

*На правах рукописи*



**ШАНИНА ВИОЛЕТТА ВАЛЕРЬЕВНА**

**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)**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и  
грунтоведение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, профессор **Трофимов Виктор Титович**

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научным вопросам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН **Карпов Геннадий Александрович**

кандидат технических наук, начальник отдела геомеханики

ООО "Газпром геотехнологии"

**Филимонов Юрий Леонидович**

Ведущая организация:

**Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО)** (поселок Зеленый, МО)

Защита диссертации состоится 20 декабря 2013 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.30 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

Автореферат размещен на интернет-сайтах Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [www.geo.web.ru](http://www.geo.web.ru) и Министерства образования и науки Российской Федерации [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru). С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале отдела диссертаций Фундаментальной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Ломоносовский проспект, 27, сектор «А», 8 этаж, к. 812).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.30, профессору В.Н. Соколову.

Автореферат разослан 12 ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
д.г.-м.н., профессор



В.Н. Соколов

## Основные положения

*Актуальность исследований.* В настоящее время приоритетное значение имеет развитие возобновляемых источников энергии. Несколько десятилетий проводится изучение состава, строения и свойств гидротермально-измененных пород. В середине прошлого века начались экспериментальные исследования, направленные на изучение преобразований минералов и пород под действием гидротермальных процессов. Но лишь единичные исследователи оценивали при этом изменение их физических и физико-механических свойств. До сих пор остается малоизученным изменение свойств пород в режиме реального времени, хотя это особенно важно в районах действующих геотермальных электростанций и сказывается на безаварийной работе оборудования.

*Цель работы* – установить особенности изменения состава, строения и свойств вулканогенных пород под воздействием гидротермальных процессов посредством выполнения лабораторных экспериментов и натурных исследований на примере андезитов и базальтов Кошелевского вулкана и туфов Паужетского месторождения (Камчатка), а также базальтов (Исландия).

*Основные задачи исследования.* 1. Проанализировать опубликованные данные об изменении состава, строения и свойств вулканогенных пород под воздействием гидротермальных процессов. 2. Разработать методику проведения лабораторных экспериментов, моделирующих природные условия гидротермальных систем, а также исследований изменений состава, строения и свойств пород в природных кипящих и грязевых котлах, сливах из скважин, массиве гидротермальных глинистых грунтов. 3. Определить характер преобразований состава, строения и свойств вулканогенных пород под воздействием гидротермальных растворов различного химического состава при разных температурах и давлениях. 4. Сопоставить результаты изменения состава, строения и свойств пород в ходе проведения натурных исследований и лабораторных экспериментов.

*Объекты исследования.* Вулканогенные породы Паужетского месторождения, вулканов Кошелевский (Камчатка) и Крафла (Исландия).

*Научная новизна работы:* 1) разработана методика изучения изменений состава, строения и свойств пород при гидротермальных преобразованиях в режиме реального времени, обеспечивающая повышение качества экспериментальной информации о свойствах вмещающих гидротермальный резервуар пород, необходимой для моделирования термогидродинамических процессов, происходящих в природных условиях и во время эксплуатации геотермальных месторождений; 2) показана однонаправленность гидротермального преобразования пород в натуральных и лабораторных условиях; 3) получены уточняющие данные, демонстрирующие определяющее влияние начальной пористости пород на характер изменения их свойств в режиме реального времени (андезиты с открытой пористостью менее 10 % характеризуются уменьшением прочности на одноосное сжатие, а пористые базальты и туфы – увеличением); 4) впервые с помощью компьютерной рентгеновской микротомографии получены данные об изменении строения и свойств пород под воздействием гидротермальных процессов; 5) при натуральных исследованиях показано влияние температур термальных вод на характер образующейся корочки гейзерита: в слабощелочных водах с температурами 35-40 °С за год ее толщина достигает 1-2 см, а при температурах 68-75 °С – 1-3 мм, за счет более плотной упаковки слагающих ее частиц кремнезема.

#### *Защищаемые положения*

*1. Индикатором скорости преобразования состава исходных пород под воздействием гидротермальных процессов является изменение плотности твердого компонента грунтов, характеризующей среднюю плотность слагающих породу минеральных частиц. Это подтверждается проведенными исследованиями, в которых данный показатель уменьшается за счет появления новообразованных менее плотных минералов (монтмориллонит, кристобалит); его увеличение происходит за счет образования сульфидов железа – пирита и марказита - при их кристаллизации из кислых сульфатных растворов. Скорость изменения пород за изученный период (от 15 суток до 3 лет) возрастала с увеличением их исходной пористости. Она больше у туфов Паужетского*

геотермального месторождения и базальтов вулканов Кошелевский и Крафла (с пористостью более 36 %) и меньше у плотных андезитов Кошелевского вулкана (с пористостью менее 10 %). Увеличение температуры ускоряет процессы преобразования туфов, что отражается на изменении их свойств – уменьшении плотности твердого компонента с 2,7 до 2,4 г/см<sup>3</sup> (на 11 %) за 30 суток при 200 °С и за 15 суток при 300 °С и снижении скоростей прохождения продольных волн с 2,5 км/с до 1,5 км/с (на 40 %) в аналогичных условиях.

2. В андезитах, базальтах и туфах, помещенных в массив гидротермальных глинистых грунтов, процессы выщелачивания и растворения исходных минералов преобладают над образованием новых, в результате чего пористость пород увеличивается. В натурных исследованиях в массивах у самых устойчивых пород - андезитов - произошло увеличение пористости с 10 до 15 % за 2 года. При воздействии на исследованные породы гидротермальных растворов на тех же термальных полях пористость андезитов, базальтов и туфов изменилась в небольшом диапазоне (от 1 до 4 %) из-за активного развития процессов растворения первичных минералов с одновременно идущим процессом осаждения из растворов новых минералов.

3. Воздействие гидротермальных растворов, температуры и давления на исследованные породы в течение 15 суток – 3 лет вызывает снижение прочности пород. Это подтверждается лабораторными экспериментами в автоклавах с использованием гидротермальных растворов. При температуре воздействия 300 °С после 30 суток прочность на одноосное сжатие пород в ряду андезиты – базальты – пористые базальты снизилась на величину от 15 до 45 %. При испытании в натурных условиях при температурах до 100 °С за такой же период прочность андезитов уменьшилась на 26 %; исключение составили базальты, прочность которых увеличилась на 38 % из-за образования дополнительных контактов за счет активного минералообразования в открытом поровом пространстве пород и кристаллизации пирита и марказита.

4. Разработанная комплексная методика позволяет изучать изменение состава, строения и свойств туфов, андезитов и базальтов при

*гидротермальных преобразованиях в режиме реального времени в глубинных и поверхностных условиях.* Методика состоит из четырех блоков, включающих проведение параллельных натуральных исследований и длительных лабораторных экспериментов в автоклавах, и оптимальное сочетание современных методов исследования состава, строения и свойств пород.

*Практическая значимость.* Разработана методика проведения параллельных натуральных исследований и лабораторных экспериментов, показывающая соответствие изменений грунтов при гидротермальных преобразованиях в природе и при физическом моделировании в лаборатории. Предложенная методика может использоваться в концепции прогнозирования изменения пород при гидротермальных процессах. Установлено сочетание особенностей изученных пород и гидротермальных растворов, которое обуславливает наиболее и наименее интенсивные процессы преобразования пород. Аналогичные эксперименты можно использовать для воспроизведения условий закачки отработанных термальных вод, оценки изменений состава, строения и свойств грунтов в режиме реального времени, оценки и прогноза изменения мощности массива гидротермальных глинистых грунтов. Полученные результаты могут использоваться при решении вопросов, связанных с эксплуатацией геотермальных электростанций.

*Апробация работы и публикации.* Основные результаты обсуждались на Межвузовской конференции "Молодые – наукам о Земле" (Москва, 2008), VI Всероссийской молодежной школе «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2008), Международной конференции "Ломоносов" (Москва, 2008, 2012), Генеральной ассамблее европейского союза по наукам о Земле (Вена, Австрия, 2009, 2013), Мировом геотермальном конгрессе (Бали, Индонезия, 2010), Первом и Третьем Европейских Днях аспирантов, занимающихся геотермальной энергетикой (Потсдам, Германия, 2010 и Пиза, Италия, 2012), Научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, 2011, 2013). Положения и выводы работы изложены в журналах «Инженерная геология» (2011, №1) и «Геоэкология».

Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология» (2013, № 5), входящих в перечень рекомендованных ВАК, и статьях, опубликованных в сборниках трудов научных конференций, в том числе в сборнике XI Сергеевских чтений «Моделирование при решении геоэкологических задач» (2009).

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, 9 приложений и списка литературы из 209 наименований. Работа изложена на 242 страницах, включает 156 рисунков и 53 таблицы.

*Фактический материал.* Систематизированы данные, полученные при проведении экспериментов (2007-2012) и полевых исследований (2007-2011) во время обучения на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ. Изучено более 490 образцов вулканогенных пород, проведено 30 лабораторных экспериментов и 64 натурных исследования.

*Методика исследований.* Минеральный состав пород определялся по шлифам (94 шлифа) и с помощью рентгеновской дифрактометрии (30 образцов); химический состав - силикатным анализом (275 образцов); поровое пространство – с использованием рентгеновской микротомографии (22 съемки); микростроение – с применением растровой электронной микроскопии (40 образцов). Исследование свойств проводилось современными методами, используемыми в грунтоведении (более 1000 определений). Статистическая обработка данных проведена в программе «Statistica». Комплексное сочетание методов позволило получить надежные и достоверные научные результаты.

*Личный вклад автора.* Участие в полевых работах на Камчатке (2007-2011): гидрогеохимическое опробование и температурная съемка; проведение натурных исследований. Отбор керн и образцов базальтов вулкана Крафла (Исландия). Изучение минерального и химического состава, строения и свойств пород, анализ и обработка полученных результатов. Проведение лабораторных экспериментов (от 15 до 370 суток) и натурных исследований (до 3 лет).

*Благодарности.* Научному руководителю профессору В.Т. Трофимову за поддержку и вдохновение для работы; к.г.-м.н. А.Ю. Бычкову, помогавшему в проведении лабораторных экспериментов; коллективу кафедры инженерной и

экологической геологии, особенно к.г.-м.н. В.М. Ладыгину и к.г.-м.н. Ю.В. Фроловой; д.г.-м.н. С.Н. Рычагову за поддержку и советы; проф. В.Н. Соколову, к.г.-м.н. М.С. Чернову, к.ф.-м.н. К.М. Герке, к.г.-м.н. Д.В. Коросту, к.г.-м.н. В.О. Япаскурту, к.г.-м.н. Р.В. Веселовскому, к.г.-м.н. Е.Н. Самарину, Т.Ю. Меркуловой, к.г.-м.н. И.А. Бражнику и к.г.-м.н. В.В. Фуниковой, В.Ю. Ионову и Р.В. Васильеву за помощь в исследованиях; проф. Ю.К. Васильчуку и проф. В.А. Королеву за ценные советы; к.х.н. А.В. Сергеевой и сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, особенно мл.н.с. А.А. Нуждаеву и И.А. Нуждаеву за помощь в проведении натурных исследований; сотрудникам лаборатории грунтоведения; студентам и аспирантам, с которыми проходили месяцы полевых работ.

### **Содержание работы**

#### **Глава 1. Современные представления о закономерностях изменения состава, строения и свойств пород под воздействием гидротермальных процессов и подходы к их изучению**

Изучению гидротермальных процессов посвящены работы ученых В.В. Аверьева, В.И. Белоусова, Е.А. Вакина, В.А. Ерощева-Шака, В.А. Ильина, Г.А. Карпова, А.В. Кирюхина, В.И. Кононова, В.М. Ладыгина, В.Л. Леонова, Ю.Ф. Манухина, С.И. Набоко, С.Н. Рычагова, И.Б. Словцова, В.М. Сугрובה, Ю.В. Фроловой, О.Ф. Gudmundur, J.W. Hedenquist, A.E. Wilfred, и др. При эксплуатации электростанций необходима закачка отработанных вод в резервуар, что вызывает изменение исходных пород. С XX века проводятся экспериментальные исследования преобразования пород, обусловленные научными задачами и практической необходимостью. Недостаточно изученным остается вопрос трансформации свойств пород под воздействием гидротермальных процессов. Автоклавное моделирование обеспечивает точные знания граничных условий. С инженерно-геологической точки зрения гидротермально-метасоматические породы до сих пор изучены недостаточно. В настоящее время изучение закономерностей формирования различных типов грунтов и их свойств – актуальная задача современного грунтоведения.



## Глава 2. Характеристика объектов исследования, расположенных в областях современного развития гидротермальных процессов

Кошелевский вулканический массив состоит из пяти сросшихся стратовулканов (Q<sub>II-IV</sub>). На склоне Западно-Кошелевского расположено Нижне-Кошелевское, а в кратерной зоне вулкана Валентин - Верхне-Кошелевское термальные поля.

Общая минерализация вод на Нижне-Кошелевском поле 0,3-0,7 г/л, в грязевых котлах (2-3 г/л). На территории поля андезиты преобразуются в монтмориллонитовые глины (Лучко и др., 2009). По свойствам (табл. 1) изученные породы делятся на группы: 1) андезиты, 2) базальты (НК-100-1 и НК-100-3), 3) пористые базальты (НК-100-2, -102 и -110).

Таблица 1. Свойства исходных пород Западно-Кошелевского вулкана

Проба (количество образцов)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	n, %	$n_o$ , %	$W_g$ , %	$W_b$ , %	$V_p$ , км/с	$V_{pB}$ , км/с	$V_s$ , км/с	$\mu$	Ед, ГПа	$R_c$ , МПа	$\chi \cdot 10^{-3}$ СИ
НК-1/09-1с (32)	2,51	2,68	6,3	4,5	0,1	1,8	4,10	4,95	2,30	0,18	37,1	151	28,3
НК-1/09-1 (16)	2,50	2,69	7,2	4,6	0,2	1,8	3,95	5,05	2,30	0,23	34,9	168	29,4
НК-1/09-2 (18)	2,47	2,76	10,5	5,1	0,4	2,1	4,05	4,90	2,50	0,16	35,8	94	23,2
НК-1/09-3 (9)	2,45	2,70	9,3	4,9	0,3	2,0	3,85	4,95	2,25	0,23	31,9	122	25,0
НК-100-1 (37)	2,25	2,86	21,3	10,0	0,5	4,5	4,15	5,15	2,40	0,24	32,2	55	41,2
НК-100-3 (27)	2,23	2,93	23,8	11,6	0,4	5,2	4,05	5,15	2,35	0,26	29,6	39	49,0
НК-100-2 (7)	1,51	2,87	47,5	16,6	0,5	11,0	3,30	4,10	2,05	0,17	15,0		32,2
НК-102 (38)	0,97	2,87	66,2	49,7	0,5	51,4	2,75	2,65	1,65	0,16	6,6	7	10,1
НК-110 (12)	1,73	2,86	39,6	25,0	0,6	14,5	2,65	3,40	2,00	0,25	11,1	12	52,7

Примечания:  $\rho$  - плотность, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_s$  - плотность твердого компонента, г/см<sup>3</sup>; n - пористость, %;  $n_o$  - открытая пористость, %;  $W_g$  - гигроскопическая влажность, %;  $W_b$  - водопоглощение, %;  $V_p$  и  $V_{pB}$  - скорость прохождения продольных волн в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях, км/с;  $V_s$  - скорость прохождения поперечных волн, км/с;  $\mu$  - коэффициент Пуассона; Ед - динамический модуль упругости, ГПа;  $R_c$  - прочность на одноосное сжатие, МПа;  $\chi \cdot 10^{-3}$  - магнитная восприимчивость, ед. СИ

На Верхне-Кошелевском поле воды кислые и слабо кислые с минерализацией более 1 г/л. Измененные породы покрыты корочками возгонов из сульфатов Fe, Al, Mg, Ca, самородной серы. Для исходных андезитов выстроен ряд по степени изменения пород до опалитов (Фролова и

др., 2010). На территории поля опробовано субвулканическое тело андезитового состава ( $\text{SiO}_2$  60-63 %). Андезиты плотные (2,50 г/см<sup>3</sup>), с плотностью твердого компонента 2,78 г/см<sup>3</sup>, пористостью 10%, гигроскопической влажностью 0,7 %, с прочностью на одноосное сжатие 123 МПа. Скорости продольных волн 4,30 км/с, при водонасыщении 5,30 км/с, скорость поперечных волн 2,40 км/с. Динамический модуль упругости 35 ГПа, коэффициент Пуассона 0,26. Магнитная восприимчивость  $34 \cdot 10^{-3}$  СИ.

*Паужетское геотермальное месторождение* входит в Паужетско-Камбально-Кошелевский геотермальный район. В семидесятые годы XX века принято решение об утилизации отработанного теплоносителя реинжекцией (методом, рекомендованным ГКЗ СССР, как исключаяющим воздействие на окружающую среду). Пробурено 14 нагнетательных скважин, что негативно сказалось на параметрах эксплуатации. Исследовано обнажение андезидацитовых ( $\text{SiO}_2$  62-66 %) туфов верхнепаужетской подсвиты от тонкообломочных (пелитовых и алевритовых) до крупнообломочных (псефитовых); отобрано 177 образцов (табл. 2).

Таблица. 2. Свойства туфов верхнепаужетской подсвиты

Проба	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	n, %	$n_o$ , %	$W_g$ , %	$W_b$ , %	$V_p$ , км/с	$V_{pB}$ , км/с	$V_s$ , км/с	$R_c$ , МПа	$\chi \cdot 10^{-3}$ СИ
НП-08-7	1,50	2,71	44,6	39,5	3,6	26,0	2,25	2,00	1,35	8	4,1
НП-1/1	1,51	2,72	42,9	33,9	2,0	22,6	2,10	2,45	1,35	11	5,2
НП-1/4	1,53	2,70	43,2	31,2	0,7	20,5	2,30	2,60	1,55	8	5,5
НП-08-3	1,50	2,64	43,3	33,9	6,9	22,5	2,10	2,15	1,50	5	6,2
НП-08-2	1,33	2,71	50,9	38,0	3,6	28,7	1,55	1,35		2	7,3
НП-2/1	1,39	2,71	48,8	36,8	2,3	26,7	1,85	1,60	1,20	5	6,2
НП-08-4	1,14	2,68	57,4	42,9	4,3	38,2	1,60	1,60	1,20	4	7,5
НП-5/1	1,59	2,78	42,7	28,8	1,1	18,1	2,25	2,35	1,50	10	8,7
НП-08-6	1,70	2,72	37,6	20,8	1,3	12,5	1,95	2,95		5	14,9
НП-08-5	1,75	2,73	35,8	25,5	3,1	14,6	2,60	2,75	1,55	10	18,0

*Вулканическая область Крафла* расположена на СВ Исландии в кальдере одноименного вулкана. Здесь находится геотермальная электростанция и реализуется проект глубокого бурения, в рамках которого запланировано бурение на глубину 4-5 км для достижения гидротермальных флюидов с температурой 400-600 °С. Минерализация вод 1-2 г/л. Высокая пористость

(32-52 %) базальтов потоков 1727–1729 и 1984 гг. определяет низкие значения плотности ( $1,44-2,08 \text{ г/см}^3$ ), скорости распространения продольных волн (2,20-3,30 км/с) и прочности на одноосное сжатие (14-34 МПа). Проницаемость  $1,4 \cdot 10^{-5}$  мД.

### **Глава 3. Методика экспериментальных исследований**

Разработанная методика состоит из блоков: 1) полевое изучение гидротермальных проявлений на термальных полях (температурная съемка, геохимическое опробование), отбор проб термальных вод, донных осадков и пород; 2) лабораторное изучение состава, строения, свойств пород, определение состава вод и осадков; 3) проведение натурных исследований - изучение изменений состава, строения и свойств пород: а) в естественных проявлениях термальных вод, сливах из скважин, б) в массивах гидротермальных глинистых грунтов; 4) лабораторные эксперименты в автоклавах при температурах и давлениях, характерных для исследуемых гидротермальных систем.

*Методика лабораторного определения состава, строения и свойств грунтов.* Минеральный состав определялся в 94 шлифах. Точечные химические анализы и исследование порового пространства с использованием растрового электронного микроскопа «LEO 1450 VP» снс М.С. Черновым (12 образцов) и микроскопа «Jeol JSM-6480LV» доц. В.О. Япаскуртом (28 образцов). Состав новообразований определялся количественным рентгеноструктурным анализом В.В. Крупской, Л.А. Левицкой и С.В. Закусиным (30 образцов). Состав рудных минералов уточнялся с помощью исследования магнитных свойств пород снс Р.В. Веселовским (6 образцов). Химический анализ грунтов выполнен в спектрально-химической лаборатории МГУ (аналитик М.П. Юкина) (7 образцов), в Аналитическом центре Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Н.И. Чеброва, Н.А. Соловьева и В.М. Рагулина) (28 образцов). Большая часть образцов (240) изучена на «Спектроскане Макс GV» автором под руководством доц. Е.Н. Самарина. Для оценки изменения состава пород использован метод расчета баланса вещества метасоматических пород (Казицын, 1972). Для исследования порового пространства применен метод

рентгеновской микротомографии (сканер Skyscan1172 на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых) (22 съемки). Разрешение съемки 6,71-7,01 мкм. В процессе сканирования объект вращается вокруг своей оси, накапливается пакет изображений из сотен теневых проекций (рис. 1, а), из них после математической реконструкции получается стек двухмерных изображений. Для получения объемных изображений картины рентгеновской плотности обрабатываются в программах SkyScan и ImageJ. С помощью программных комплексов из отсегментированного пустотного пространства выделяются сеточные модели (рис. 1, б). Помимо статистики распределения пор по размерам рассчитываются абсолютные проницаемости и пористость.

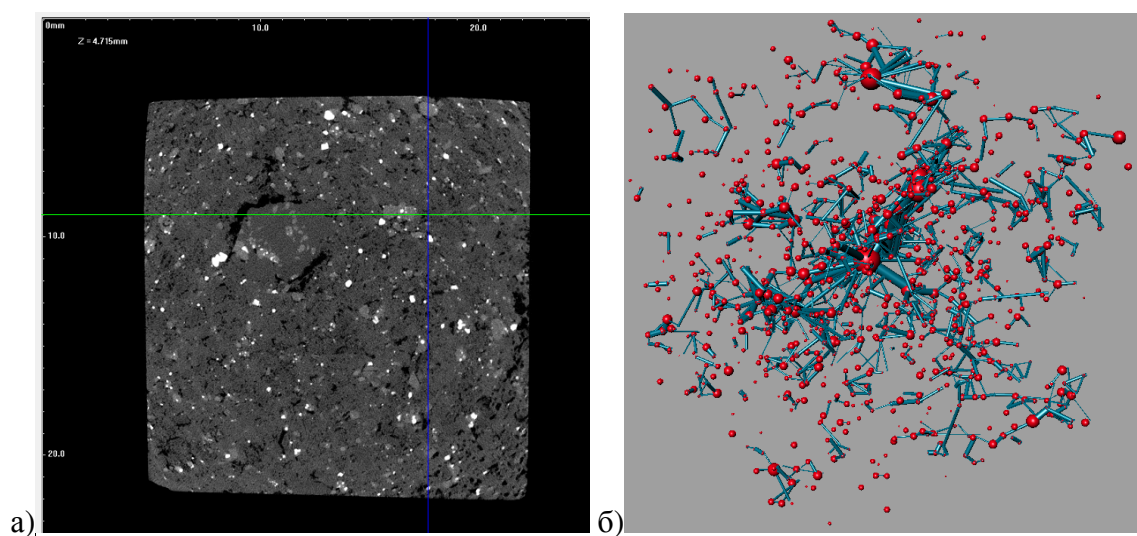


Рис. 1. Образцы базальтов по результатам томографии: а) НК-100-1-34 теневая проекция; б) НК-100-1-32 сеточная модель пустотного пространства (поры и каналы)

Для изучения свойств образцы разрезались на станке и шлифовались. Проводилось определение плотности грунта и его твердого компонента, общей пористости, открытой пористости, водопоглощения, гигроскопической влажности, скоростей прохождения упругих волн (продольных и поперечных в сухом и продольных в водонасыщенном состояниях), магнитной восприимчивости, прочности на одноосное сжатие и растяжение, рассчитывался коэффициент Пуассона и динамический модуль упругости. Все работы выполнялись по стандартным методикам изучения свойств скальных грунтов (Лабораторные работы..., 2008).

*Методика натуральных исследований.* Проведены 64 натуральных исследования длительностью от 19 суток до 3 лет с использованием 174

образцов. На изученных объектах под руководством А.А. Нуждаева проводилась температурная съемка, которая позволила выбрать разнообразные участки полей. В местах исследований определялись физико-химические параметры растворов: температура, рН, Eh, минерализация. Температуры исследований: 49-100 °С для Нижне- и 71-102 °С для Верхне-Кошелевского полей и 31-102°С – для Паужетского месторождения. Отбор воды и осадков проводился для определения состава растворов и концентрации элементов. Проведено классифицирование термальных вод. Согласно пособию «Гидрохимия» (1989), природные воды рационально делить на 7 групп, из них исследованы от I - сильнокислые (рН < 3) до V – слабощелочные (рН=7,5-8,5). По ГОСТ 17.1.1.02-77 подземные воды по температуре делятся на 4 категории: 1 – холодная (<20 °С); 2– теплая (20-35 °С); 3 – горячая (35-42 °С); 4 – очень горячая (>42 °С). Практически все исследованные воды относятся к последней категории, поэтому она разбита на подкатегории: 4<sup>1</sup> – 42-60 °С; 4<sup>2</sup> – 60-75 °С; 4<sup>3</sup> – 75-90 °С; 4<sup>4</sup> - 90-100 °С. При температуре выше 100 °С шаг разбиения увеличен: 4<sup>5</sup> – 101-200 °С; 4<sup>6</sup> – 201-300 °С; 4<sup>7</sup> – 301-400 °С; 4<sup>8</sup> - 401-500 °С. Согласно «Справочнику по гидрохимии» (1989), по минерализации воды делятся на категории, из них исследованы воды от А – ультрапресных (< 0,2 г/л) до Г – солоноватых (1-3 г/л). В водах 3 типа геохимических обстановок (Зверев, 1993): а – окислительная (Eh > 150 мВ), б – переходная (Eh = 0-150 мВ), в – восстановительная (Eh < 0 мВ). Например, источник НК-1 соответствует Ш4<sup>3</sup>Ав (слабокислые, очень горячие (75-90 °С), ультрапресные воды с восстановительной обстановкой).

Изучение изменений пород без активного воздействия термальных вод проводилось путем размещения образцов пород в массивах гидротермальных глинистых грунтов. В шурфах на глубинах 0,15, 0,3 и 0,5 м, что соответствует зонам сернокислотного и углекислотного выщелачивания, между которыми, как правило, располагается слой «синих глин», были помещены образцы (72) изученного состава, строения и свойств. Температура на глубине 0,15 м 28-106 °С, на 0,3 м 35-103 °С, на 0,5 м 37-103 °С.

*Методика автоклавного моделирования.* Использовались автоклавы из титанового сплава ВТ-8, в каждый помещались от 2 до 6 образцов и заливались раствором. Автоклавы выдерживались в печи при заданной температуре 100-450 °С. Проведено 30 лабораторных экспериментов длительностью от 15 до 370 суток, параметры которых выбраны с учетом знаний об условиях гидротермальных систем вулканов Крафла (температура 300 °С, давление 86 бар), Кошелевский (291 °С) и Паужетской (до 200 °С). Давление создавалось исходя из коэффициента заполнения автоклава при данных температурах ( $K=0,65$ ).

Базальты вулкана Крафла испытывались в растворе «щелочной» (рН=8,2) (табл. 3), его состав выбран по литературным данным. Для создания раствора «кислый-1» в «щелочной» добавляли щавелевую кислоту. В Паужетской системе трещинные хлоридно-натриевые воды с минерализацией 2,6-3,4 г/л, поровые растворы в поверхностной зоне сульфатные, с минерализацией до 13 г/л. Поэтому для опытов с туфами созданы растворы «кислый-2» (рН=4,1) и «кислый-3» (рН=1). Опыты с породами Кошелевского вулкана: 1) в водах, отобранных на Нижне-Кошелевском поле (НК-1 и НК-2 (III<sup>3</sup>Ав)), а для андезитов с Верхне-Кошелевского раствор ВКВ-4 (I4<sup>3</sup>В); 2) в растворах «щелочной» и «кислый-1».

Таблица 3. Состав растворов, использованных в лабораторных экспериментах

Раствор	Концентрация вещества, г/л				CO <sub>2</sub> , моль/кг
	NaCl	NaHCO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
Щелочной	0,499	0,142	0,068	-	-
Кислый-1	0,499	0,142	0,068	-	5,5
Кислый-2	1	0,1	-	-	1,5
Кислый-3	-	-	-	9,8	-

#### **Глава 4. Закономерности изменения состава, строения и свойств исследованных вулканогенных пород**

*Результаты натурных исследований.* Натурные исследования на Нижне-Кошелевском поле проведены с андезитами и базальтами. За 19-20 суток не меняются их плотность, скорость прохождения упругих волн, магнитная

восприимчивость. Плотность твердого компонента андезитов снижается на  $0,07 \text{ г/см}^3$  за счет образования глинистого налета на открытой поверхности образцов. В то же время у пористых базальтов она увеличивается на  $0,03 \text{ г/см}^3$ , что обусловлено наибольшей открытой пористостью данной группы (до 50 %) и образованием в слабокислых растворах пирита и марказита (плотность  $4,8-5,1 \text{ г/см}^3$ ), что отражается и на химическом составе пород (увеличивается содержание серы). Разная тенденция в изменении прочности на одноосное сжатие: у андезитов она уменьшается за счет открытия микротрещин при длительном водонасыщении, а у пористых базальтов увеличивается, так как в них преобладает образование новых контактов за счет новообразований.

После 370 суток наибольшие изменения свойств – увеличение плотности твердого компонента наблюдались у базальтов за счет образования в открытом поровом пространстве барита, пирита и марказита (рис. 2, а). Большинство новых минералов – аутигенные образования. Данному процессу способствовало увеличение открытой пористости пород (в пористых базальтах до 46 %). При метасоматизме в присутствии воды происходит ускорение минеральных превращений в  $10^8-10^{10}$  раз, идут одновременно процессы осаждения вещества – появление новых минералов и растворения-выщелачивания, поэтому плотность пород почти не меняется. Сохраняющаяся сплошность (пористость увеличивается всего на 0,7-1,6 %) обуславливает сохранение скоростей упругих волн и незначительные вариации динамического модуля упругости. В базальтах появление новообразованных минералов способствует упрочнению пород. Особенностью нейтральных и слабокислых кислотно-щелочных условий является наличие псевдоморфоз пирита по диатомовым водорослям (рис. 2, б). Ранее исследователями гидротермальной минерализации при изучении базальтов в Исландии также были обнаружены фоссилизированные фрагменты микробиоты.

Изменение образцов андезитов и базальтов, помещенных в массив гидротермальных глинистых грунтов, больше соответствует условиям диффузионного метасоматизма в застойных поровых растворах. В массиве

образцы, в первую очередь стенки крупных пор, покрываются слоем глинистых минералов, обогащенным сульфидами железа. Изменение свойств пород за год проявляется в снижении плотности (выщелачивание и растворение минералов идет быстрее, чем образование новых), сохранении акустических свойств, снижении магнитной восприимчивости за счет разрушения ферромагнитных минералов.

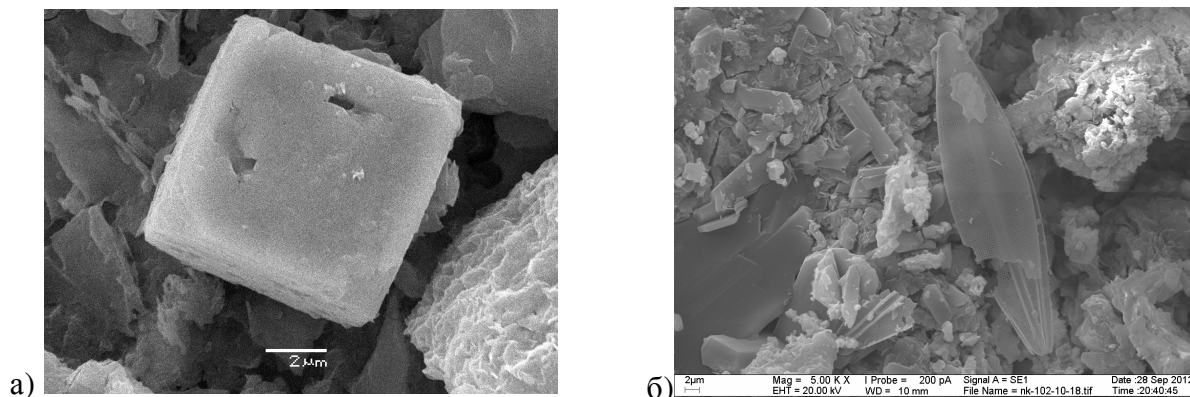


Рис. 2. РЭМ-изображения: а) новообразованный пирит (фото В.О. Япаскурта), б) псевдоморфозы пирита по скелету *Navicula* (фото М.С. Чернова)

Самые существенные изменения свойств на Верхне-Кошелевском поле за два года произошли в андезитах, находившихся в ручье, где низкие значения рН (3,1) и постоянный приток раствора способствовали сернокислотному выщелачиванию, что отразилось в уменьшении плотности с 2,45 до 2,38 г/см<sup>3</sup> (на 2,9 %) и увеличении открытой пористости с 5,5 до 6,1 % (на 10,9 %). Нарушение сплошности пород вызвало снижение скоростей продольных волн с 4,60 до 4,10 км/с (на 10,9 %). В андезитах, помещенных в массив глинистых грунтов, произошло: уменьшение плотности на 0,03-0,07 г/см<sup>3</sup> (1,2-2,8 %) (максимальное в самых высокотемпературных условиях); снижение прочности на одноосное сжатие в два раза; снижение магнитной восприимчивости, что связано с разрушением кристаллов титаномагнетита, от которых остаются ильменитовые ламели (рис. 3); уменьшение содержания железа и титана (рис.4).

При исследованиях на Паужетском месторождении использовано 103 образца. За 30 суток произошло отложение аморфного кремнезема, за счет чего снизились плотность твердого компонента туфов с 2,73 г/см<sup>3</sup> до 2,58 г/см<sup>3</sup> и их пористость с 43 до 40 %. Увеличилась гигроскопическая влажность до 2,2 % –



значений характерных для зоны аргиллизации. Прочностные и деформационные свойства не изменились. За год в слабощелочных водах происходит наращивание гейзерита. В спокойных условиях (31-39 °С) образовалась максимальная корочка, состоящая из сферических частиц кремнезема, образующих трубочки, от плотности упаковки которых зависит строение корочки (100% аморфное вещество по данным рентгеноструктурного анализа), поэтому в высокотемпературных условиях (68-77 °С) образовалась корочка более плотная и из-за этого меньшей толщины.

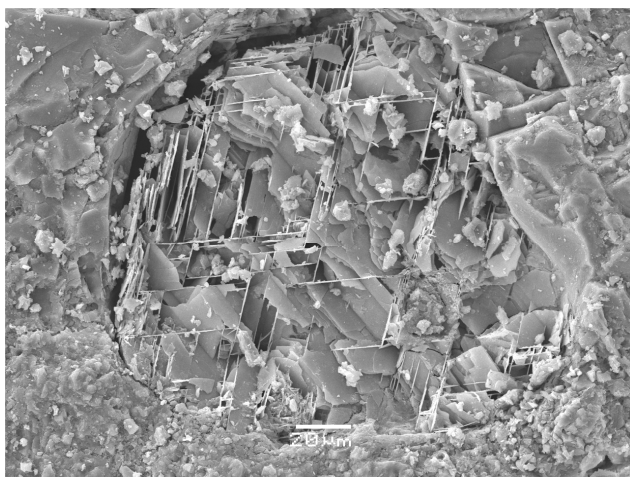


Рис. 3. Разрушенный титаномагнетит в измененном андезите ВК-1/2-12 (фото В.О. Япаскурта)

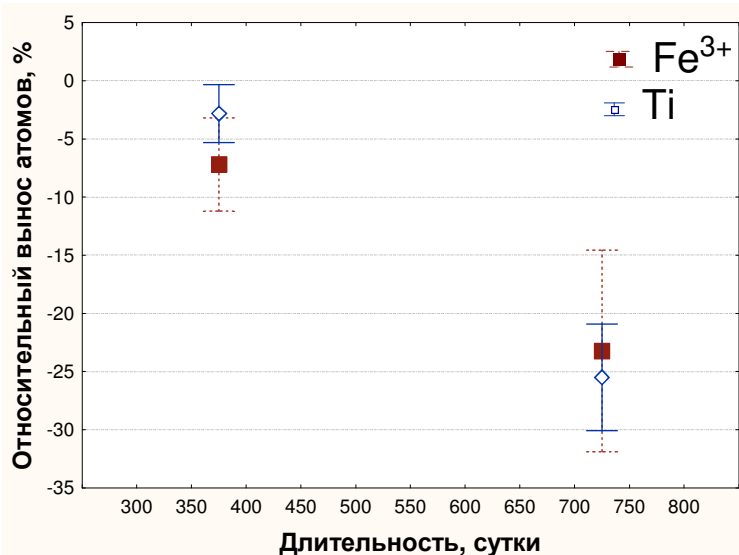


Рис. 4. Уменьшение содержания атомов железа и титана в стандартном объеме измененных пород в зависимости от длительности натуральных исследований

За год в туфах снизились плотность твердого компонента до  $2,61 \text{ г/см}^3$  (на 4,4 %) и пористость до 40 %; увеличилась гигроскопическая влажность до 2,5 %, при этом прочностные (прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии 1-2 МПа, коэффициент размягчения 0,1), деформационные и магнитные свойства не изменились. Уменьшение плотности связано с преобразованием стекла в опал-монтмориллонитовый агрегат, появлением кристобалита и тонкодисперсных новообразованных глинистых минералов. Основанные на результатах рентгеноструктурного анализа расчеты плотности твердого компонента туфов подтверждают ее уменьшение. В большинстве случаев расчетные значения совпали с определенными в лаборатории (расхождение  $\leq 0,03 \text{ г/см}^3$ ). За два года за счет новообразованных минералов плотность туфов незначительно увеличивается на  $0,05 \text{ г/см}^3$ , а

пористость снижается до 40 %. Прочность измененных туфов в водонасыщенном состоянии 0,6-5 МПа, коэффициент размягчения 0,1-0,4 (самые водостойкие – мелкопсефитовые туфы). Низкая плотность твердого компонента связана с дальнейшим преобразованием вулканического стекла в опал-монтмориллонитовый цемент и выносом тяжелых элементов. Для наиболее длительных исследований (три года) использовались самые устойчивые туфы – мелкопсефитовые, их прочность в водонасыщенном состоянии снизилась до 0,4 МПа, коэффициент размягчения уменьшился до 0,1, в полтора раза снизилась прочность пород на одноосное сжатие. Плотность и скорости распространения упругих волн не изменились.

Изменение туфов в массиве глинистых грунтов за год - уменьшение плотности на величину от 0,03 г/см<sup>3</sup> (в самых плотных мелкопсефитовых) до 0,09 г/см<sup>3</sup> (в самых пористых псаммитовых) (2-6 %); плотности твердого компонента на 0,20-0,24 г/см<sup>3</sup> (7-9 %), скоростей распространения упругих волн и прочности пород на одноосное сжатие (у псаммитовых туфов на 80 % (с 5 до 1 МПа)). Выщелачивание и растворение идет быстрее в туфах с максимальной открытой пористостью - поверхностью взаимодействия.

*Результаты лабораторных экспериментов.* С андезитами и базальтами Кошелевского вулкана (199 образцов) проведено 10 опытов от 15 до 370 суток при температуре 100 - 450 °С. При температуре 300 °С образовались новые минералы: в щелочном растворе – хлорит, в кислом – иллит (8-20 %) и монтмориллонит (2-35 %), что отразилось в уменьшении открытой пористости пород и пористости, рассчитанной по 3D изображениям. В пористых базальтах снизилось число соединений пор и каналов и объем пор, что повлекло снижение абсолютной проницаемости пород. Наибольшее влияние на изменение пород оказали их первичные особенности. Андезиты подверглись наименьшим преобразованиям, чему способствовала низкая открытая пористость (до 5 %). Максимальные изменения наблюдаются в базальтах, что связано с увеличением открытой пористости на 60-80 % (табл. 4). Произошедшие преобразования порового пространства сказались

на ухудшении прочностных и деформационных свойств. Увеличение открытой пористости и уменьшение прочности связано с увеличением трещиноватости из-за расклинивающего давления раствора и эффекта Ребиндера, которому подвержены, прежде всего, ультратонкие микротрещины. Увеличение магнитной восприимчивости вызвано замещением темноцветных минералов гидрослюдистыми с образованием тонкодисперсного магнетита.

Таблица 4. Изменение физических и физико-механических свойств исследованных андезитов и базальтов в результате гидротермального воздействия

Проба (количество образцов)		Изменение открытой пористости		Изменение скоростей продольных волн		Изменение магнитной восприимчивости		Изменение динамического модуля упругости		Изменение прочности пород на одноосное сжатие	
		%	%	км/с	%	10 <sup>-3</sup> СИ	%	ГПа	%	МПа	%
НК-1/09-1с (4)	анде- зиты	-0,5	-9	-0,45	-11	+6,7	+25	-8,9	-21	-23	-15
НК-1/09-1(3)		-0,4	-7	-0,40	-10	+5,8	+20	-6,5	-18	-12	-7
НК-100-1 (4)	базальты	8,6	81	-0,60	-14	+16,9	+42	-11,1	-32	-18	-33
НК-100-3 (4)		8,5	62	-1,15	-28	+29,1	+58	-12,9	-41	-11	-28
НК-102 (5)		4,4	9	-0,20	-8	+0,9	+8	-1,6	-24	-1	-14
НК-110 (2)		5,1	19	0,05	1	+27,4	+54	-1,3	-12	-6	-46

Примечание: «-» – уменьшение, «+» – увеличение

С туфами проведено 18 опытов длительностью от 15 до 60 суток. Проведенные термодинамические расчеты в программе «NCh» показали, что в растворе «кислый-2» образуются: кварц, гематит, кальцит, рибекит, К-монтмориллонит, каолинит, хлорит, дафнит; в растворе «кислый-3»: кварц, гематит, алуит, ангидрит, К-монтмориллонит, каолинит, хлорит. Изменение свойств туфов под влиянием температуры (200 и 300 °С), давления (16 и 86 бар) и растворов («кислый-2 и -3», «щелочной») проявляется в: 1) снижении плотности, особенно резко снижается плотность твердого компонента за счет появления новообразованных более легких минералов (сметиты и смешанослойные ряда хлорит-сметит или иллит-сметит (от 20 до 50 %)); 2) уменьшении общей пористости (в мелкопсефитовых туфах на 8-10 % за 45 дней, это подтверждает гипотезу А. В. Кирюхина (2006, с. 40) о том, что «образование вторичных гидротермальных минералов может привести

к существенному снижению пористости в течение первых сотен лет и полному «запечатыванию» трещин»); 3) увеличении открытой пористости; 4) снижении скоростей продольных волн, что в первую очередь связано с трещиноватостью и неводостойкостью данных туфов; 5) изменении магнитной восприимчивости (после раствора «кислый-3» она понижается, что связано с выщелачиванием магнитных минералов, а в остальных случаях увеличивается более существенно за счет образования тонкодисперсного магнетита).

В опытах с базальтами вулкана Крафла при температуре 300 °С в растворе «кислый-1» по расчетам образуются: дафнит, хлорит, пирофиллит, К-монтмориллонит, маргарит, парагонит, рибекит, кальцит, диаспор, гематит и кварц. Наибольшее изменение свойств проявляется в магнитной восприимчивости пород, которая увеличивается при воздействии щелочного раствора из-за преобразования пироксенов в серпентин с выпадением тонкодисперсного магнетита, и снижается в кислом растворе, так как в нем образуется немагнитный хлорит.

*Сравнение изменений состава, строения и свойств исследованных вулканогенных пород, происходящих под воздействием растворов, температуры и давления в экспериментальных и природных условиях.* Натурные исследования и лабораторные эксперименты указывают на значительные изменения пород в течение короткого времени (например, изменение их прочности за год (рис. 5)). Ранее полученные исследователями данные о влиянии гидротермального воздействия на породы подтвердились экспериментально: с увеличением температуры или агрессивности растворов изменение пород происходит быстрее. На рисунке 6 исключение из правила – точка с температурой ниже 42 °С (категория 3 (горячие воды)), в ней плотность твердого компонента туфов снижается с 2,74 до 2,57 г/см<sup>3</sup> за счет активного отложения аморфного кремнезема в данных условиях.

Соответствие изменений состава пород в экспериментальных и натуральных условиях подтверждается следующими фактами: 1) образовавшийся в растворе «кислый-1» при 300 °С в порах базальтов вулкана Крафла хлорит - минерал-

индикатор высокотемпературной (300 °С) зоны гидротермального изменения в базальтах Исландии (Гептнер, 2009); 2) образовавшиеся при воздействии растворов (300°С) в андезитах и базальтах Кошелевского вулкана хлорит и кварц соответствуют изменениям пород на Кошелевском месторождении (Поздеев, Нажалова, 2008). Увеличение плотности твердого компонента, связанное с образованием пирита и марказита, подобно изменению пород на fumarольных полях вулкана Толбачик, где идет заполнение пор возгонами и рудными минералами (Гирина, 1998). На изученных объектах преобладают кислые воды, поэтому ведущий процесс – выщелачивание с разрушением первичных магнитных минералов (рис. 3), в результате чего магнитная восприимчивость пород снижается. На подобное уменьшение указывал Л.Я. Ерофеев (2008), ведь в процессе мобилизации, миграции и отложения рудного вещества основной ферромагнетик (титаномагнетит) разрушается, а вместо него образуется практически немагнитный пирит. М.Ю. Жаренова и А.Ю. Сулимова (2006) отмечали, что при аргиллизации туфов Паужетского месторождения происходит уменьшение плотности пород и снижение скоростей продольных волн. Следовательно, аргиллизация туфов в экспериментах и изменение их свойств в целом соответствуют изменениям, происходящим в природных условиях.

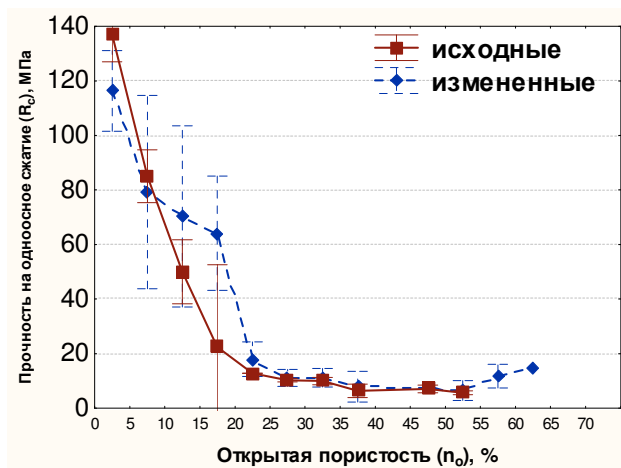


Рис. 5. Соотношение прочности пород на одноосное сжатие и их открытой пористости (натурные исследования)

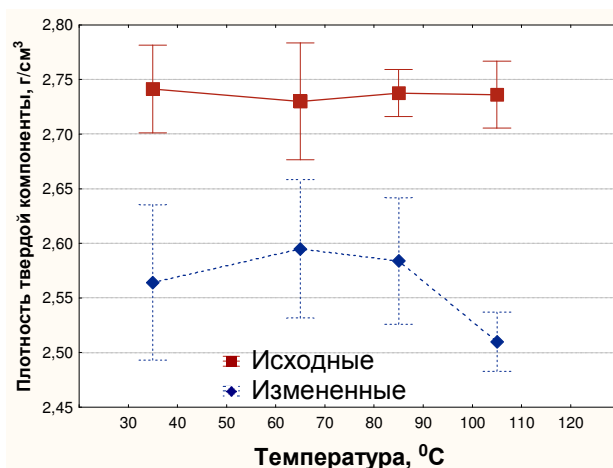


Рис. 6. Изменение плотности твердой компоненты туфов (натурные исследования)

## Выводы

1. При гидротермальном воздействии особенности первичной породы оказывают определяющее влияние на динамику изменений состава, строения и свойств в режиме реального времени. Среди изученных грунтов первыми изменяются туфы и базальты с пористостью 36-65%. Основные тенденции изменения туфов при 200 и 300 °С: а) снижение плотности, особенно резко снижается плотность твердого компонента (с 2,7 до 2,4 г/см<sup>3</sup> за 15 суток при температуре 200 °С и за 30 суток при 300 °С) за счет появления новообразованных минералов (сметиты и смешанослойные ряда хлорит-сметит или иллит-сметит); б) увеличение открытой пористости; в) снижение скоростей упругих волн (с 2,5 до 1,5 км/с за 15 суток при температуре 200 °С и за 30 суток при 300 °С), что в первую очередь связано с увеличением трещиноватости туфов.

2. Преобразование порового пространства андезитов и базальтов Кошелевского вулкана при 300 °С отразилось на изменении открытой пористости и рассчитанной по данным компьютерной томографии проницаемости пород; произошло ухудшение деформационных и прочностных свойств. При кристаллизации пирита и марказита существенно увеличивается плотность твердого компонента грунтов. В базальтах вулкана Крафла произошло изменение порового пространства, в кислой среде стенки пор прорабатываются сильнее; идет появление новых минеральных фаз (сметиты и каолинит; хлорит в кислом растворе, аморфный кремнезем в щелочном). Изменение свойств - увеличение магнитной восприимчивости после щелочной среды (70 % через 15 суток при 300 °С и 140 % при 450 °С за тоже время) и плавное снижение в кислой (на 24 % и 48 %). Преобразования обсидиана после воздействия щелочного раствора при 300 °С – появление корочки гидратированного стекла толщиной 1-2 мм после 15 суток и 2-3 мм при увеличении длительности эксперимента до 30 суток.

3. В термальных источниках процесс осаждения новых минералов приводит к сохранению плотности пород, благодаря чему скорости распространения упругих волн не меняются. В породах, помещенных в массив

гидротермальных глинистых грунтов, процессы выщелачивания минералов преобладают над образованием новых, в результате чего плотность пород снижается. С разрушением рудных минералов связано уменьшение содержания Fe и Ti. Увеличение температуры глинистых грунтов выше 42 °С способствует ускорению преобразования пород.

4. Проведенные исследования показали качественное соответствие изменений грунтов в природе и при автоклавном моделировании условий гидротермальных систем в лаборатории. Анализ преобразований пород при гидротермальных процессах целесообразно проводить, используя оптимальное сочетание современных методов исследования состава, строения и свойств пород: компьютерная рентгеновская микротомография, растровая электронная микроскопия, определение плотности твердого компонента и др.

#### **Список публикаций автора по теме диссертационной работы**

##### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК*

1. **Шанина В.В.**, Бычков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований изменений в составе, строении и свойствах вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород при гидротермальных процессах // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 34-46.

2. **Шанина В.В.**, Герке К.М., Бычков А.Ю., Корост Д.В. Преобразование состава, строения и свойств вулканитов Кошелевского вулкана под воздействием температуры и давления (по данным лабораторных экспериментов) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 5. С. 459-470.

##### *Статьи и тезисы докладов в сборниках трудов конференций*

1. **Шанина В.В.** Возможные изменения условий гидротермальных систем при закачке отработанных термальных вод / VIII международная научная конференция «Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей», посвященной 275-летию Второй Камчатской экспедиции. Петропавловск-Камчатский, 2007. С. 235-237.

2. **Шанина В.В.** Влияние температуры, давления и растворов на изменения вулканогенных пород / XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов". Москва, 2008. [http://lomonosov-msu.ru/2008/06\\_6.pdf](http://lomonosov-msu.ru/2008/06_6.pdf)

3. **Шанина В.В.** Влияние закачки отработанных термальных вод на свойства грунтов, слагающих геотермальный резервуар / Шестая Всероссийская научная молодежная школа «Возобновляемые источники энергии». Москва, 2008. С. 146-151.

4. **Шанина В.В.**, Бычков А.Ю. Влияние гидротермальных процессов на изменение вулканогенных пород (по данным физического моделирования) // Сергеевские чтения. Выпуск 11. Москва: ГЕОС, 2009. С. 241-245.

5. **Шанина В.В.**, Нуждаев А.А. Натурные эксперименты на термальных полях Кошелевского вулкана и Паужетском геотермальном месторождении / VII конференция "Инженерные изыскания в строительстве". М.: ПНИИИС, 2011. С. 36-40

6. **Шанина В.В.**, Нуждаев А.А. Изменение состава, строения и свойств андезитов Кошелевского вулкана и туфов Паужетского геотермального месторождения в приповерхностной зоне современных гидротермальных систем / 7-ое международное совещание по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО, 2011. С. 290-293.

7. **Шанина В.В.**, Нуждаев А.А. Первые результаты натуральных экспериментов на Нижне-Кошелевском и Паужетском геотермальных месторождениях / Материалы V Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика». Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО, 2011. С. 589–591.

8. **Шанина В.В.**, Герке К.М., Бычков А.Ю., Корост Д.В. Изменение вулканогенных пород Кошелевского вулкана (Ю. Камчатка) под воздействием гидротермальных процессов (по экспериментальным данным) / Тезисы докладов Первой Всероссийской научной конференции «Практическая микротомография». Казань, 2012. С. 133-142.

9. **Шанина В.В.**, Нуждаев А.А. Изменение состава, строения и свойств туфов Паужетского геотермального месторождения под влиянием температуры и разных по составу растворов (по данным натуральных экспериментов) / XIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов". Москва, 2012. [http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov\\_2012/1725/24441\\_a67a.pdf](http://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2012/1725/24441_a67a.pdf)

10. **Шанина В.В.**, Герке К.М., Бычков А.Ю., Корост Д.В., Фуникова В.В. Комплексная методика изучения изменений состава, строения и свойств пород под воздействием гидротермальных процессов в режиме реального времени / IX конференция "Инженерные изыскания в строительстве". Москва: ПНИИС, 2013.

11. **Шанина В.В.**, Герке К.М., Бычков А.Ю., Корост Д.В., Фуникова В.В. Применение компьютерной микротомографии для изучения изменений вулканогенных пород под воздействием гидротермальных процессов (на примере андезитов и базальтов Кошелевского вулкана (Камчатка)) / Материалы конференции «Практическая микротомография». Москва: Почвенный институт, 2013. С. 149-155.

12. Frolova J.V., Ladygin V.M., Rychagov S.N., **Shanina V.V.**, Blyumkina M.E. The main factors controlling petrophysical alteration in hydrothermal systems of the Kuril-Kamchatka island arch) / European Geosciences Union General Assembly, 19–24 April 2009, Vienna. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-10353-1.pdf>

13. **Shanina V.V.**, Bychkov. Influence of hydrothermal processes on changes of volcanic rocks (data of physical modelling) / European Geosciences Union General Assembly, 19–24 April 2009, Vienna. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-3622.pdf>

14. **Shanina V.V.**, Bychkov A.Y. Changes in the composition and properties of volcanic and volcanic-clastic rocks under the influence of hydrothermal processes (based on laboratory experiments) / First European Geothermal PhD Day. Potsdam, 2010. Pp. 44.

15. **Shanina V.V.**, Bychkov A.Y. Influence of hydrothermal transformations on changes of volcanic rocks (data of physical modeling) / World Geothermal Congress 2010, 25-29 April 2010, Bali, Indonesia. 1217.

16. **Shanina V.V.**, Gerke K.M., Korost D.V., Bychkov A.Yu. Hydrothermal altering of rock physical properties: laboratory, numerical and X-ray microtomography study / Third European Geothermal PhD Day 2012. Pisa, 2012.

17. **Shanina V.V.**, Gerke K.M., Bychkov A.Yu., Korost D.V. Geothermal alteration of Kamchatka rock physical properties: experimental and pore-scale modeling study / European Geosciences Union General Assembly 2013, 7–12 April 2013, Vienna, Austria. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-7453.pdf>.