое</u> защищаемое положение: 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.

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 Паужестко-Камабального района и массива Большой Семячик, имеющих четвертичный возраст, происходят активные гидротермальные преобразования, радикально изменяющие состав, строение и свойства вулканогенных пород, слагающих изучаемые районы.
- В зависимости от гидрогеохимических параметров разгружающихся флюидов итоговый продукт гидротермально-метасоматических процессов может значительно различаться и представлять собой как скальный, полускальный, так и дисперсный грунт.
- В результате разгрузки среднекислых до слабощелочных термальных вод андезиты и адезибазальты 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. Как для ряда аргиллизитов, так и для опалитов выделены основополагающие стадии изменения, отражающие принципиальные переходы в составе и строении пород, наилучшей количественной характеристикой которых является величина пористости, планомерно увеличивающаяся в процессе гидротермальных преобразований под действием обоих процессов.
- 5. Экспериментальное лабораторное выщелачивание андезибазальтов в растворе концентрированной серной кислоты дает возможность проследить последовательность преобразований опализированных пород на начальных этапах получить а также позволяет ряд численных показателей, изменения, характеризующих скорость протекания процесса опализации.
- 6. Процесс гидротермальных преобразований может оказывать двустороннее влияние на свойства вмещающих пород за счет сочетания процессов выщелачивания и новообразования отдельных минералов из пересыщенных термальных растворов.
- 7. На термальных полях четвертичного возраста в полостях вулканических пород 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 сильнокислых термальных вод – еще и портативного рентгенфлуоресцентного спектрометра, позволяющего определять величину процентного содержания кремния.

Список литературы

- Аверьев, В.В. Вулканизм и гидротермы Узон-Семячинского геотермального района на Камчатке / В.В. Аверьев, Т.Е. Богоявленская, О.А. Брайцева и др. // Вулканизм и глубины Земли: Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания, 26—31 мая 1969 г. М.: Наука. – 1971. – С. 207-211.
- Аверьев, В.В. Термальные поля вулканического массива Большой Семячик / В.В. Аверьев, Е.А. Вакин // Бюллетень вулканологических станций АН СССР. – 1966. – № 42 – С. 3-16.
- Авереьв, В.В. Вулкано-тектонические структуры Южной Камчатки / В.В. Авереьв,
 А.Е. Святловский // Известия академии наук СССР. Серия геологическая. –1961. № 6. С. 98-100.
- Аверьев, В.В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки / В.В. Аверьев // Тр. лаб. вулканологии АН СССР. – 1961. – Вып. 19. – С. 80-98.
- Белоусов, В.И. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы / В.И. Белоусов, В.М. Сугробов, Н.Г.Сугробова // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. – Владивосток: ДВНЦ. – 1976. – С. 23-58.
- 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. – 20216. – С. 69-73.
- 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. – 2021. – С. 117-120.
- 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.
- 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.

- Большаков, И.Е. Изменение состава и свойств вулканогенных пород на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий (Большой Семячик, п-ов Камчатка) / И.Е. Большаков // Инженерная геология. – 2021а. №3. – С. 40-51.
- 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. – 20236. – С. 115-118.
- Вакин, Е.А. Гидрогеология современных вулканических структур и гидротермальные системы Юго-Востока Камчатки. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. ГИН АН СССР., 1968, 24 с.
- Вакин, Е.А. Гидротермы вулканического массива Большой Семячик / Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки / Отв. ред. Сугробов В.М. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1976 С. 212-236.
- Вакин, Е.А. Общая характеристика Мутновского месторождения и прогнозная оценка ресурсов / Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко, В.М. Сугробов // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М: Наука. – 1986. – С. 6-40.
- Вакин, Е.А. Основные проблемы геотермии вулканических областей / Е.А. Вакин, Б.Г. Поляк, В.М. Сугробов // Вулканизм и глубины Земли. Материалы III Всесоюзного вулканологического совещания, 28-31 мая 1969 г. Львов. М.: Наука. – 1971. – С. 197-202.
- Влодавец, В. И. Вулканы и вулканические образования Семячинского района / В.И. Володавец // Тр. Лаб. вулканол. АН СССР. – 1958. – Вып. 15. – 197 с.
- 17. Геологический словарь: в 3 т. / гл. ред. О. В. Петров; ред.-сост.: С. И. Андреев [и др.].//
 Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010—2012.
- Гирина, О.А. Извержение вулкана Камбальный в 2017 г. / О.А. Гирина, Д.В. Мельников, А.Г. Маневич, А.А. Нуждаев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 263–267.
- 19. Годовиков, А.А. Агаты. / А.А. Годовиков, С.Г. Моторин, О.И. Рипинен // М.: Недра.
 1987. 368 с.
- 20. ГОСТ 22690-88 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
- 21. Давыдова, В.О., Биндеман И.Н., Щеклеина М.Д., Рычагов С.Н. Паужетская кальдера (Южная Камчатка): изучение временной эволюции и происхождения объемного

кислого магматизма / В.О. Давыдова, И.Н. Биндеман, М.Д. Щеклеина, С.Н. Рычагов // Петрология. 2022. – Т. 30. – № 5. – С. 480–497.

- Двигало, В. Н. Природная катастрофа и крупный аллохтон 3 июня 2007 г. в бассейне
 р. Гейзерная (Камчатский край, Россия) / В.Н. Двигало, И.В. Мелекесцев, И.Ю. Свирид // Доклады РАН. 2008.
- Дрознин, В. А. Долина гейзеров после геологической катастрофы / В.А. Дрознин, Н.И. Селиверстов // Вестник КРАУНЦ. Сер.: «Науки о Земле». 2007. – № 2. – С. 7–8.
- 24. Ерощев-Шак, В.А. Гидротермальный субповерхностный литогенез Курило-Камчатского региона / В.А. Ерощев-Шак // – М.: Наука, 1992. – 131 с.
- 25. Зеркаль, О.В. Развитие оползневых процессов в долине р. Гейзерной (Камчатка) / О.В. Зеркаль, И.П. Гвоздева, Ю.В. Фролова // Тезисы докладов III Всероссийской научной конференции с международным участием «Геодинамические процессы и природные катастрофы» Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2019. С. 138.
- 26. Кантор, Б. З. К проблеме генезиса агатов (новые данные) / Кантор Б.З. // Новые данные о минералах. М. 2006. Вып. 41. С. 145-153.
- Кигай, И.Н. Об условиях образования агатов / Кигай И.Н. // Минералогия. № 2. 2017. – С. 75-90.
- 28. Кирюхин, А. В. Использование численного моделирования для оценки эксплуатационных запасов месторождений парогидротерм (на примере Паужетского геотермального месторождения) / Кирюхин А.В., Асаулова Н.П., Манухин Ю.Ф., Рычкова Т.В., Сугробов В.М // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 1. – С. 56-76.
- 29. Крашенинников, С.П. Описание земли Камчатки, сочиненное Степаном Крашенинниковым, Академии Наук Профессором. Т. 1. СПб. 1755. 438 с.
- Курносов, В.Б. Гидротермальный литогенез. В кн: Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / В.Б. Курносов, А.Р. Гептнер, В.В. Петрова // Труды ГИН РАН, вып. 543, Леонов Ю.Г. (Ред.). М: Научный Мир. – 2004. – С. 272-306.
- Ладыгин, В.М. Гидротермальная система вул. Баранского (о-в Итуруп): Блоковая структура и интенсивность гидротермально-метасоматического перерождения пород по петрофизическим данным / В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов // Вулканология и сейсмология. 1995. № 3. С.28-44.
- Ладыгин, В.М. Гидротермально измененные вулканиты Северной Америки и их физико-механические свойства / В.М. Ладыгин, В.Н. Соколов, В.Г. Шлыков, И.П. Гвоздева // Вестник Московского университета, сер.4, геология. 1983. № 3. С. 66-76.

- 33. Ладыгин, В.М. Преобразование эффузивных пород под действием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о-в Итуруп) / В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов, Ю.В. Фролова // Вулканология и сейсмология. – 2014. – № 1. – С. 20-37.
- 34. Левина, В.И. Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке / В.И. Левина, П.П. Фирстов, В.М. Зобин // Вулканология и сейсмология. 1980. №. 2 С. 81-97.
- 35. Левинсон-Лессинг, Ф.Ю. Петрографический словарь / Ф.Ю. Левинсон-Лессинг,
 Э.А. Струве // М.: ГНТИ лит. геологии и по охране недр1963. 448 с.
- 36. Леонов, В.Л. Новые данные по Ar-Ar датированию игнимбритов Камчатки / В.Л. Леонов, И.Я. Биндеман, А.Н. Рогозин // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27—29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2008. – С. 187-196.
- 37. Леонов, В.Л. Геологические предпосылки и возможность прогноза оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров, Камчатка / В.Л. Леонов // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Труды региональной научно-технической конференции. – Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. – Т. 1. – С. 91-95.
- Леонов, В.Л. Вулканический массив Большой Семячик, Камчатка: геологическое строение, структурная позиция / В.Л. Леонов, Е.Н. Гриб // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 3-19.
- Жариков, В.А. Метасоматизм и метасоматические породы / Колл. Авторов. Ред.
 В.А. Жариков, В.Л. Русинов. // М.: Научный мир. 1998. 492 с.
- 40. Набоко, С. И. Аспекты гидротермальной проблемы / С.И. Набоко // Бюл. вулканол. ст.
 М. 1974. № 50. С. 112-118.
- 41. Набоко, С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях / С.И. Набоко. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
- 42. Набоко, С.И. Гидротермальный метаморфизм пород и минералообразование / С.И. Набоко, Г.А. Карпов, А.П. Розникова // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 76-118.
- 43. Набоко, С.И. Современный метаморфизм вулканических пород в районе Паужетских гидротерм (Камчатка) / С.И. Набоко, Б.И. Пийи // Труды лаборатории вулканологии. М., 1961. Вып. 19. С.99-114.

- Набоко, С.И. Современные гидротермальные процессы и метаморфизм вулканических пород / С.И. Набоко // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1961. – Вып. 19. – С. 12-33.
- 45. Нечаев, А. Камчатские гейзеры: гибель и возрождение /. А. Нечаев // Журнал «Вокруг света». 2007. № 10. С. 225 –. 234
- 46. Нуждаев, И.А. Магнитометрические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка) / И.А. Нуждаев, Д.К. Денисов, С.О. Феофилактов // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2019. – С. 163-166.
- 47. Нуждаев, И.А. Геофизические исследования Южно-Камбального Центрального термального поля (Камбальный вулканический хребет, Камчатка) / И.А. Нуждаев, С.О. Феофилактов, Ю.Ю Букатов, Д.К. Денисов // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы» – Петропавловск-Камчатский. – 2022. – С. 146-149.
- 48. Нуждаев, И.А. Геофизические исследования на термальных полях Камбального вулканического хребта (Южная Камчатка). / И.А. Нуждаев, С.О. Феофилактов, Д.К. Денисов // Материалы XII Международной школы по наукам о Земле имени профессора Л.Л. Перчука (ISES-2020) — Петропавловск-Камчатский. – 2020. – С. 38.
- Пампура, В.Д. Геохимия гидротермальных систем областей современного вулканизма. / В.Д. Пампура // – Новосибирск: Наука, 1985. 152 с.
- Пинегина, Т.К. Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. / Т.К. Пинегина, И.Ф Делемень, В.А. Дрознин, Е.Г. Калачева, С.А. Чирков, И.В. Мелекесцев, В.Н.Двигало, В.Л. Леонов, Н.И. Селиверстов // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 1. – С.33-45.
- Попов, В.С. Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород. / Ред. В.С. Попов, О.А. Богатиков. Учебник. М. «Логос». 2001. 768 с.
- Рычагов, С.Н., Гидротермальные глины и пирит геотермальных полей: значение в геохимии современных эндогенных процессов (Южная Камчатка) / С.Н. Рычагов, Р.Г. Давлетбаев, О.В. Ковина // Вулканология и сейсмология. – 2009. – № 2. – С.39-55.
- 53. Рычагов, С.Н. Характеристика приповерхностного горизонта гидротермальных глин Нижне-Кошелевского и Паужетского геотермальных месторождений / С.Н. Рычагов, Р.Г. Давлетбаев, О.В. Ковина, Г.П. Королева // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 2. – Вып.12. – С.116–134.

- 54. Рычагов, С.Н. Литология толщи глин Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) / С.Н. Рычагов, О.В. Кравченко, А.А. Нуждаев, М.С. Чернов // Материалы XXII научной конференции, посвященной Дню вулканолога: "Вулканизм и связанные с ним процессы", 28–29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2019. – С. 213–216.
- 55. Рычагов, С.Н. Южно-Камбальное Центральное термальное поле: структурное положение, гидрогеохимические и литологические характеристики / С.Н. Рычагов, О.В. Кравченко, А.А. Нуждаев, М.С. Чернов, Е.В. Карташева, А.А. Кузьмина // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 198-201.
- 56. Рычагов, С.Н. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) / С.Н. Рычагов, Е.И. Сандимирова, М.С. Чернов, О.В. Кравченко, Е.В. Карташева // Вулканология и Сейсмология. – 2021. – № 4. –С. 45–60.
- 57. Рычагов, С.Н. Состав пепла вулкана Камбальный (извержение 2017 г.) / С.Н. Рычагов,
 Е.И. Сандимирова, А.В. Сергеева, И.А. Нуждаев // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле.
 2017. №4. Вып.36. С.13-27.
- 58. Рычагов, С.Н. Минеральные ассоциации основания толщи глин как индикаторы флюидного режима Паужетской гидротермальной системы (Камчатка) / С.Н. Рычагов, А.В. Сергеева, М.С. Чернов // Тихоокеанская геология. 2017. – Том 36. – № 6. – С. 90-106.
- 59. Рычагов, С.Н. Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований / С.Н. Рычагов, В.Н. Соколов, М.С. Чернов // Геохимия. – 2012. – № 4. – С. 378-392.
- Сандимирова, Е.И. Цеолиты в аргиллизитах Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) / Е.И. Сандимирова, С.Н. Рычагов, В.М. Чубаров // Материалы XIII Всероссийского Петрографического совещания (с участием зарубежных ученых): "Петрология и геодинамика геологических процессов", Иркутск, 6–13 сентября 2021 г. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. – 2021. – Т. 3. – С. 52–54.
- Спиридонов, Э.М. Агаты в метавулканитах. Геологические обстановки, параметры и время превращения вулканитов в мандельштейны с агатами. Специальный выпуск журнала «Вестник РФФИ»/ Э.М. Спиридонов, В.М. Ладыгин, Д.Я. Янакиева, Ю.В. Фролова, Е.С. Семиколенных – М.: МОЛНЕТ, 2014. – 71 с.

- Сугробов, В.М. Жемчужина Камчатки Долина Гейзеров / В.М. Сугробов, Н.Г. Сугробова, В.А. Дрознин, Г.А. Карпов, В.Л. Леонов – Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. – 2009. – 108 с.
- 63. Тимофеев, П.П. Проблемы гидрогеохимии литогенеза / П.П. Тимофеев,
 А.В. Щербаков // Литология и полезные ископаемые. 1972. № 2. С. 32-43.
- 64. Тимофеев, П.П. Проблемы энергетики осадочного процесса / П.П. Тимофеев,
 А.В. Щербаков //Литология и полезные ископаемые. 1979. № 1. С. 3-22.
- 65. Феофилактов, С.О., Рычагов С.Н., Букатов Ю.Ю. и др. Новые данные о строении зоны разгрузки гидротерм в районе Восточно-Паужетского термального поля (Южная Камчатка) / С.О. Феофилактов, С.Н. Рычагов, Ю.Ю. Букатов // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 36-50.
- 66. Шанцер, А. Е. Формационные ряды наземного вулканического пояса (на примере позднего кайнозоя Камчатки) / А.Е. Шанцер, Т.С. Краевая // М.: Наука. 1980. 164 с.
- 67. 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 // Вестн. Моск. ун-та. Сер.4. Геология. – 2011а. – №6. – С. 52-60.
- 68. Фролова, Ю.В. Инженерно-геологические особенности гидротермальнометасоматических пород Камчатки и Курильских островов / Ю.В. Фролова, В.М. Ладыгин, С.Н. Рычагов // Инженерная геология. – 2011б. – №1. – С.48-64.
- 69. 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 // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов проблемы и решения. Материалы общероссийской научно-практической конференции. М.: ООО «Геомаркетинг». 2023а. С. 29-36.
- 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). – 2023б. – С. 318-323.
- Фролова, Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения / Ю.В. Фролова. – М.: КДУ, 2015. – 222 с. – ISBN 978-5-906226-72-3.
- 72. Фролова, Ю.В. Формирование физико-механических свойств гидротермально измененных туфогенных пород плиоцен-четвертичного возраста Курило-Камчатского региона: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 1998. 26 с.

- Фролова, Ю.В. Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины гейзеров (Камчатка) / Ю.В. Фролова, И.П.Гвоздева, М.С. Чернов, Н.П. Кузнецов // Инженерная геология. – 2015. – №5. – С.48-60.
- 74. 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.
- 75. 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.XV. – №1. – С. 36-51.
- 76. Царев, Д.И. Фрагментарный метасоматоз / Д.И. Царев // Метасоматизм и рудообразование. М.: Наука. 1984. С. 309-320.
- 77. Чернов, М.С., Соколов В.Н., Рычагов С.Н. и др. Строение гидротермальных глин Южной Камчатки: от макро- до наноуровня / М.С. Чернов, В.Н. Соколов, С.Н. Рычагов // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2016. – С. 460-466.
- 78. Шанина, В.В. Изменение состава, строения и свойств вулканогенных пород Паужетского геотермального месторождения, вулканов Кошелевский и Крафла под воздействием гидротермальных процессов (по данным натурных исследований и лабораторных экспериментов): автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 2013, 24 с.
- 79. ASTM D 5873-05 Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.
- Aydin A. ISRM suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2009. Vol. 46. P. 627–634.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E. et al. Largevolume silicic volcanism in Kamchatka: Ar-Ar, U-Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2010. V. 189. № 1-2. P. 57-80.
- 82. Brown, D.W., Duchane, D.V., Heiken, G., Hriscu, V.Th. "Mining earth's heat: hot dry rock geothermal energy". United States, 2012. 658 p.
- Della Seta, M., Esposito, C., Marmoni, G.M., Martino, S., Paciello, A., Perinelli, C., Sottili
 G.: Geological Constraints for aConceptual Evolutionary Model of the Slope Deformations

Affecting Mt. Nuovo at Ischia (Italy), Italian Journal of EngineeringGeology and Environment, 2 (2015), p. 15-28.

- Flynn, T., Goff, F., Van Eeckhout, E., Goff, S., Ballinger, J., Suyama, J.: Catastrophic Landslide at Zunil I Geothermal Field, Guatemala, January 5, 1991, Geothermal Resources Council Transactions, 15, 1991, p. 425-433.
- 85. Frolova J.V., Chernov M.S., Rychagov S.N., Zerkal O.V. The Impact of Hydrothermal Activity on the Geological Environment, Kamchatka Peninsula // Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 2021, 10 p.
- Götze J., Möckel R., Pan Y., Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Agate—A Review // Minerals, 10(11), 1037, 2020.
- Grigoli F., Cesca S., Rinaldi A.P., Manconi A., López-Comino J.A., Clinton J.F., Westaway R., Cauzzi C., Dahm T., Wiemer S. The November 2017 Mw 5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea. Science, 01 Jun 2018, Vol. 360, Issue 6392, pp. 1003-1006.
- Heaney, P.J.; Davis, A.M. Observation and origin of self-organized textures in agates. Science 1995, 269, p. 1562–1565.
- Heap, M. J., Gravley, D. M., Kennedy, B. M., Gilg, H. A., Bertolett, E., and Barker, S. L.: Quantifying the role of hydrothermal alteration in creating geothermal and epithermal mineral resources: The Ohakuri ignimbrite (Taupo Volcanic Zone, New Zealand), J. Volcanol. Geoth. Res., 390, 106703, 2020.
- 90. Huang, S., Tian, T. Study of Environmental Impact in Geothermal Development and Utilization. Proceedings of the 7th AsianGeothermal Symposium, 2006, p. 35-44.
- Hutter G.W. Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report // Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 2020, 17 p.
- 92. Karaman K., Kesimal A. A comparative study of Schmidt hammer test methods for estimating the uniaxial compressive strength of rocks // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015. Vol. 74. P. 507–520. 10.
- Katz O., Reches Z., Roegiers J.C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. 2000. Vol. 37. P. 723–728.
- 94. Kim K., Ree J., Kim Y., Kim S., Kang S.Y., Seo W. Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. Science, 01 Jun 2018, Vol. 360, Issue 6392, pp. 1007-1009.
- 95. Komzeleva V., Koulakov I., Rychagov S.N. et al. Sources of the eruption of Kambalny volcano (Southern Kamchatka) in March 2017 inferred from local earthquake tomography // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2021. V. 420. 107392.

- 96. Kristianto, B., Gunderson, R., Gunawan, A. Geological Engineering for Hazard Assessment of Pad AWI-14, Salak Field, West Java, Indonesia, Proceedings, 13th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2013.
- 97. Liesegang, R.E. Die Achate, Steinkopf: Dresden-Leipzig, 1915.
- Lund, J. W., Freeston, D. H.: World-Wide Direct Uses of Geothermal Energy 2000, Geothermics, 30, Elsevier, (2001), pp. 29-68.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., Boyd, T. J.: Direct Applications of Geothermal Energy, 2005 Worldwide Review, Geothermics 34, Elsevier, (2006), pp. 691-727.
- Lund, J. W., Freeston, D. H., Boyd, T. J.: Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review, Geothermics 40 (2011), Elsevier, pp. 159-180.
- Lund, J. W., Boyd, T. J.: Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review, Geothermics 60, Elsevier, (2016), pp.66-93.
- 102. Lund J.W., Toth A.N. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review // Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 2020, 39 p.
- 103. Luzzini F. L'industria principesca. Piero Ginori Conti e l'impianto geotermico di Larderello
 // Geothermal Energy, Vol 1, № 3, Special Issue, 2012, p. 97-98.
- 104. Marmoni, G.M., Martino, S., Heap, M.J., Reuschlé, T.: Gravitational Slope-Deformation of a Resurgent Caldera: New Insights from the Mechanical Behaviour of Mt. Nuovo Tuffs (Ischia Island, Italy), Journal of Volcanology and Geothermal Research, 345. 2017. P. 1-20.
- 105. Mordensky S.P.; Kennedy B.M.; Villeneuve M.C.; Lavallée Y.; Reichow M.K.; Wallace P.A., Siratovich P.A.; Gravley D.M. Increasing the Permeability of Hydrothermally Altered Andesite by Transitory Heating // Geochemistry Geophysics Geosystems Vol. 20, Issuel1, November 2019, pp. 5251-5269.
- 106. Mordensky S.P., Villeneuve M.C., Farquharson J.I., Kennedy B.M., Heap M.J., Gravley D. Rock mass properties and edifice strength data from Pinnacle Ridge, Mt. Ruapehu, New Zealand // Journal of Volcanology and Geothermal Research. V. 367, 2018. P 46-62.
- Moxon T., Palyanova G. Agate Genesis: A Continuing Enigma // Minerals, 10(11), 953, 2020.
- 108. Pioquinto, W. P. C., Caranto, J. A., Bayrante, L. F., Zarco, M. H., Catane, S. G., Mitigating a Deep-Seated Landslide Hazard - the Case of 105 Mahiao Slide Area, Leyte Geothermal Production Field, Philippines. Proceedings, World GeothermalCongress, (2010), Bali, Indonesia. 2010.
- Pioquinto, W. P. C., Caranto, J.A. Mitigating the Impact of Landslide Hazards in PNOC-EDC Geothermal Fields, Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005.

- 110. Pola A., Crosta G., Fusi N., Barberini V., Norini G.: Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks, Tectonophysics, 566/567, 2012, p. 67–86.
- Pola A., Crosta G. B., Fusi N., Castellanza R.: General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration, Eng. Geol., 169, 2014, p. 1-13.
- 112. Siratovich P.A., Heap M.J., Villeneuve M.C., Cole J.W., Reuschle T. Physical property relationships of the Rotokawa Andesite, a significant geothermal reservoir rock in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand // Geothermal Energy 2, 2014, Article number: 10, 31 p.
- 113. Siratovich P. Physical and mechanical properties of the rotokawa andesite from production wells RK 27_L2, RK 28 and RK 30 / Paul A. Siratovich, Jonathan Davidson, Marlene Villeneuve, Darren Gravley, Ben Kennedy, Jim Cole, Latasha Wyering, and Linda Price// New Zealand Geothermal Workshop 2012 Proceedings, Auckland, New Zealand, 2012. 7 p.
- 114. Siratovich P.A., Villeneuve M.C., Cole J.W., Kennedy B.M., Bégué F. Saturated heating and quenching of three crustal rocks and implications for thermal stimulation of permeability in geothermal reservoirs // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 80, 2015, pp. 265–280.
- 115. Suemnicht, G.A., Sorey, M.L., Moore, J.N., Sullivan, R.: The Shallow Hydrothermal System of Long Valley Caldera, California.Proceedings, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, 2007.
- 116. Svalova, V., and Povarov, K.: Geothermal Resources and Energy Use in Russia, Proceedings
- 117. World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 2020.
- Stober I., Butcher K. Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development.: Springer, 2013 — 291 p.
- Voight, B.: Causes of Landslides: Conventional Factors and Special Considerations for Geothermal Sites and Volcanic Regions.Geothermal Resources Council Transactions, 16, 1992, p. 529-533.
- 120. Wijaya, P.K., Zangel, C., Straka, W., Ottner, F. Geological Aspects of Landslides in Volcanic Rocks in a Geothermal area (KamojangIndonesia). Proceedings, 3th World Landslide Forum, Beijing, 2014.
- 121. Zenz J. Agates II. Haltern, Germany: BODE, 2009, 656 p.
- 122. Zimbelman D.R., Rye R.O., Breit G.N. Origin of secondary sulfate minerals on active andesitic stratovolcanoes // Chemical Geology, 2005, 215(1) p. 37-60

№ образца	№ пробы		интервал, м	и Плотность воздушно-сухого грунта	и Плотность водонасыщенного распрунта	л Плотность твердой компонент	и Пористость	водопоглощение	открытая пористость	 Скорость продольных волн по оси керна (сухие) 	 Скорость поперечных волн по оси керна (сухис) 	т Коэффициент Пуассона по в оси керна	* Динамический модуль В в упругости по оси керна	d Скорость продольных волн в водонасыщенном состоянии	Скорость поперечных волн в водонасыщенном состоянии	Прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии	 Прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии 	Прочность на одноосное ф растяжение в воздушно-сухом состоянии	 Прочность на одноосное растяжение в водонасыщенном состоянии 	 Магнитная восприимчивость
													10	В						
		Beny	низ	г/см ³	г/см ³	г/см ³	%	%	%	км/	км/		ΜПа	км/с	км/с	МПа	МПа	МПа	МПа	СИ*10 ⁻³
		верх	шиз	1701	17 CM	17014	Boc	гочно	-Пау	с жетсі	с кое те	рмаль	ное по	пе	icui e	minu	10111ú	Millu	mmu	CH 10
рпп	1			1					indy			P								22.2
ВПП 1/18-Б	1			2,70			2,8			5,4	2,7	0,34	51,22			142,8				52,2 5
ВПП 1/18-Б	2			2,73	2,74		1,8	0,3	0,9	5,4	2,7	0,34	52,37	5,6	3,1		136,3			31,2 5
ВПП 1/18-Б	3			2,68			3,5			6,1	3,1	0,33	67,53					8,8		30,2 5
ВПП 1/18-Б	4			2,74	2,75		1,5	0,3	0,8	5,8	3,1	0,29	69,65	5,8	3,2				11,0	32,0 0
ВПП 1/18-Б	5			2,73			1,9			5,3	2,9	0,28	59,99			129,7				31,5 0

Приложение. Сводная таблица показателей свойств исследованных образцов

	6		2,70	2,70		3,1	0,4	1,0	5,5	3,1	0,27	65,85	5,5	2,8		103,5			30,7
1/18-Б			-	, í		,	,	,	Ĺ	,	,	,	,	-		, í			5
ВПП 1/18-Б	7		2,70			2,8			5,4	3,2	0,24	66,75					11,3		30,2 5
ВПП 1/18-Б	8		2,70	2,71		2,8	0,3	0,9	6,1	3,1	0,33	67,71	5,8	3,1				9,7	31,2
ВПП 1/18 Б	9		2,70			2,9			5,6	3,0	0,30	62,93			154,4				30,0
1/18-В ВПП 1/18-Б	среднее		2,71	2,73	2,78	2,6	0,3	0,9	5,63	2,98	0,30	62,67	5,70	3,04	142,2	119,9	10,0	10,3	31,0
1/18-Б						-		-							9	0	3	5	0
		n		1	1						-	•	n	T	r	r	1	r	
102-5	1 напр.		2,69		2,80	3,0			5,5	2,7	0,34	52,91			155,0		5,3		32,0 0
	2 напр.		2,68			2,7			4,9	2,5	0,34	42,07			87,0				42,3 0
102-1	1		2,70		2,80	2,9			2,8	1,4	0,34	29,27			115,0		5,6		41,7 0
ВПП 2/18-Б	1		2,60			6,6			3,1	1,5	0,35	15,09			133,8				20,6 3
ВПП 2/18-Б	2		2,62	2,64		6,2	0,9	2,4	4,6	2,2	0,36	33,26	4,7	2,3		71,8			21,8 0
ВПП 2/18-Б	3		2,55			8,5			4,1	1,7	0,39	21,35					8,1		19,9 3
ВПП 2/18-Б	4		2,55	2,58		8,5	1,2	3,1	4,0	2,3	0,25	34,63	5,0	2,5				6,5	20,6 0
ВПП 2/18-Б	5		2,61			6,4			3,9	1,7	0,37	21,81			80,2				21,7 8
ВПП 2/18-Б	6		2,59	2,61		7,3	1,0	2,6	4,0	1,9	0,35	25,91	5,4	2,1		92,8			21,8 8
ВПП 2/18-Б	7		2,58			7,4			3,6	2,0	0,27	26,46					11,3		20,3 0

ВПП 2/18 Б	среднее			2,62	2,61	2,79	6,0	1,0	2,7	4,06	1,99	0,34	30,28	5,02	2,31	114,1	82,33	7,59	6,48	26,2
2/10-D																9				9
ВПП- 1/18	13 ?	3,30	3,50	2,47		2,61	5,3			4,1	2,1	0,32	30,02			39,1				12,6 0
ВПП- 2/18	16	4,00	4,20	2,34																17,8 0
ВПП- 2/18	17	4,20	4,60	2,58	2,60	2,77	6,8	0,8	1,9	4,4	2,6	0,25	41,95				5,7			38,8 0
ВПП- 2/18	19	4,80	5,00	2,52		2,76	8,8											6,3		24,0 0
ВПП- 2/18	20	5,00	5,40	2,57	2,59	2,79	8,0	1,0	2,7	4,5	2,4	0,31	38,41				11,3			33,9 0
ВПП- 2/18	22	5,60	5,80	2,61		2,81	7,1			4,9	2,6	0,29	46,49			32,1				31,2 0
ВПП- 2/18	23	5,80	6,00	2,38		2,74	13,2			2,9	1,4	0,34	12,81					3,4		21,4 0
ВПП- 2/18	24	6,00	6,15	2,44																18,4 0
ВПП- 2/18	26	6,25	6,35	2,50																24,9 0
ВПП- 2/18	27	6,60	6,90	2,46	2,50	2,78	11,3	1,5	3,6	4,1	2,1	0,33	27,63	4,1	2,1				0,7	32,4 3
ВПП- 2/18	29	7,10	7,23	2,46		2,73	10,0			3,7	1,8	0,35	20,56				19,6			31,6 3
ВПП- 2/18	33	7,90	8,07	2,38		2,72	12,4			4,4	2,4	0,28	35,38			45,9				22,4 3
ВПП- 2/18	37	8,30	8,50	2,45		2,76	11,3			2,5	1,5	0,21	13,30					2,6		23,3 5
ВПП- 5/15	24	4,60	4,75	2,42		2,75	11,9			4,3	2,3	0,30	33,15					4,7		20,9 0

ВПП- 5/15	25	4,75	4,85	2,45		2,73	10,3			4,4	2,4	0,28	37,19					6,7		19,1 0
ВПП- 1/18	27	5,75	6,15	2,35	2,39	2,76	14,7	1,6	3,8	3,9	1,9	0,35	23,16				29,5			31,1 0
ВПП- 8/16	22	4,00	4,15	2,71	2,72	2,82	3,8	0,4	1,0	4,1	2,3	0,27	36,56	4,94	2,51		11,6			15,2 0
ВПП- 8/16	24	4,35	4,50	2,32		2,90	20,1			2,7	1,4	0,30	12,47			19,7				11,4 0
ВПП- 8/16	29 1	4,95	5,05	2,31		2,99	22,8			3,4	1,7	0,34	17,00					2,1		18,9 0
ВПП- 8/16	29 2	4,95	5,05	2,37		2,99	20,6			2,7	1,4	0,31	12,44			20,8				21,0 0
ВПП- 8/16	30 1	5,05	5,20	2,59		2,89	10,5			3,8	2,0	0,31	26,58			69,8				27,6 0
ВПП- 8/16	30 2	5,05	5,20	2,53	2,54	2,89	12,5	0,6	1,5	4,2	2,1	0,32	30,36	4,15	2,13				5,5	24,4 0
ВПП- 8/16	30 3	5,05	5,20	2,57		2,89	11,2											4,0		27,6 0
ВПП- 8/16	33	5,50	5,90	2,48		2,82	12,0			3,6	2,0	0,27	25,36					2,6		35,3 0
ВПП- 8/16	40	6,90	7,08	2,31	2,34	2,82	18,1	1,2	2,7	3,7	1,7	0,37	17,52	4,2	2,1				3,1	28,0 6
ВПП- 8/16	41	7,08	7,25	2,49		2,82	11,7			4,3	2,3	0,31	34,16			63,9				28,2 9
ВПП- 2/17	28	5,56	5,72	2,51		2,77	9,3			4,5	1,9	0,39	25,24			38,3				28,5 0
ВПП- 2/17	29	5,72	6,00	2,48		2,72	8,8			4,2	2,2	0,32	30,92					4,1		26,8 0
ВПП- 2/17	30	6,00	6,20	2,33	2,37	2,78	16,1	1,6	3,7	3,6	1,7	0,35	18,63	3,9	2,0				3,0	21,9 7
ВПП- 2/17	31	6,20	6,40	2,52	2,53	2,78	9,5	0,7	1,9	3,8	2,2	0,24	30,77				9,0			31,4 0

ВПП- 2/17	среднее			2,46	2,51	2,80	11,8	1,0	2,5	3,86	2,02	0,31	27,12	4,27	2,15	41,21	14,44	4,07	3,07	25,0 1
				•							•	•	•	•	•					
ВПП- 1/18	10	2,70	2,90	1,86																0,32
ВПП- 1/18	14	3,50	3,70	2,26		2,65	14,7			2,3	1,2	0,31	8,47			13,0				28,4 0
ВПП- 1/18	15	3,70	3,85	1,99		2,64	24,8											1,2		10,2 0
ВПП- 1/18	17	4,00	4,25	2,16		2,65	18,5									15,5				16,7 0
ВПП- 1/18	18	4,25	4,35	2,14																11,7 0
ВПП- 1/18	19	4,35	4,41	1,75		2,59	32,3											1,0		0,56
ВПП- 1/18	20	4,41	4,60	2,45		2,67	8,2			4,7	2,2	0,36	32,75			41,3				27,9 0
ВПП- 1/18	21	4,60	4,80	2,02																4,30
ВПП- 1/18	22	4,80	5,20	2,19		2,62	16,4			3,4	1,9	0,26	20,00					1,4		18,1 0
ВПП- 1/18	23	5,20	5,40	2,02		2,71	25,5									9,1				9,00
ВПП- 1/18	24	5,40	5,55	2,12	2,17	2,65	20,0	2,5	5,3	2,1	1,1	0,32	6,84						0,5	13,7 0
ВПП- 1/18	26	5,60	5,75	1,95		2,60	25,0									11,3				12,5 0
ВПП- 2/18	14	3,55	3,90	2,26		2,67	15,4			1,2	0,8	0,15	3,14							4,10
ВПП- 5/15	15 1	2,80	3,00	2,24		2,98	24,8									10,8				18,5 1

ВПП- 5/15	15 2	2,80	3,00	2,29	2,41	2,98	323,0	5,1	11,8	2,6	1,7	0,13	14,42						21,6 9
ВПП- 5/15	15 3	2,80	3,00	2,14		2,98	328,1										0,7		17,8 5
ВПП- 5/15	15 4	2,80	3,00	2,10	2,22	2,98	329,5	5,7	12,0	2,7	1,7	0,16	14,16						18,9 3
ВПП- 5/15	16 1	3,00	3,20	2,40		2,89	16,8			3,2	1,7	0,30	18,06		14,5				18,8 7
ВПП- 5/15	16 2	3,00	3,20	2,45	2,54	2,89	15,3	3,6	8,9	3,2	1,7	0,30	19,08						20,7 9
ВПП- 5/15	163	3,00	3,20	2,38		2,89	17,5			3,0	1,7	0,28	17,21				3,8		16,2 9
ВПП- 5/15	16 4	3,00	3,20	2,45	2,52	2,89	15,2	2,9	7,1	2,9	1,7	0,26	17,22			4,0			21,6 3
ВПП- 5/15	17 1	3,20	3,40	2,28		2,89	21,2								14,7				20,5 2
ВПП- 5/15	17 2	3,20	3,40	2,27		2,89	21,4			3,1	1,6	0,31	15,49						18,6 6
ВПП- 5/15	173	3,20	3,40	2,20		2,89	23,9			2,4	1,5	0,18	11,33				1,6		15,0 3
ВПП- 5/15	18	3,40	3,60	2,08		2,77	25,0								2,3				2,34
ВПП- 5/15	19	3,60	3,80	2,13		2,65	519,5			2,3	1,3	0,28	8,90		21,4				17,3 0
ВПП- 5/15	20	3,80	4,00	2,02	2,10	2,63	23,0	3,9	7,9	2,5	1,5	0,24	10,85					1,2	13,4 0
ВПП- 5/15	21	4,00	4,20	2,19		2,57	15,0								16,5				8,90
ВПП- 5/15	22	4,20	4,40	1,97															5,70
ВПП- 5/15	23	4,40	4,60	2,30	2,42	2,74	16,2	5,3	12,2							7,1			22,0 0

ВПП- 5/15	среднее			2,17	2,34	2,77	20,6	4,2	9,3	2,77	1,55	0,26	14,53			15,48	5,51	1,61	0,83	14,5 3
						1		•	1						1					
ВПП- 1/20	31	6,10	6,30	2,40		2,59	7,4			4,4	2,2	0,33	31,43					4,0		22,3 0
ВПП- 1/20	33	6,50	6,70	2,41		2,82	.14,5			3,4	1,7	0,32	19,24			9,6				26,0 0
ВПП- 1/20	34	6,70	6,90	2,24	2,34	2,72	17,6	4,5	10,1	2,4	1,1	0,38	7,14						0,3	27,5 0
ВПП- 1/20	37	7,20	7,45	2,47		2,73	9,5			2,3	1,3	0,27	10,86			50,3				23,6 0
ВПП- 1/20	38	7,45	7,60	2,41	2,43			1,1	2,7	4,2	2,4	0,26	34,24	4,2	2,2				1,8	40,5 0
ВПП- 1/20	40	7,75	7,90	2,48		2,86	13,3			4,3	2,1	0,34	29,80					4,7		39,5 3
ВПП- 1/20	41	8,00	8,15	2,34	2,41			2,9	6,8	3,9	2,1	0,29	27,26	4,2	2,1		27,4			30,6 8
ВПП- 1/20	42	8,15	8,35	2,40		2,77	13,3			4,0	2,3	0,26	31,83					7,0		30,8 0
ВПП- 1/20	43	8,35	8,55	2,45	2,49	2,69	8,8	1,5	3,6	4,0	2,3	0,24	33,17	4,5	2,3		59,5			29,1 5
ВПП- 1/20	44	8,55	8,75	2,55		2,80	9,0			4,5	2,1	0,35	31,69			40,6				42,3 6
ВПП- 1/20	45	8,75	8,95	2,53	2,55			0,8	2,1	4,1	2,2	0,30	31,37	4,2	2,1				3,6	38,4 7
ВПП- 1/20	47	9,10	9,30	2,54		2,76	8,1			4,1	2,0	0,34	26,81					7,2		34,1 0
ВПП- 1/20	48	9,30	9,50	2,45	2,47			1,2	2,9	3,7	1,8	0,34	22,28	4,1	1,9		29,1			32,4 5
ВПП- 1/20	49-1	9,50	9,70	2,44		2,76	11,5			3,8	1,8	0,35	21,99			55,0				35,0 5

ВПП-	49-2	9,70	9,90	2,43	2,48	2,73	11,0	2,3	5,5	3,9	1,9	0,33	24,58	3,9	2,2		14,9			35,8
1/20				-	-	· ·	-	-	-	, í	-	, î	-	-						/
ВПП- 1/20	50	9,90	10,2 0	2,48	2,52	2,75	9,7	1,6	4,0	3,6	1,8	0,35	20,60	4,0	1,7				3,6	37,4
					терма	ально	е пол	ie Cei	верно	ого кр	атера	и Цент	рально	го Сем	ячика					
ЦС- 1/20-Б	1			2,92	2,93		3,1	0,4	1,2	5,8	3,0	0,33	67,52	6,4	3,2	176,2				22,1 1
ЦС- 1/20-Б	2			2,90	2,91		3,6	0,3	1,0	5,8	2,7	0,36	57,17	6,3	3,0		150,6			21,1 9
ЦС- 1/20-Б	3			2,90	2,90		3,6	0,1	0,3	5,5	2,9	0,31	63,86	6,2	2,9	138,7				24,1 6
ЦС- 1/20-Б	4			2,90	2,90		3,8	0,1	0,4	5,4	2,7	0,34	55,36	6,0	2,7					24,5 2
ЦС- 1/20-Б	5			2,89	2,89		4,0	0,1	0,4	5,6	2,5	0,37	50,66	6,4	3,5			17,7		22,5 4
ЦС- 1/20-Б	6			2,93	2,93		2,7	0,1	0,3	5,6	2,8	0,34	59,61	6,5	3,1					21,0 2
ЦС- 1/20-Б	7			2,89	2,90		3,8	0,1	0,3	4,7	2,6	0,27	50,62	6,3	3,3			11,6		16,4 7
ЦС- 1/20-Б	8			2,90	2,90		3,8	0,3	0,8	4,2	2,0	0,36	30,51	5,3	2,6				10,4	17,1
ЦС- 1/20-Б	среднее			2,90	2,91	3,01	3,5	0,2	0,6	5,3	2,6	0,34	54,41	6,17	3,04	157,4 1	150,6 2	14,6 5	10,4 3	
	·	ı		·	·							·	·			·		I	1	
ЦС- 2/20-Б	1			2,62	2,66		9,8	1,6	4,1	3,6	2,1	0,24	28,20	4,2	2,1	37,2				34,9 8
ЦС- 2/20-Б	2			2,62	2,65		9,8	1,4	3,7	3,9	2,1	0,29	30,04	4,9	2,2		69,2			26,0 4
ЦС- 2/20-Б	3			2,61	2,65		9,8	1,5	4,0	3,7	2,1	0,27	28,91	4,7	2,1	73,2				29,4 4

ЦС- 2/20-Б	4	2,62	2,66		9,7	1,5	4,0	3,8	2,1	0,30	28,60	5,0	2,3					23,8 9
ЦС- 2/20-Б	5	2,58	2,63		11,1	1,9	4,9	4,0	2,1	0,30	30,42	4,6	2,0			8,3		20,3 3
ЦС- 2/20-Б	6	2,64	2,68		8,9	1,5	3,8	4,3	2,4	0,28	37,98	5,2	2,7					30,2 6
ЦС- 2/20-Б	7	2,64	2,68		8,9	1,4	3,8	4,6	2,4	0,31	39,99	5,4	2,6			10,3		31,1 9
ЦС- 2/20-Б	8	2,58	2,63		11,1	2,0	5,1	3,5	1,6	0,36	18,34	4,1	2,1				6,4	19,3 4
ЦС- 2/20-Б	среднее	2,61	2,66	2,90	9,9	1,6	4,2	3,9	2,1	0,29	30,31	4,76	2,28	55,17	69,21	9,31	6,41	
ЦС- 3/20-Б	1	1,39	1,67		37,2	20,2	28,0	2,4	1,4	0,27	6,45	1,4	0,8					0,06
ЦС- 3/20-Б	2	1,46	1,66		33,9	13,4	19,5	2,3	1,2	0,32	5,54	2,8	1,3		9,4			0,06
ЦС- 3/20-Б	3	1,07	1,52		51,6	41,8	44,7	1,9	1,0	0,31	2,67	2,0	1,0	6,5				0,06
ЦС- 3/20-Б	4	1,13	1,55		48,9	37,4	42,2	2,1	1,1	0,32	3,47	2,0	1,2					0,06
ЦС- 3/20-Б	5	1,50	1,70		32,3	14,0	20,9	2,5	1,5	0,25	8,11	2,4	1,4	17,6				0,06
ЦС- 3/20-Б	6	0,81	1,38		63,4	70,6	57,1	1,5	0,9	0,21	1,70							0,06
ЦС- 3/20-Б	7	1,22	1,55		44,6	27,0	33,1	2,4	1,3	0,30	5,12			11,6				0,06
ЦС- 3/20-Б	8	1,46	1,66		33,7	13,6	19,9	2,4	1,2	0,34	5,40	2,7	1,2		7,5			0,06
ЦС- 3/20-Б	9	1,54	1,73		30,5	12,9	19,7	2,8	1,7	0,23	10,36	3,1	1,7			1,6		0,09

_

-

-

_

-

-

.

-

- -

.

_

ЦС- 3/20-Б	10	1,58	1,79		28,7	13,3	21,0	2,7	1,5	0,26	9,26	2,7	1,5				2,3	0,03
ЦС- 3/20-Б	11	0,85	1,39		61,5	63,0	53,6	1,8	0,9	0,35	1,75	2,2	1,1			0,9		0,06
ЦС- 3/20-Б	12	0,91	1,40		58,7	53,5	48,8	1,8	1,1	0,22	2,58	1,9	1,1				1,0	0,06
ЦС- 3/20-Б	среднее	1,24	1,58	2,21	43,8	31,7	34,0	2,2	1,2	0,28	5,20	2,33	1,23	11,93	8,48	1,28	1,66	
ЦС- 4/20-Б	1	0,83	1,35		62,2	63,3	52,4	1,4	0,8	0,25	1,38							0,06
ЦС- 4/20-Б	2	1,07	1,33		51,2	24,7	26,3	1,3	0,8	0,25	1,60				3,1			0,06
ЦС- 4/20-Б	3	1,07	1,28		51,0	19,6	21,0	1,2	0,6	0,34	1,01			2,0				0,06
ЦС- 4/20-Б	4	1,21	1,36		44,8	12,3	14,9	0,8	0,4	0,33	0,51				1,6			0,06
ЦС- 4/20-Б	5	1,10	1,31		49,7	19,1	21,0	1,3	0,7	0,32	1,26	0,7	0,5	2,5				0,06
ЦС- 4/20-Б	6	1,16	1,36		47,2	17,3	20,0	1,5	0,8	0,31	1,74	1,4	0,7					0,06
ЦС- 4/20-Б	7	1,12	1,34		48,8	19,3	21,7	1,4	0,7	0,32	1,54	1,4	0,7	5,8				0,06
ЦС- 4/20-Б	8	1,04	1,36		52,5	30,5	31,8	1,4	0,9	0,21	1,84	1,3	0,6					0,06
ЦС- 4/20-Б	9	0,80	1,32		63,7	66,1	52,6	1,4	0,7	0,30	1,12	1,3	0,7	2,8				0,06
ЦС- 4/20-Б	10	0,79	1,33		63,8	67,0	53,2	1,4	0,7	0,31	1,05	1,2	0,6					0,03
ЦС- 4/20-Б	11	1,11	1,36		49,2	22,4	24,9	1,4	0,7	0,30	1,59	1,3	0,7			0,9		0,06

цс- 4/20-Б	12	1,13	1,36		48,5	20,9	23,6	2,2	0,7	0,44	1,66	1,3	0,6					0,09
ЦС- 4/20-Б	13	1,16	1,34		47,0	15,5	18,0	1,0	0,5	0,34	0,71					0,4		0,06
ЦС- 4/20-Б	14	1,24	1,41		43,4	13,3	16,5	1,8	0,9	0,36	2,50	2,0	0,9				0,8	0,06
ЦС- 4/20-Б	15	1,07	1,32		51,3	24,0	25,6	1,5	0,8	0,30	1,82	1,5	0,7			0,5		0,06
ЦС- 4/20-Б	16	1,14	1,38		48,1	21,5	24,5	1,3	0,7	0,33	1,32	1,3	0,6				0,5	0,06
ЦС- 4/20-Б	17	1,17	1,41		46,4	19,7	23,2	0,9	0,5	0,31	0,69					0,8		0,06
ЦС- 4/20-Б	18	1,02	1,34		53,4	31,1	31,7	1,0	0,5	0,34	0,61						0,7	0,06
ЦС- 4/20-Б	19	1,02	1,49		53,6	46,3	47,1	1,0	0,6	0,20	0,91	1,4	0,7			0,7		0,09
T/20-D																		
ЦС- 4/20-Б	среднее	1,07	1,35	2,19	51,4	29,2	28,9	1,3	0,7	0,31	1,31	1,33	0,67	3,27	2,34	0,66	0,65	
ЦС- 4/20-Б	среднее	1,07	1,35	2,19	51,4	29,2	28,9	1,3	0,7	0,31	1,31	1,33	0,67	3,27	2,34	0,66	0,65	
ЦС- 4/20-Б ЦС- 5/20-Б	среднее	2,25	1,35 2,35	2,19	51,4 19,5	29,2 4,2	28,9 9,5	1,3 3,8	0,7	0,31	1,31 28,51	1,33 3,7	0,67 2,2	3,27	2,34	0,66	0,65	0,06
ЦС- 4/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б	среднее 1 2	1,07 2,25 2,24	1,35 2,35 2,34	2,19	51,4 19,5 19,8	29,2 4,2 4,1	28,9 9,5 9,1	1,3 3,8 3,8	0,7 2,3 2,1	0,31 0,21 0,29	1,31 28,51 24,64	1,33 3,7 3,6	0,67 2,2 2,1	3,27	2,34 22,3	0,66	0,65	0,06 0,06
ЦС- 4/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б	среднее 1 2 3	1,07 2,25 2,24 2,25	1,35 2,35 2,34 2,34	2,19	51,4 19,5 19,8 19,6	29,2 4,2 4,1 3,7	28,9 9,5 9,1 8,4	1,3 3,8 3,8 3,5	0,7 2,3 2,1 1,7	0,31 0,21 0,29 0,34	1,31 28,51 24,64 17,78	1,33 3,7 3,6 3,2	0,67 2,2 2,1 1,9	3,27	2,34	0,66	0,65	0,06 0,06 0,06
ЦС- 4/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б	среднее 1 2 3 4	1,07 2,25 2,24 2,25 2,29	1,35 2,35 2,34 2,34 2,37	2,19	51,4 19,5 19,8 19,6 18,2	29,2 4,2 4,1 3,7 3,3	28,9 9,5 9,1 8,4 7,6	1,3 3,8 3,8 3,5 3,9	0,7 2,3 2,1 1,7 1,8	0,31 0,21 0,29 0,34 0,36	1,31 28,51 24,64 17,78 20,47	1,33 3,7 3,6 3,2 3,7	0,67 2,2 2,1 1,9 1,6	3,27	2,34 22,3 9,8	0,66	0,65	0,06 0,06 0,06 0,09
Ч/20-Б ЦС- 4/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б ЦС- 5/20-Б	среднее 1 2 3 4 5	1,07 2,25 2,24 2,25 2,29 2,29 2,21	1,35 2,35 2,34 2,34 2,37 2,25	2,19	51,4 19,5 19,8 19,6 18,2 21,2	29,2 4,2 4,1 3,7 3,3 2,2	28,9 9,5 9,1 8,4 7,6 4,9	1,3 3,8 3,8 3,5 3,9 3,8	0,7 2,3 2,1 1,7 1,8 2,0	0,31 0,21 0,29 0,34 0,36 0,32	1,31 28,51 24,64 17,78 20,47 22,40	1,33 3,7 3,6 3,2 3,7 3,6	0,67 2,2 2,1 1,9 1,6 1,7	3,27 34,1 13,8	2,34 22,3 9,8	0,66	0,65	0,06 0,06 0,09 0,06

ЦС- 5/20-Б	7	2,06	2,18	2	26,3	5,6	11,6	3,1	1,7	0,30	15,16	3,0	1,6	12,1				0,06
ЦС- 5/20-Б	8	2,13	2,24	2	24,0	5,2	11,1	3,7	1,8	0,34	19,40	3,5	1,8				1,2	0,06
ЦС- 5/20-Б	9	2,14	2,25	2	23,6	5,2	11,2	3,3	1,8	0,28	18,69	3,1	1,9			3,2		0,06
ЦС- 5/20-Б	10	2,04	2,19	2	27,1	7,6	15,4	3,4	1,8	0,31	17,43	3,2	1,5					0,06
ЦС- 5/20-Б	11	2,24	2,32	2	20,1	3,9	8,7	3,7	2,1	0,27	24,28	3,4	2,0			2,8		0,06
ЦС- 5/20-Б	12	2,16	2,19	2	2,7	1,4	2,9	2,7	1,6	0,22	13,80	2,2	1,3				0,5	0,06
ЦС- 5/20-Б	13	2,29	2,37	1	8,2	3,6	8,2	3,7	2,0	0,28	24,36	3,9	2,0			4,5		0,06
ЦС- 5/20-Б	14	2,22	2,32	2	20,8	4,9	10,8	3,0	1,7	0,25	16,71	3,2	1,5				1,6	0,06
ЦС- 5/20-Б	15	2,20	2,29	2	21,4	3,9	8,6	3,7	2,0	0,29	22,40	3,4	1,8			4,8		0,06
ЦС- 5/20-Б	среднее	2,20	2,29	2,802	21,5	4,2	9,1	3,5	1,9	0,29	20,57	3,32	1,78	19,97	16,03	3,82	1,11	
		 -																
ЦС- 5/20-Б	1	1,30	1,57	4	0,0	20,4	26,6	2,4	1,4	0,26	6,22	2,6	1,3					0,15
ЦС- 5/20-Б	2	1,29	1,61	4	0,7	25,0	32,2	2,1	1,3	0,22	5,08	2,3	1,3		17,8			0,75
ЦС- 5/20-Б	3	1,43	1,66	3	4,3	16,1	23,0	2,5	1,6	0,16	8,39	2,7	1,6	25,6				0,12
ЦС- 5/20-Б	4	1,42	1,67	3	4,3	17,1	24,4	2,8	1,5	0,29	8,45	2,7	1,5					0,12
ЦС- 5/20-Б	5	1,22	1,58	4	3,7	29,3	35,8	2,2	1,3	0,26	4,87	2,3	1,4	17,8				1,11

ЦС- 6/20-Б	6		1,59	1,73		26,6	9,0	14,3	2,8	1,7	0,21	10,93	3,0	1,8					0,09
ЦС- 6/20-Б	7		1,52	1,68		29,8	10,2	15,5	2,6	1,6	0,21	9,37	3,0	1,7			2,4		0,12
ЦС- 6/20-Б	8		1,53	1,67		29,5	9,0	13,8	2,5	1,2	0,34	6,08	2,9	1,5		32,6			0,09
ЦС- 6/20-Б	9		1,35	1,65		37,8	22,1	29,8	2,4	1,3	0,30	6,01	2,6	1,3			2,5		1,71
ЦС- 6/20-Б	10		1,42	1,69		34,6	19,1	27,0	2,2	1,3	0,20	6,16	2,2	1,2				1,5	0,06
ЦС- 6/20-Б	11		1,44	1,69		33,6	17,1	24,6	2,6	1,5	0,24	8,31	3,0	1,5			1,6		0,06
ЦС- 6/20-Б	12		1,23	1,57		43,5	28,2	34,6	2,3	1,3	0,27	5,07	2,3	1,2				2,0	0,12
ЦС- 6/20-Б	среднее		1,40	1,65	2,17	35,7	18,5	25,1	2,46	1,41	0,25	7,08	2,64	1,44	21,71	25,22	2,17	1,74	
							-					-	-	-	-	-			
ЦС-7/20	1		1,56	1,76		29,1	12,7	19,8	3,0	1,4	0,36	8,46	4,0	2,0					0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2		1,56 1,32	1,76 1,62		29,1 39,8	12,7 22,4	19,8 29,7	3,0 2,3	1,4 1,4	0,36 0,20	8,46 6,28	4,0 2,4	2,0 1,1		7,8			0,06 0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3		1,56 1,32 1,49	1,76 1,62 1,66		29,1 39,8 32,4	12,7 22,4 11,4	19,8 29,7 17,0	3,0 2,3 3,1	1,4 1,4 1,4	0,36 0,20 0,37	8,46 6,28 8,23	4,0 2,4 3,7	2,0 1,1 2,0	18,2	7,8			0,06 0,06 0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3 4		1,56 1,32 1,49 1,78	1,76 1,62 1,66 1,85		29,1 39,8 32,4 19,1	12,7 22,4 11,4 3,8	19,8 29,7 17,0 6,7	3,0 2,3 3,1 3,1	1,4 1,4 1,4 1,6	0,36 0,20 0,37 0,31	8,46 6,28 8,23 12,26	4,0 2,4 3,7 4,0	2,0 1,1 2,0 2,2	18,2	7,8			0,06 0,06 0,06 0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3 4 5		1,56 1,32 1,49 1,78 1,48	1,76 1,62 1,66 1,85 1,69		29,1 39,8 32,4 19,1 32,8	12,7 22,4 11,4 3,8 14,2	19,8 29,7 17,0 6,7 21,0	3,0 2,3 3,1 3,1 2,7	1,4 1,4 1,4 1,6 1,6	0,36 0,20 0,37 0,31 0,26	8,46 6,28 8,23 12,26 8,96	4,0 2,4 3,7 4,0 3,2	2,0 1,1 2,0 2,2 2,0	18,2	7,8			0,06 0,06 0,06 0,06 0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3 4 5 6		1,56 1,32 1,49 1,78 1,48 1,49	1,76 1,62 1,66 1,85 1,69 1,70		29,1 39,8 32,4 19,1 32,8 32,5	12,7 22,4 11,4 3,8 14,2 14,2	19,8 29,7 17,0 6,7 21,0 21,0	3,0 2,3 3,1 3,1 2,7 2,3	1,4 1,4 1,4 1,6 1,6 1,3	0,36 0,20 0,37 0,31 0,26 0,26	8,46 6,28 8,23 12,26 8,96 6,47	4,0 2,4 3,7 4,0 3,2 3,1	2,0 1,1 2,0 2,2 2,0 1,6	18,2	7,8			0,06 0,06 0,06 0,06 0,06 0,09
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3 4 5 6 7		1,56 1,32 1,49 1,78 1,48 1,49 1,58	1,76 1,62 1,66 1,85 1,69 1,70 1,77		29,1 39,8 32,4 19,1 32,8 32,5 28,0	12,7 22,4 11,4 3,8 14,2 14,2 11,6	19,8 29,7 17,0 6,7 21,0 21,0 18,4	3,0 2,3 3,1 3,1 2,7 2,3 2,9	1,4 1,4 1,4 1,6 1,6 1,3 1,7	0,36 0,20 0,37 0,31 0,26 0,26 0,24	8,46 6,28 8,23 12,26 8,96 6,47 11,27	4,0 2,4 3,7 4,0 3,2 3,1 3,7	2,0 1,1 2,0 2,2 2,0 1,6 2,3	18,2	7,8	2,4		0,06 0,06 0,06 0,06 0,06 0,09 0,06
ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20 ЦС-7/20	1 2 3 4 5 6 7 8		1,56 1,32 1,49 1,78 1,48 1,48 1,49 1,58 1,68	1,76 1,62 1,66 1,85 1,69 1,70 1,77 1,78		29,1 39,8 32,4 19,1 32,8 32,5 28,0 23,7	12,7 22,4 11,4 3,8 14,2 14,2 11,6 6,3	19,8 29,7 17,0 6,7 21,0 21,0 18,4 10,5	3,0 2,3 3,1 3,1 2,7 2,3 2,9 3,5	1,4 1,4 1,4 1,6 1,6 1,3 1,7 1,9	0,36 0,20 0,37 0,31 0,26 0,26 0,24 0,28	8,46 6,28 8,23 12,26 8,96 6,47 11,27 15,72	4,0 2,4 3,7 4,0 3,2 3,1 3,7 4,1	2,0 1,1 2,0 2,2 2,0 1,6 2,3 1,9	18,2	7,8	2,4		0,06 0,06 0,06 0,06 0,06 0,09 0,06

ЦС-7/20	10		1,51	1,73		31,5	14,7	22,2	2,4	1,2	0,32	5,88	2,9	1,2				1,8	0,06
ЦС-7/21	среднее		1,56	1,74	2,20	29,1	11,7	17,6	2,8	1,5	0,29	9,47	3,49	1,83	16,65	15,93	1,95	1,77	
ЦС-8/20	1		2,71	2,72		10,0	0,4	1,1	4,4	2,4	0,28	40,94	5,3	2,9	102,7				16,8
ЦС-8/20	2		2,67	2,69		11,3	0,6	1,6	4,4	2,4	0,29	39,62	5,4	2,9		62,3			13,2
ЦС-8/20	3		2,65	2,66		12,1	0,7	1,8	4,5	2,4	0,32	38,71	5,3	2,8	88,4				13,6
ЦС-8/20	4		2,65	2,67		11,8	0,7	1,8	4,4	2,1	0,35	32,27	5,2	2,7					16,2
ЦС-8/20	5		2,66	2,67		11,6	0,4	1,2	4,5	2,5	0,27	42,78	5,8	3,3	94,2				15,8
ЦС-8/20	6		2,60	2,62		13,6	0,9	2,3	3,8	1,9	0,33	24,59	5,6	2,6					13,3
ЦС-8/20	7		2,66	2,67		11,7	0,5	1,3	4,5	2,4	0,29	41,24	5,9	2,7			8,3		14,1
ЦС-8/20	8								3,8	2,0			5,0	2,9				3,7	13,1
ЦС-8/20	9		2,68	2,70		10,9	0,6	1,6	3,9	2,0	0,34	27,58	6,7	3,8			8,7		10,6
ЦС-8/21	среднее		2,66	2,68	3,01	11,6	0,6	1,6	4,2	2,2	0,31	35,96	5,56	2,97	95,10	62,28	8,52	3,67	
					Be	рхнее	е тери	мальн	юе по	оле ву	лкана	Бурля	щий						
БУ-1/20	1		2,75	2,75		5,6	0,1	0,2	5,2	2,6	0,34	49,27	5,20	2,60	123,5				25,8
БУ-1/20	2		2,75	2,76		5,4	0,1	0,3	5,7	3,6	0,16		5,59	2,76		102,7			24,9
БУ-1/20	3		2,74	2,74		5,8	0,1	0,2	5,9	3,0	0,32	64,82	5,94	2,66			15,7		26,3
БУ-1/20	4		2,74	2,74		5,9	0,1	0,4	5,6	3,3	0,24	72,30	5,55	2,53				12,4	25,6

БУ-1/20	5		2,75	2,75		5,6	0,3	0,7	5,6	2,9	0,31	61,30	5,48	2,99	110,8				26,4
БУ-1/20	6		2,76	2,76		5,3	0,2	0,5	5,6	3,0	0,29	64,06	5,64	3,02		131,5			25,9
БУ-1/20	7		2,74	2,75		5,7	0,1	0,3	6,2	2,8	0,37	59,53	5,19	2,79			26,1		25,5
БУ-1/20	8		2,74	2,75		5,7	0,1	0,4	5,1	2,8	0,30	54,34	5,23	2,79				15,6	25,3
БУ-1/20	9		2,73	2,74		6,1	0,4	1,0	4,5	2,5	0,26	44,05	5,39	2,62	164,7				24,6
БУ-1/20	среднее		2,74	2,75	2,91	5,7	0,2	0,4	5,5	2,9	0,29	61,41	5,47	2,75	133,0	117,1	20,9	14,0	25,6
БУ-2/20	1		1,73	1,87		30,0	7,6	13,2	3,3	1,7	0,32	13,68	3,33	1,68	37,3				0,54
БУ-2/20	2		1,70	1,82		31,3	6,6	11,3	3,2	2,1	0,12	17,34	3,26	1,60		24,9			0,48
БУ-2/20	3		1,75	1,89		29,2	7,9	13,9	3,2	1,9	0,25	15,44	3,24	1,80			2,2		0,59
БУ-2/20	4		1,66	1,86		33,1	11,9	19,8	2,7	1,7	0,16	11,68	2,40	1,19				2,3	0,48
БУ-2/20	5		1,57	1,81		36,9	15,8	24,7	2,6	1,5	0,25	8,90	2,55	1,42	9,8				0,42
БУ-2/20	6		1,86	1,98		25,0	6,4	11,8	3,7	2,0	0,29	19,12	3,49	1,91		36,5			0,66
БУ-2/20	7		1,73	1,89		30,1	9,1	15,7	3,2	1,7	0,28	13,51	3,08	1,67			2,8		0,63
БУ-2/20	8		1,66	1,87		33,1	12,7	21,0	3,1	1,7	0,29	12,11	2,87	1,57				2,4	0,63
БУ-2/20	9		1,55	1,82		37,3	17,1	26,5	2,7	1,5	0,26	9,02	2,56	1,32	11,4				0,42
БУ-2/20	среднее		1,69	1,87	2,48	31,8	10,6	17,6	3,0	1,7	0,25	13,42	2,98	1,57	19,50	30,67	2,52	2,35	0,54
БУ-3/20	1		1,80	1,94		27,6	8,2	14,8	3,3	2,2	0,10	18,83	3,25	1,61	26,7				0,84

БУ-3/20	2		1,82	1,96		26,6	7,9	14,3	3,4	2,2	0,10	20,15	3,27	1,85		33,2			0,78
БУ-3/20	3		1,75	1,86		29,6	6,4	11,2	3,6	2,0	0,29	17,15	3,35	1,86			5,8		0,69
БУ-3/20	4		1,79	1,96		27,7	9,6	17,3	2,9	1,2	0,39	7,14	2,92	1,16				1,7	0,39
БУ-3/20	5		1,80	1,89		27,5	5,4	9,6	3,5	1,9	0,27	17,33	3,53	1,87	40,2				0,72
БУ-3/20	среднее		1,79	1,92	2,48	27,8	7,5	13,4	3,3	1,9	0,23	16,12	3,26	1,67	33,4	33,2	5,8	1,7	0,68
БУ-4/20	1		1,63	1,83		34,9	12,5	20,3							15,4				0,03
БУ-4/20	2		1,61	1,84		35,6	14,4	23,1	2,8	1,4	0,34	8,31	2,81	1,29		11,4			0,03
БУ-4/20	3		1,63	1,85		34,8	13,5	22,0	2,4	1,3	0,30	6,88					1,9		0,03
БУ-4/20	4		1,54	1,78		38,4	15,4	23,7	2,6	1,4	0,31	7,58	1,83	1,26				1,7	0,03
БУ-4/20	5		1,62	1,82		35,3	12,2	19,8	2,7	1,5	0,28	9,31	2,75	1,50	19,9				0,03
БУ-4/20	6		1,61	1,81		35,6	12,6	20,3	2,9	1,6	0,28	10,52	2,64	1,43		22,2			0,03
БУ-4/20	7		1,55	1,78		38,1	15,0	23,2	2,8	1,5	0,30	8,96	2,74	1,41			1,9		0,00
БУ-4/20	среднее		1,60	1,82	2,50	36,1	13,6	21,8	2,7	1,4	0,30	8,59	2,55	1,38	17,67	16,84	1,89	1,69	0,03
БУ-5/20	1		1,75	1,85		25,6	5,9	10,4	3,4	2,0	0,24	16,58	3,18	1,46	32,5				0,45
БУ-5/20	2		1,76	1,84		25,0	4,3	7,5	3,3	2,0	0,21	17,37	3,49	1,93		34,8			0,39
БУ-5/20	3		1,74	1,84		26,0	5,9	10,2	3,3	1,8	0,28	14,60	3,16	1,72			3,4		0,48
БУ-5/20	4		1,85	1,95		21,4	5,5	10,2	3,6	1,8	0,32	16,45	3,31	1,80				3,7	0,51

БУ-5/20	среднее		1,77	1,87	2,35	24,5	5,4	9,6	3,3	1,9	0,26	16,25	3,28	1,73	32,51	34,81	3,38	3,67	0,46
БУ-6/20	1		1,61	1,85		40,4	15,1	24,3	2,2	1,2	0,26	6,19	3,13	1,35	10,5				0,03
БУ-6/20	2		1,51	1,81		43,9	19,3	29,2	2,7	1,5	0,30	8,33	2,80	1,38		19,0			0,03
БУ-6/20	3		1,54	1,83		43,1	18,9	29,0	2,6	1,2	0,35	6,32	2,64	1,32			1,3		0,03
БУ-6/20	4		1,40	1,76		48,0	25,0	35,2	2,4	1,4	0,23	6,84	2,20	1,06				0,8	0,03
БУ-6/20	5		1,57	1,85		42,0	18,2	28,5	2,7	1,5	0,26	9,08	2,84	1,41	22,7				0,06
БУ-6/20	6		1,53	1,82		43,5	19,6	29,9	2,7	1,7	0,17	10,35	2,87	1,67		14,8			0,03
БУ-6/20	7		1,69	1,93		37,3	14,0	23,7	3,2	1,8	0,28	13,87	2,40	1,64			3,7		0,03
БУ-6/20	среднее		1,55	1,84	2,70	42,6	18,6	28,5	2,6	1,4	0,26	8,71	2,70	1,40	16,62	16,87	2,53	0,82	0,03
БУ-7/20	1	,	2,17	2,20		8,9	1,2	2,7	4,0	2,7	0,07	33,53	4,02	2,03	54,5				0,06
БУ-7/20	2	,	2,13	2,17		10,6	1,8	3,9	4,0	1,8	0,37	19,31	4,22	1,81		43,5			0,06
БУ-7/20	3	,	2,23	2,25		6,3	0,8	1,8	4,7	2,2	0,35	30,39	4,43	2,27			4,4		0,06
БУ-7/20	4	,	2,12	2,17		10,9	2,2	4,7	4,1	2,2	0,31	26,47	4,13	2,11				7,7	0,06
БУ-7/20	среднее	,	2,16	2,19	2,38	9,2	1,5	3,3	4,1	2,2	0,27	27,42	4,20	2,05	54,47	43,50	4,40	7,68	0,06
БУ-8/20	1		1,98	2,08		16,0	5,0	10,0	3,0	1,8	0,21	15,82	3,33	1,41		15,3			0,03
БУ-8/20	2		2,05												51,6				0,18

БУ-8/20	3	2,20	2,24		6,8	1,7	3,8	3,4	1,9	0,27	20,05	2,96	1,37				3,6	0,30
БУ-8/20	4	2,12						3,2	1,7	0,29	16,62					3,8		0,12
БУ-8/20	среднее	2,09	2,16	2,36	11,4	3,4	6,9	3,1	1,8	0,26	17,50	3,14	1,39	51,63	15,34	3,78	3,64	0,16
				Южн	ю-Ка	мбал	ьное	Цент	ралы	ю терм	иально	е поле						
ЮКЦ- 1/21	1	2,75			2,6			4,9	3,1	0,15	63,08			93,38				31,0 1
ЮКЦ- 1/21	2	2,74	2,75		2,7	0,3	0,7	5,1	2,3	0,37	41,06	5,14	2,44		114,0 7			33,9 0
ЮКЦ- 1/21	3	2,76			2,3			5,0	2,7	0,30	51,95					12,6 4		31,3 5
ЮКЦ- 1/21	4	2,72	2,73		3,5	0,2	0,5	5,2	2,8	0,30	55,28	5,31	2,77				9,37	30,1 9
ЮКЦ- 1/21	5	2,61			7,3			5,1	2,6	0,32	49,80			130,4 9				32,6 3
ЮКЦ- 1/21	среднее	2,72	2,74	2,82	3,7	0,2	0,6	5,1	2,7	0,29	52,23	5,22	2,61	111,9 3	114,0 7	12,6 4	9,37	31,8 2
		1	1	1	1		1	•	1		1	1	1	I	I	1	1	T
ЮКЦ- 9/21	1	2,66			6,3			4,8	2,4	0,34	41,39			163,8 6				25,2 0
ЮКЦ- 9/21	2	2,69	2,70		5,3	0,5	1,2	4,3	2,1	0,35	32,29	5,18	2,15		100,8 0			20,5 8
ЮКЦ- 9/21	3	2,70			4,8			4,0	2,1	0,31	31,19					7,90		22,5 1
ЮКЦ- 9/21	4	2,65	2,67		6,7	0,6	1,5	4,8	2,3	0,35	38,95	5,70	2,46				9,18	17,7 1
ЮКЦ-	5	2,73			3,9			4,7	2,4	0,33	41,85			163,1 3				21,1 6
9/21															-			
9/21 ЮКЦ- 9/21	среднее	2,69	2,68	2,84	5,4	0,5	1,4	4,5	2,2	0,33	37,14	5,44	2,30	163,4 9	100,8 0	7,90	9,18	21,4 3

ЮКЦ- 2 1/21	1	2,56			8,6			4,0	2,3	0,25	34,35			96,55				22,7	
ЮКЦ- 2 1/21	2	2,55	2,58		8,8	1,1	2,7	3,2	1,5	0,36	16,42	3,92	2,05		50,03			16,9	
ЮКЦ- 2.1/21	3	2,55			8,8			3,2	1,5	0,35	16,68					7,83		25,0 9	
ЮКЦ- 2.1/21	4	2,63	2,66		6,0	1,0	2,6	4,1	2,1	0,33	30,82	4,74	2,14				5,24	21,6 8	
ЮКЦ- 2.1/21	среднее	2,57	2,62	2,80	8,0	1,0	2,6	3,6	1,8	0,32	24,57	4,33	2,10	96,55	50,03	7,83	5,24	21,6 2	
ЮКЦ- 3/21	1	2,59			10,5			3,9	2,0	0,32	27,99			125,1 1				23,4 8	
ЮКЦ- 3/21	2	2,65	2,69		8,3	1,5	4,0	4,4	2,4	0,29	40,19	4,90	2,42		134,7 5			31,0 9	
ЮКЦ- 3/21	3	2,72			6,0			4,8	2,5	0,30	45,95					12,3 1		33,3 0	
ЮКЦ- 3/21	4	2,66	2,69		7,9	1,2	3,1	4,8	2,5	0,31	44,13	5,08	2,58				10,7 2	32,7 0	
ЮКЦ- 3/21	5	2,64			8,6			4,2	2,4	0,25	38,96			134,9 0				30,7 5	
ЮКЦ- 3/21	6	2,54	2,58		12,1	1,5	3,7	4,9	2,3	0,35	38,65	5,00	2,46		117,5 0			29,8 5	
ЮКЦ- 3/21	среднее	2,63	2,65	2,89	8,9	1,4	3,6	4,6	2,4	0,30	41,58	4,99	2,49	134,9 0		12,3 1	10,7 2	30,1 9	
		 															<u>.</u>	·	
ЮКЦ- 8/21	1	2,04			24,7									63,39				9,20	
ЮКЦ- 8/21	2	2,08	2,19		23,3	5,3	11,0	1		0,50					38,73			12,2 6	
ЮКЦ- 8/21	3	2,38			12,1			4,3	2,4	0,27	35,79					7,31		24,4 2	
ЮКЦ- 8/21	4		2,16	2,21		20,3	2,4	5,2	4,0	2,1	0,29	26,46	3,78	1,76				7,17	18,6 8
----------------	---------	------	------	------	------	------	-----	-----	------	------	------	-------	------	------	-------	-------	------	------	-----------
ЮКЦ- 8/21	5		2,25			16,8			3,0	1,7	0,26	16,64			52,77				15,3 7
ЮКЦ- 8/21	6		2,39	2,43		11,7	1,7	4,1	3,9	2,1	0,29	29,28	4,76	2,17		96,82			22,0 9
ЮКЦ- 8/21	среднее		2,22	2,28	2,71	18,2	3,1	6,8	3,8	2,1	0,32	27,04	4,27	1,97	52,77	67,77	7,31	7,17	17,0 0
ЮКЦ- 2.2/21	1		2,50			9,2			3,8	2,1	0,26	29,68			84,34				1,16
ЮКЦ- 2.2/21	2		2,43	2,48		11,6	1,9	4,6	3,19	1,85	0,25	20,82	4,03	1,77		48,54			0,38
ЮКЦ- 2.2/21	3		2,37			13,8			4,00	2,02	0,33	25,82					7,29		0,26
ЮКЦ- 2.2/21	4		2,28	2,34		16,9	2,5	5,7	2,93	1,21	0,40	9,38	3,72	1,29				4,36	0,23
ЮКЦ- 2.2/21	5		2,38			13,6			3,15	1,61	0,32	16,37			78,71				0,56
ЮКЦ- 2.2/21	среднее		2,39	2,41	2,75	13,0	2,2	5,1	3,42	1,77	0,31	20,41	3,87	1,53	81,52		7,29	4,36	0,52
ЮКЦ- 4/21	1		2,37			15,9			2,87	1,17	0,40	9,04			52,65				0,04
ЮКЦ- 4/21	2		2,37	2,42		16,1	2,4	5,7	3,27	1,90	0,25	21,29	4,10	1,99		27,11			0,23
ЮКЦ- 4/21	3		2,33			17,4			3,43	1,76	0,32	19,11					7,27		0,23
ЮКЦ- 4/21	среднее		2,36	2,42	2,82	16,5	2,4	5,7	3,19	1,61	0,32	16,48	4,10	1,99	52,65	27,11	7,27	3,22	0,16

ЮКЦ- 5/21	1		2,25			17,6			3,83	2,06	0,30	24,78			45,07				0,79
ЮКЦ- 5/21	2		2,27	3,57		17,0	1,8	4,1	3,56	2,05	0,25	23,91	4,03	2,14		59,88			1,15
ЮКЦ- 5/21	3		2,35			13,9			3,69	2,02	0,29	24,68					7,23		1,06
ЮКЦ- 5/21	4		2,04	3,06		25,4	3,7	7,6	2,75	1,31	0,35	9,46	3,55	1,45				2,08	0,74
ЮКЦ- 5/21	среднее		2,23	3,32	2,73	18,5	2,8	5,9	3,46	1,86	0,30	20,71	3,79	1,80	45,07	59,88	7,23	2,08	0,94
ЮКЦ- 6/21	1		1,75			38,8									8,85				0,18
ЮКЦ- 6/21	2		1,71			40,1													0,38
ЮКЦ- 6/21	3		1,63			43,1										2,35			0,41
ЮКЦ- 6/21	4		1,73	4,62		39,5	5,6	9,7								0,25		0,18	0,35
ЮКЦ- 6/21	5		1,75			38,9									9,07				0,49
ЮКЦ- 6/21	6		1,69	2,66		40,8	8,8	14,9	2,42	1,10	0,37	5,59				3,45			0,31
ЮКЦ- 6/21	7		2,11			26,2											0,46		0,36
ЮКЦ- 6/21	8		1,65	2,73		42,3	11,3	18,7								0,16			0,29
ЮКЦ- 6/21	9		1,70			40,6			1,95	0,91	0,36	3,81					0,51		0,21
ЮКЦ- 6/21	среднее		1,78	2,69	2,86	37,7	10,1	16,8	2,19	1,00	0,37	4,70			8,96	1,55	0,48	0,18	0,33

ЮКЦ-	1	1.60			437									11 50				0.32
7/21		1,00			ч,,,									11,50				0,52
ЮКЦ-	2	1.80	3 1 2		36.8	11 9	21.4					2 44	1 22		14 33			0.40
7/21		1,00	5,12		50,0	11,7	21,7					2,11	1,22		17,55			0,40
ЮКЦ-	3	1.63			42.6											1.07		0.23
7/21		1,05			72,0											1,07		0,25
ЮКЦ-	4	1 46	2 85		48.6	22 5	32.9										0.06	0.23
7/21		1,40	2,05		10,0	22,5	52,7										0,00	0,25
ЮКЦ-	5	1 62			433			3 61	2 05	0.26	17 14			10 51				0.35
7/21		1,02			15,5			5,01	2,05	0,20	17,17			10,51				0,55
ЮКЦ-	6	1.82	2 94		36.2	14 6	26.5	1 29	0 74	0.25	2 50	2 53	1 29		7 81			0.42
7/21		1,02	2,74		50,2	14,0	20,5	1,27	0,74	0,25	2,30	2,55	1,27		7,01			0,42
ЮКЦ-	7	1 69			40.7													0.43
7/21		1,07			т 0 ,7													0,45
ЮКЦ-	среднее	1 66	2 97	2 85	417	163	26.9	2 45	1 40	0.26	9.82	2 48	1 25	11.00	11.07	1.07	0.06	0.34
7/21		1,00	2,77	2,05	11,7	10,5	20,7	2,13	1,10	0,20	,02	2,10	1,20	11,00	11,07	1,07	0,00	0,51
		 -	-				-				-	-	-		-	-		-
ЮКЦ-	1	1 76		2 68	3/3									4.61				0.06
1/19-57		1,70		2,00	54,5									4,01				0,00
ЮКЦ-	1	1.66		2 70	10.5									2.00				0.15
1/19-50		1,00		2,79	40,3									2,99				0,15
			-								-							
ЮКЦ-	1	1 70			210			2 50	1 70	0.22	15 15			6.00				0.09
1/19-51		1,79			54,8			5,30	1,79	0,32	13,13			0,88				0,08
ЮКЦ-	2	1.60			20.5			2 95	$n n \epsilon$	0.24	21.00							0.11
1/19-51		1,00			59,5			5,85	2,20	0,24	21,00							0,11
ЮКЦ-	3	1 00			244			0 47	1 40	0.21	0 77					0.27		0.00
1/19-51		1,80			54,4			2,47	1,49	0,21	9,11					0,27		0,08

ЮКЦ- 1/19-51	среднее	1,75		2,75	36,2			3,27	1,85	0,26	15,33						0,09
1/19/51																1	
ЮКЦ- 1/19-53	1	2,04			27,8			1,90	1,24	0,13	7,13			8,51			0,12
ЮКЦ- 1/19-53	2	2,02	3,77		28,8	7,4	15,0	2,27	1,50	0,12	10,07	4,59	2,31				0,11
ЮКЦ- 1/19-53	3	1,96			30,8			3,43	1,57	0,37	13,15					0,50	0,08
ЮКЦ- 1/19-53	4	1,96	2,96		30,8	10,0	19,7	2,37	1,34	0,26	8,87	3,17	1,85		0,29		0,06
ЮКЦ- 1/19-53	среднее	1,99	3,36	2,83	29,5	8,7	17,3	2,49	1,41	0,22	9,81	3,88	2,08				0,09
		 													•		
ЮКЦ- 1/22-1	1	2,66	2,66		6,1	0,3	0,8	5,57	2,88	0,32	58,18	5,59	2,99	184,9			35,3 6
ЮКЦ- 1/22-1	2	2,68	2,68		5,4	0,2	0,4	5,92	3,00	0,33	64,00	5,51	3,22	140,8			40,4
ЮКЦ- 1/22-1	3	2,65	2,66		6,2	0,2	0,7	5,84	2,96	0,33	61,65	5,73	3,11				33,8 0
ЮКЦ- 1/22-1	4	2,65	2,66		6,5	0,6	1,7	4,72	2,90	0,20	53,42	5,33	2,56				8,53
ЮКЦ- 1/22-1	5	2,68	2,68		5,4	0,2	0,7	5,24	2,89	0,28	57,36	5,58	3,19			24,9	29,6 3
ЮКЦ- 1/22-1	6	2,62	2,64		7,5	0,7	1,9	4,81	2,63	0,29	46,62	5,12	3,02			13,3	8,35
ЮКЦ- 1/22-1	7	2,63	2,64		7,2	0,7	1,7	4,61	2,16	0,36	33,37	5,01	2,59				16,4 5
ЮКЦ- 1/22-1	среднее	2,65	2,66	2,83	6,3	0,4	1,1	5,24	2,78	0,30	53,51	5,41	2,95				24,6 5

ЮКЦ-	1	2 20	2 4 2		15 1	2.0	47	1.02	1 00	0.27	7.07	2.07	1 20	26.05		0.14
1/22-2		2,38	2,42		13,1	2,0	4,/	1,92	1,08	0,27	7,07	3,07	1,38	30,93		0,14
ЮКЦ-	2	2 4 5	2 50		12 5	2.0	48	2 28	1 19	0.31	9 1 4	2 95	1 39	60.92		0.21
1/22-2		2,10	2,00		12,0	2,0	1,0	2,20	1,17	0,51	>,11	2,95	1,57	00,92		0,21
ЮКЦ-	3	2.48	2.52		11.5	1.7	4.1	2.86	1.31	0.37	11.57	4.12	1.42	63.97		0.22
1/22-2		 _,	_,		,0	-,,	.,1	_,00	- ,0 -	0,07	11,0 /	.,	-,			•,==
ЮКЦ-	4	2.33	2.39		17.0	2.7	6.4	2.51	1.12	0.38	7.96	1.80	1.11			0.18
1/22-2)	<i>y</i>		-) -		-)	<i>)</i> -	,	-)	-))	,			
ЮКЦ-	5	2,40	2,44		14,2	1.8	4.3	2,29	1,29	0.27	10,15	2,41	1.06			0.21
1/22-2	6	,	,		,	,	,	, 	,	,	,	,	,			
ЮКЦ-	6	2,43	2,48		13,3	2,1	5,2	2,26	1,11	0,34	8,08	3,07	1,20		4,64	0,20
1/22-2		, 			,	,		,	,	,	,	-	-		, í	
ЮКЦ-	1	2,23	2,30		20,2	3,0	6,7	3,21	1,26	0,41	10,03	2,12	0,81		1,66	0,16
1/22-2	0		-		-		-		-	-	-	-	-			-
ЮКЦ-	8	2,43	2,48		13,2	1,9	4,7	3,14	1,67	0,30	17,73	3,32	1,28			0,21
1/22-2	0															
ЮКЦ-	9	2,43	2,48		13,2	2,0	4,8	2,52	1,34	0,30	11,43	3,01	1,60			0,31
1/22-2 IOI/II																
ЮКЦ-	среднее	2,39	2,45	2,80	14,5	2,1	5,1	2,56	1,26	0,33	10,35	2,88	1,25			0,20
1/22-2							ļ									
IOIUI	1	1		r –				1		[[1	
ЮКЦ-	I	2,44	2,48		12,7	1,6	4,0	3,98	2,27	0,26	31,61	4,40	2,07	43,17		0,28
1/22-2-3	2	-	-		-		-				-		-	-		
ЮКЦ-	2	2,34	2,40		16,5	2,5	5,8	3,50	1,75	0,33	19,13	4,64	2,32	23,59		0,15
1/22-2-3	2															
ЮКЦ-	3	2,36	2,38		15,6	0,8	1,9	3,36	1,81	0,30	20,14	3,86	2,28			0,17
1/22-2-3	4		-			-	-				-		-			
ЮКЦ-	4	2,42	2,45		13,6	1,4	3,5	3,79	1,97	0,32	24,60	4,05	2,14			0,26
1/22-2-3	5	-														-
ЮКЦ-	3	2,43	2,47		13,2	1,7	4,1	3,63	1,57	0,39	16,56	4,00	1,61		8,24	0,21
1/22-2-3					-	-				-			-			

ЮКЦ- 1/22-2-3	6		2,41	2,45		13,9	1,6	3,9	3,76	2,05	0,29	26,15	4,04	1,99		5,77	0,25
ЮКЦ- 1/22-2-3	7		2,34	2,40		16,5	2,7	6,3	3,08	1,60	0,31	15,71	4,32	1,69			0,12
ЮКЦ- 1/22-2-3	среднее		2,39	2,43	2,80	14,6	1,8	4,2	3,58	1,86	0,31	21,99	4,19	2,02			0,21
ЮКЦ- 1/22-3	1		1,20	1,54		58,4	28,7	34,4	1,05	0,50	0,36	0,80			3,59		0,08
ЮКЦ- 1/22-3	2		1,20	1,59		58,3	32,7	39,2	1,09	0,57	0,31	1,03			2,60		0,08
ЮКЦ- 1/22-3	3		1,13	1,54		60,8	36,4	41,1	0,93	0,60	0,13	0,93					0,12
ЮКЦ- 1/22-3	4		1,28	1,59		55,4	23,5	30,2	1,80	1,05	0,25	3,49					0,12
ЮКЦ- 1/22-3	5		1,19	1,54		58,7	29,5	35,1	1,07	0,59	0,29	1,06				0,16	0,10
ЮКЦ- 1/22-3	6		1,34	1,64		53,3	22,0	29,6	1,36	0,85	0,18	2,29	1,36	0,56		0,75	0,07
ЮКЦ- 1/22-3	7		1,28	1,62		55,4	25,9	33,3	1,26	0,85	0,08	2,02	1,33	0,65			0,08
ЮКЦ- 1/22-3	8		1,22	1,61		57,6	31,8	38,9	1,01	0,56	0,28	0,97	1,10	0,62			 0,08
ЮКЦ- 1/22-3	среднее		1,23	1,58	2,88	57,3	28,8	35,2	1,20	0,70	0,24	1,57	1,26	0,61			0,09