

УДК 549.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМЫХ КАНАЛОВ ГЕЙЗЕРОВ В РАЙОНАХ КИСЛОГО ВУЛКАНИЗМА

© 2020 г. А. В. Кирюхин^{a, b, *}, Т. В. Рычкова^a, А. В. Сергеева^a

^aИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^bФГБУ “Кроноцкий государственный биосферный заповедник”, ул. Рябикова, 48, Елизово, 684000 Россия

*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

Поступила в редакцию 10.07.2019 г.

После доработки 15.10.2019 г.

Принята к публикации 26.12.2019 г.

Существующие гейзеры и палео-гейзеры на Камчатке распространены в вулканогенно-артезианских бассейнах, сложенных продуктами современного кислого вулканизма, что соответствует общемировым закономерностям распространения гейзерных полей. Результаты TOUGHREACT-моделирования проточной восходящей фильтрации термальных вод, с химическим составом, соответствующим составу воды гейзеров Долины Гейзеров, и происходящей во вмещающих горных породах риолитового состава, показывают формирование каналов с высокой вертикальной проточной способностью и боковой самоизоляции. Это происходит из-за высокой скорости растворения вулканического стекла в осевом восходящем потоке и осаждения кремнезема в боковой оболочке. Исследования минерального состава поверхности конусов/грифонов гейзеров Великан, Большой и Первенец показывают, что преобладающей минеральной фазой в них являются цеолиты (гейландит, клиноптилолит и морденит), при подчиненном содержании аморфного кремнезема (опала).

Ключевые слова: гейзеры, цеолиты, минералообразование, TOUGHREACT-моделирование.

DOI: 10.31857/S0203030620020030

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе под природными гейзерами понимаются циклически извергающиеся кипящие термоминеральные источники. Природные гейзеры встречаются редко, их насчитывается во всем мире не более 1000. Они сосредоточены в шести геотермальных районах планеты: в Йеллоустонском национальном парке (США), в северной части Чили (Анды), в вулканической зоне Таупо (Новая Зеландия), в Кроноцком заповеднике (Россия), в Исландии и Кении [Hurwitz, Manga, 2017]. Немногочисленные гейзеры известны также в Перу, Гондурасе, Гватемале, Коста-Рике, Мексике, в некоторых горных и прибрежных районах запада США, на Алеутских островах рядом с Аляской, в Атлантике — на Азорских островах, в Азии — в Тибете, в Китае, Японии, в Новой Гвинее и на ряде мелких островов в Индонезии. Отмечается, что гейзерные поля формируются в областях современного или активного вулканизма в толщах, сложенных водно-ледниковыми отложениями и продуктами кислого вулканизма.

В недавнем прошлом гейзеры на Камчатке были представлены более широко (рис. 1). Первые из них (гейзеры в долине р. Паужетки) описаны более 280 лет назад [Крашенинников, 2018]. Гейзер 1 и Гейзер 2 [Аверьев, Сугрובה, 1965] располагались на площадке разгрузки Паужетских источников. Канал Гейзера 1 (другое название Пятиминутка) представлял собой воронку с диаметром около 1 м и глубиной 0.5 м. Полный период извержений Гейзера 1 составлял 4 мин 50 с, высота фонтана около 50–90 см. Температура воды в период покоя составляла 99°C, температура пароводяной смеси в период фонтанирования — 102°C. Гейзер 2 грифона не имел, вода вытекала из углубления в аллювии. По характеру действия он резко отличался от Гейзера 1, период его действия — 30 ч; время фонтанирования — 45–60 мин; ширина кипящего столба — 0.4–0.5 м; высота выбросов воды — 20–30 см, отдельных брызг — 60–80 см. Кроме гейзеров на площадке Паужетских источников существовали непрерывно бурлящие грифоны, обрамленные гейзеритовыми отложениями, выбрасывающие струи кипятка и пара на высоту до 1 м [Устинова, 1955]. Паужетские гейзеры

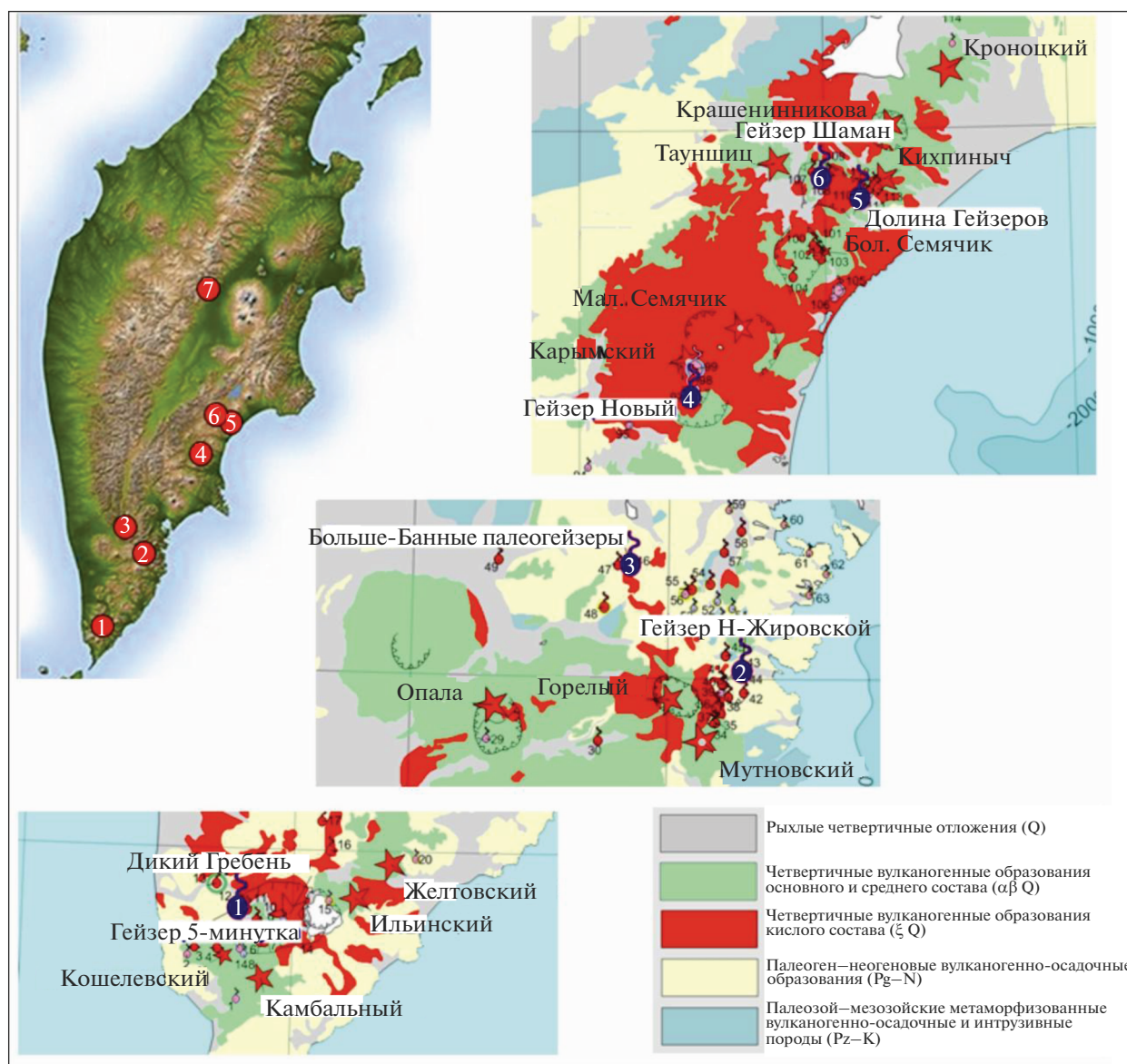


Рис. 1. Проявления гейзерной активности в гидротермальных системах Камчатки.

1 – гейзеры на Паужетском геотермальном месторождении (угасли в 1986 г.); 2 – гейзер Нижне-Жировской (2005–2006 гг.); 3 – Больше-Баннные палеогейзеры; 4 – гейзеры на южном берегу Карымского озера; 5 – гейзеры Долины Гейзеров; 6 – гейзер в кальдере Узон; 7 – палеогейзеры Киреунских источников.

исчезли в 1986 г. после того, как пьезометрический уровень на участке гейзерной разгрузки понизился ниже земной поверхности при достижении расхода отбора теплоносителя на Паужетском месторождении 260–280 кг/с.

Очевидцев гейзерного типа разгрузки в Ходуткинской гидротермальной системе нет. Однако в работах Б.И. Пийпа [1937] отмечено наличие мощного грифона с температурой воды 100–101°C. По его описанию, расход воды, изливающейся из грифона, достигал 250 л/с. Учитывая выбросы пароводяной смеси вверх на высоту до

0.5 м, Б.И. Пийп предполагал возможное существование гейзеров в прошлом.

Работа С.П. Крашенинникова “Описание земли Камчатки” [2018] содержит указание на существование гейзеров на Больше-Баннных ключах более 280 лет назад. Спустя 200 лет, Б.И. Пийп [1937], посетивший Больше-Баннные источники, не обнаружил действующих гейзеров, но описал многочисленные глубокие неправильной формы бассейны горячей воды (размерами до нескольких метров). По его мнению, неправильные стенки каналов, их глубина (иногда более 5 м) и изви-

лиственность, ничтожный сток из бассейна или его отсутствие, наличие плиток гейзерита возле бассейнов, температура воды от 71 до 93°C свидетельствовали о том, что эти бассейны являются результатом гейзерной деятельности. В частности, размеры описанного им бассейна Голубой грифон позволяют предположить, что в прошлом это был крупный гейзер. Сравнивая фактические наблюдения с описанием С. Крашенинникова и рассказами старосты села Начики, Б.И. Пийп пришел к выводу, что активность ключей за эти 200 лет значительно уменьшилась.

Заметное ослабление гейзерной активности (по сравнению с описанием С.П. Крашенинникова) на Больше-Банных ключах отмечает Т.И. Устинова в 1955 г. [Устинова, 1955]. На момент ее посещения Больше-Банных ключей, активным был только один крошечный гейзер, описанный в 1950 г. В.В. Ивановым под именем Карликового гейзера, расположенного в 2 м над рекой в обрыве первой надпойменной террасы. Вокруг его грифона образовались щетки и натеки гейзерита, температура воды во время покоя составляла 97°C, во время фонтанирования — 99°C. В 1964 г. В.И. Кононовым и Б.Г. Поляком было отмечено, что источник перестал работать в гейзерном режиме. В 2004 г. Карликовый гейзер представлял собой малобитный источник [Соболевская, 2004].

На юго-восточном участке группы источников Академии Наук (Карымская гидротермальная система) до фреато-магматического извержения 1996 г. в Карымском озере существовало два гейзера: гейзер Сердитый (в бортах восточной ванны) и гейзер Карлик (в бортах западной ванны). После извержения 1996 г. грифоны этих гейзеров оказались под водой ванны, гейзер Сердитый превратился в пульсирующий источник и теперь называется Пульсир Восточный; гейзер Карлик теперь называется Старый и действует в сложном гейзерном режиме без видимого опустошения канала. В южном обрамлении его грифона наблюдаются отложения гейзерита. Вода в них по химическому составу относится к разбавленным гейзерным термам хлоридно-натриевого состава [Карпов, Двига́ло, 2010]. Как доказательство возможности формирования гейзерного типа разгрузки в прошлом, следует отметить выход на этом участке крупной древней постройки гейзерита на склоне террасы ручья Розового. Это обнажение появилось в результате резких колебаний уровня озера во время извержения 1996 г. и приливных волн по всему южному берегу на высоту более 5 м — был смыт чехол покровных отложений и выработан новый абразионный уступ. В

уступе обнажился уникальный четырехметровый разрез гейзеритового купола с гейзерными камерами и каналами. Обнажение гейзерита имело видимую мощность 5.6 м. В постройке сохранилось пещерообразное отверстие, из которого постоянно выходил пар с температурой 97°C [Карпов, Двига́ло, 2010].

После извержения 1996 г. на юго-западном участке появился новый гейзер. Е.А. Вакин и Г.Ф. Пилипенко [1998] его называли Академическим, С.А. Федотов с соавторами [Федотов и др., 1998] назвали его Новым. Его грифон врезан в крутой глинистый склон (гидротермально-измененный делювий) и имеет диаметр около 3.4 м. Ложе грифона выложено крупными полуокатанными валунами. Основное поступление воды происходит из небольшого центрального канала глубиной 95 см, расположенного между крупными камнями. По данным 2010 г. [Карпов, Двига́ло, 2010], гейзер имел сложный, еще не установившийся режим, с циклами от 8.5 до 13.5 мин. Продолжительность извержений составляла в среднем 3.5 мин. Вода выбрасывалась на высоту до 3 м. За одно извержение выбрасывалось 5–7 т воды. Средний расход воды гейзера — 20–22 л/с. По химическому составу вода относится к типичным хлоридно-натриевым гейзерным термам [Карпов, Двига́ло, 2010].

Камчатская Долина Гейзеров была открыта Т.И. Устиновой 14 апреля 1941 г. [Устинова, 1955]. Долина Гейзеров расположена в 180 км северо-восточнее г. Петропавловск-Камчатский в пределах Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Основная часть гейзеров Долины расположена в нижнем течении (на протяжении 4 км от устья) р. Гейзерная — в каньоне шириной до 4 км и глубиной до 400 м. Разгрузка хлоридно-натриевых вод достигает здесь рекордных для гидротермальных систем Камчатки значений 250–350 кг/с [Kiryukhin et al., 2012, 2018]. До катастрофического оползня 03.06.2007 г. в пределах долины р. Гейзерная функционировало 26 значительных гейзеров [Kiryukhin, 2016], половина из которых была погребена под обвальными отложениями или затоплена образовавшимся Подпрудным озером-1.

Осенью 2008 г. в кальдере Узон в районе источника Пульсирующий появился новый гейзер Шаман [Карпов и др., 2012]. Вода гейзера хлоридно-натриевая, с небольшой долей сульфатов, с минерализацией в 1.5 раза выше, чем в Долине Гейзеров.

Исторические сведения о гейзерах в Киреунской гидротермальной системе отсутствуют. Первое описание горячих источников выполнено в

1934 г. экспедицией Камчатского областного отдела здравоохранения. Т.И. Устинова [1955], исследовавшая Киреунские горячие источники, отмечает очевидные признаки бывшего наличия гейзерной активности, а именно наличие круглых воронок, окруженных гейзеритовыми отложениями, диаметром и глубиной порядка нескольких метров, лишенных стока или с малодобитными стоками, не соответствующими их размерам. Т.П. Кирсанова [1971] указывает на многочисленные гейзеритовые натечные террасы на термальной площадке Средней группы Киреунских источников, а описывая термальную площадку Верхней группы, отмечает наличие щеток-налетов гейзерита на камнях у кипящих грифонов и выделяет отдельный участок затопленных котлов-гейзеров.

Отметим в дополнение к вышесказанному, что в 2005–2006 гг. один из источников в группе Нижне-Жировских источников функционировал в гейзерном режиме с фонтанированием на высоту 0.5–1.0 м и интервалом между извержениями от 22 до 130 мин¹.

Таким образом, существующие гейзеры и палео-гейзеры на Камчатке распространены в артезианско-вулканогенных бассейнах, сложенных продуктами современного кислого вулканизма и водно-ледниковыми отложениями (см. рис. 1), что соответствует общемировым закономерностям распространения гейзерных полей. Логично поэтому поставить вопрос о том, какой механизм приводит к формированию высокой проницаемости и каналов разгрузки со значительным поперечником (первые метры) и глубиной (первые десятки метров) в гейзерных резервуарах.

Для выяснения механизма формирования проницаемых каналов в артезианско-вулканогенных бассейнах, сложенных пирокластическими породами риолитового состава, используется термодинамическое-химическое TOUGHREACT-моделирование, учитывающее взаимодействие воды с горными породами (генерацию минералов и их растворение) [Xu et al., 2006]. Программа TOUGHREACT применялась в многочисленных приложениях для выяснения условий гидротермального минералообразования, в том числе для воспроизведения условий гидротермального минералообразования в продуктивных зонах андезитовых геотермальных резервуаров Камчатки и Японии [Kiryukhin et al., 2004]; объяснения усло-

вий гидротермальной переработки туфов риолитового состава перед катастрофическим обвалом в Долине Гейзеров 2007 г. [Kiryukhin et al., 2012] и формирования продуктивных нефтяных и геотермальных резервуаров в вулканогенных породах риолитового состава [Кирюхин и др., 2013].

В работе [Фролова и др., 2015] показано, что в пачке Гейзерной (Q_3^4 gpn), вскрытой обвалом 2007 г., распространены как гидротермально измененные, так и неизменные алевропелитовые витрокластические и псаммито-псефитовые пемзовые с включением лито- и кристаллокластов, при этом гидротермальным преобразованиям подвержены в первую очередь вулканическое стекло и пемзокласты, доля которых в исходном минералогическом составе является значительной. Гидрогеологические разрезы продуктивного гейзерного резервуара Долины Гейзеров приведены в работах [Кирюхин и др., 2011, 2013, 2015].

В данном исследовании рассматривается эволюция проницаемости субвертикального канала разгрузки гидротермальной системы (заложенно-го в наиболее проницаемой части разлома или в трубке гидротермального взрыва) под воздействием проточной фильтрации термальной воды с химическим составом, соответствующим гейзерам Долины Гейзеров.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ГЕЙЗЕРИТОВ

2.1. Методика исследований

Материал гейзеритовых плащей был отобран во время полевых работ 2011–2018 гг. При подготовке к инструментальным исследованиям образцы были приведены в воздушно-сухое состояние и растерты в агатовой ступке. При пробоотборе было выполнено измерение pH термальных растворов с помощью портативного pH-метра Hanna Checker. Предварительная калибровка pH-метра была осуществлена по трем точкам, с помощью буферных растворов с pH 4.01, 6.86, 9.18.

Дифрактограммы были получены с помощью рентгеновского дифрактометра XRD 7000 (Shimadzu), в диапазоне 6–60 град 2θ , с шагом 0.05 град 2θ и скоростью сканирования 0.5 град/мин, что эквивалентно выдержке в точке 6 с. Образец вращался со скоростью 30 об/мин, съемка велась в режиме подсчета импульсов. Уточнение кристаллоструктурных параметров минералов было выполнено методом Ритвельда, с помощью алгоритма, встроенного в программу Powder Cell 2.4.

¹ Кирюхин А.В. Отчет о научно-исследовательской работе по договору № 1 от 29 июня 2006 г. О мониторинге геотермальных систем природного парка “Южно-Камчатский”. Петропавловск-Камчатский, 2006. 157 с.

Таблица 1. Минеральный состав гейзеритовых плащей

Название гейзера, место отбора, pH	Минерал, параметры элементарных ячеек, Å		
	Морденит	Гейландит	Кварц
Гейзер Первенец (борт ванны), pH 9.31	$a = 18.01, b = 20.39$ $c = 7.50, V = 2754.18 \text{ Å}^3$	$a = 17.57, b = 17.85$ $c = 7.38, \beta = 115.5$ $V = 2089.08 \text{ Å}^3$ (клиноптилолит-Ca) $a = 17.67, b = 17.82$ $c = 7.44, \beta = 116.3$ $V = 2100.2 \text{ Å}^3$ (гейландит)	—
Гейзер Большой (конус гейзера в 0.5 м ниже основного излива), pH 9.72	$a = 18.09, b = 20.39$ $c = 7.50, V = 2766.41 \text{ Å}^3$	$a = 17.65, b = 17.90$ $c = 7.43, \beta = 116.8$ $V = 2095.25 \text{ Å}^3$ (гейландит)	$a = 4.89, c = 5.39$ $V = 111.62 \text{ Å}^3$
Гейзер Великан (гейзеритовый плащ в 0.5 м ниже основного излива), pH 9.32	$a = 18.21, b = 20.55$ $c = 7.46, V = 2791.65 \text{ Å}^3$	$a = 17.71, b = 17.90,$ $c = 7.49, \beta = 116.8$ $V = 2119.35 \text{ Å}^3$ (гейландит) $a = 17.77, b = 17.98$ $c = 7.46, \beta = 116.6$ $V = 2131.22 \text{ Å}^3$ (гейландит)	$a = 4.91, c = 5.40$ $V = 112.74 \text{ Å}^3$

Спектры поглощения были получены с помощью ИК спектрометра с преобразованием Фурье IR Affinity (Shimadzu). Диапазон съемки $400\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$, разрешение 4 см^{-1} , число сканов 100. Образцы растирали с бромидом калия и прессовали в таблетки. В качестве фона была использована чистая таблетка бромида калия.

Для анализа солевого состава термальных растворов были взяты пробы воды на устье гейзеров при извержении. Содержание макрокомпонентов были определены титриметрически и колориметрически. Все исследования минерального состава, макрокомпонентного состава воды были выполнены на базе Аналитического Центра ИВиС ДВО РАН.

Минеральный состав построек гейзеров Великан, Большой и Первенец

В табл. 1 приведены минералы, составляющие гейзеритовые плащи гейзеров Первенец, Большой, Великан и уточненные параметры их элементарных ячеек. Дифрактограммы показаны на рис. 2, 3, 4, ИК спектры — на рис. 5.

Экспериментальные кривые описываются суммой теоретических дифрактограмм высококремнистых цеолитов, морденита, гейландита, клиноптилолита, а также кварца и опала, слоистые силикаты не зафиксированы. На дифрактограммах опал фиксируется по характерному гало, расположенному в диапазоне $20\text{--}30$ град 2θ . Оно не выражено явно, малоинтенсивное, что свидетельствует о преобладании над опалом хорошо закристаллизованных цеолитов. Согласно уточненным профильным параметрам экспериментальной кривой, кварц не преобладает.

Параметры элементарных ячеек новообразованных цеолитов хорошо укладываются в диапазон, характерный для высококремнистых цеолитов, морденита, гейландита и клиноптилолита.

Данные ИК спектроскопии подтверждают результаты дифрактометрии (см. рис. 5). На спектрах основная полоса поглощения, отвечающая колебанию $\nu_3[\text{SO}_4]$, расположена около 1050 см^{-1} , что характерно для морденита, гейландита и клиноптилолита [Chukanov, 2013], у кварца и опала основная полоса расположена около 1100 см^{-1} . Присутствие кварца и опала прослеживается по по-

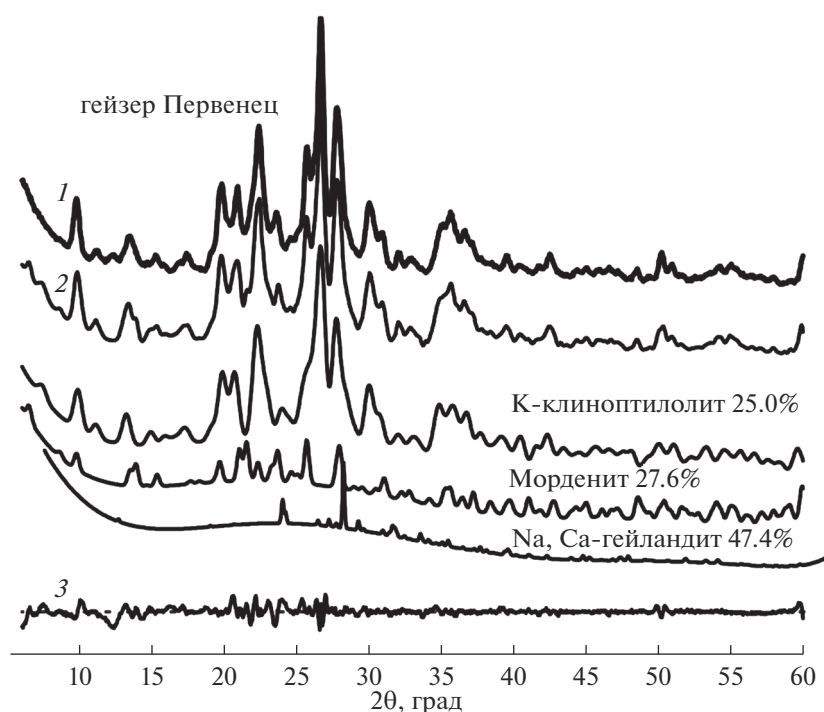


Рис. 2. Дифрактограмма гейзерита устья гейзера Первенец.

1 – экспериментальная кривая; 2 – суммарная теоретическая кривая; 3 – разница экспериментальной и суммарной теоретической кривой.

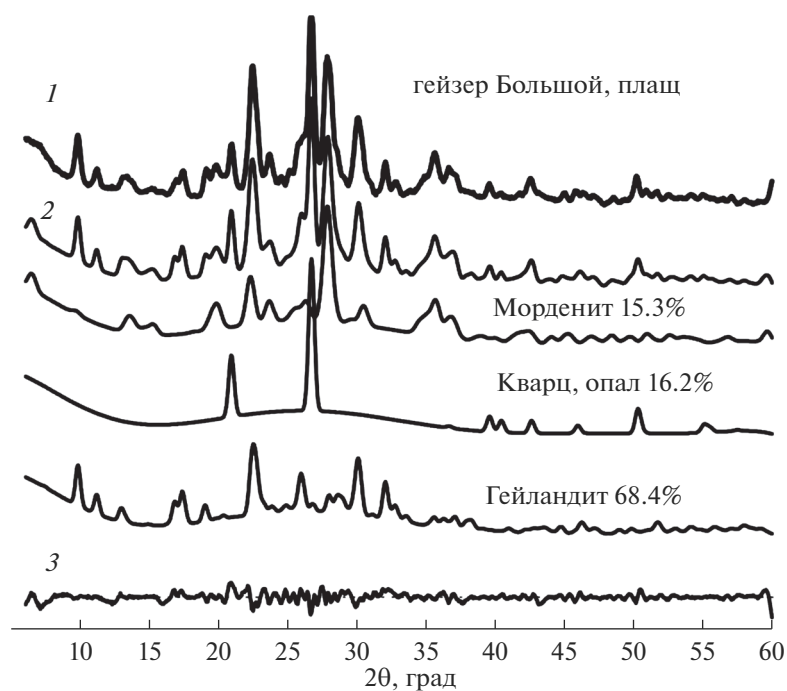


Рис. 3. Дифрактограмма гейзерита устья гейзера Большой.

1 – экспериментальная кривая; 2 – суммарная теоретическая кривая; 3 – разница экспериментальной и суммарной теоретической кривой.

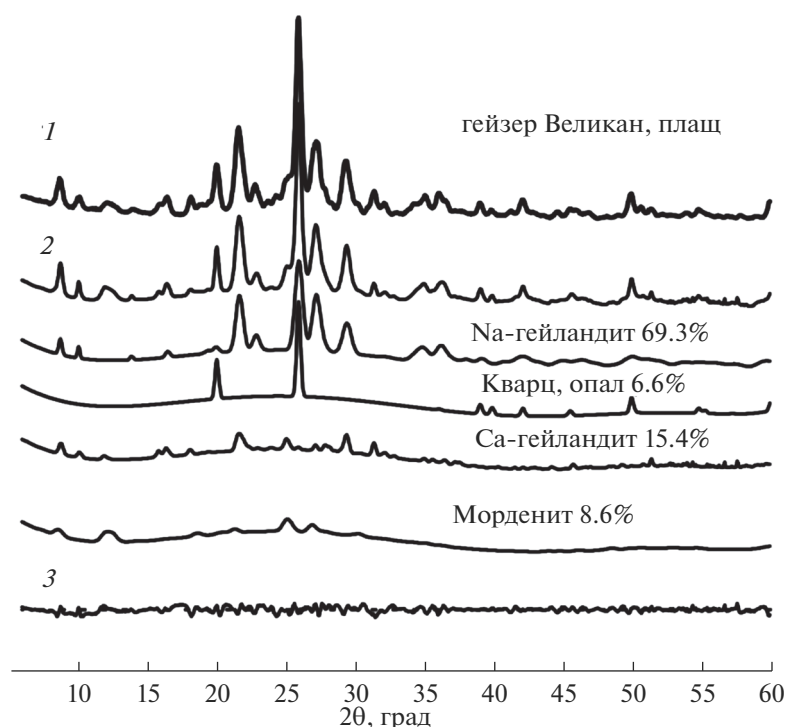


Рис. 4. Дифрактограмма гейзерита устья гейзера Великан.

1 – экспериментальная кривая; 2 – суммарная теоретическая кривая; 3 – разница экспериментальной и суммарной теоретической кривой.

лосам 780 и 795 (см. рис. 5), а около 720 и 910 см^{-1} прослеживаются слабые полосы, которые можно отнести к колебаниям $\nu_1[\text{AlO}_4]$ и $\nu_3[\text{AlO}_4]$ в структуре цеолитов. Исходя из этого, можно заключить, что в минеральном составе доминируют не кварц и опал, а высококремнистые цеолиты.

3. TOUGHREACT-МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСХОДЯЩЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПОРОДАХ РИОЛИТОВОГО СОСТАВА

3.1. Исходные данные и сборка модели

Для исследования формирования и эволюции каналов гейзеров в породах риолитового состава было применено термогидродинамическое-химическое TOUGHREACT-моделирование восходящей фильтрации теплоносителя.

Геометрия канала в модели определена в виде цилиндра (рис. 6), по осевой части которого происходит восходящая фильтрация термальных вод. Радиус осевой части задан 1 м, канал может быть реализован на месте трубок взрыва или наиболее проницаемых частей разлома. Породы, вмещающие канал, образуют промежуточную оболочку радиусом до 2 м. Внешняя часть цилиндра определяется фиксированными граничными условия-

ми с заданным гидростатическим распределением давления и заданным градиентом температуры. Граничные условия для внешней части канала соответствуют условиям вмещающих горизонтов холодных грунтовых вод. Глубина модельного канала определена равной 50 м. В модели использована радиальная вычислительная сетка 3×100 , включающая 300 элементов (ячеек) с размерами $\Delta X = 1$ м и $\Delta Z = 0.5$ м.

Начальные и граничные условия для TOUGHREACT-моделирования определены по результатам предшествующего термогидродинамического TOUGH2-моделирования. В основании канала задан постоянный массовый источник с расходом термальной воды 1 кг/с и энтальпией 589 кДж/кг (что соответствует 140°C) и углекислого газа с расходом 0.0001 кг/с. Разгрузка гейзера на поверхности модели задана как самоизливающаяся скважина. Проницаемость в центральном канале задана равной 1 Д, во внутренней оболочке 0.1 Д и во внешней оболочке 1 мД, начальная пористость задана повсюду равной 0.1. Химический состав воды определен по составу воды гейзера Великан [Kiryukhin et al., 2012] (табл. 2).

В качестве возможных минеральных фаз рассматриваются: вулканическое стекло, кварц, SiO_2 (am), калиевый полевой шпат, олигоклаз, клино-

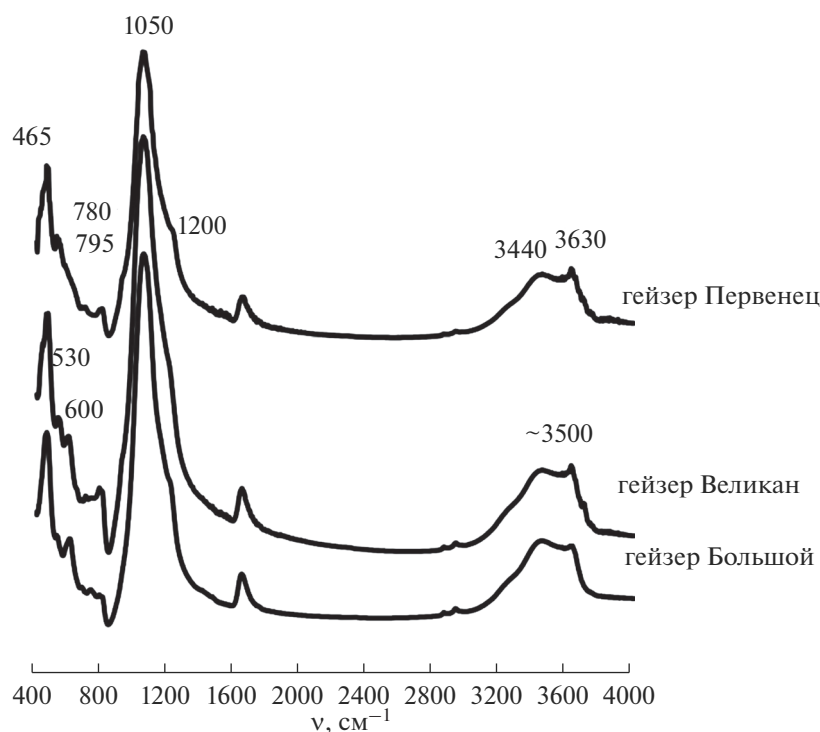


Рис. 5. Инфракрасные спектры гейзеритовых плащей.

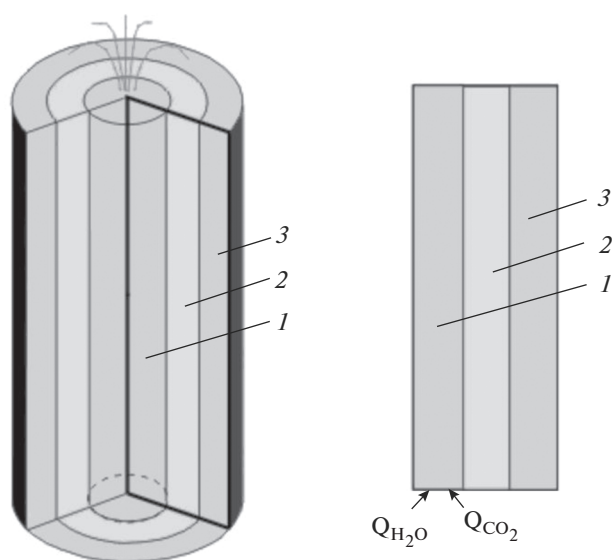


Рис. 6. Геометрия канала для моделирования и анализа эволюции пористости/проницаемости, минерального состава в процессе проточной восходящей фильтрации термальной воды в результате гидротермального преобразования вмещающих горных пород риолитового состава.

1 – центральный канал для восходящего потока термального флюида; 2 – породы, окружающие центральный канал; 3 – породы, вмещающие холодные грунтовые воды.

хлор, гейландит, клиноптилолит, морденит, ломонтит, вайрацит, каолинит, Са-сметтит, К-сметтит, Mg-сметтит, Na-сметтит, иллит (табл. 3). Состав воды предполагается локально равновесным с минералами пород, расходный закон для растворения/осаждения минеральных фаз описывается в соответствии с уравнением (1):

$$r = kS \left(1 - \frac{Q}{K}\right) \exp\left(\frac{E_a}{R \times 298.15} - \frac{E_a}{RT}\right), \quad (1)$$

где r – генерация вторичных минералов, моль/с л, k – константа химического растворения/осаждения при 25°C, моль/с м², S – удельная площадь поверхности химического взаимодействия, м²/л, Q – произведение концентраций; K – константа равновесия для химического взаимодействия вода-порода; E_a – энергия активации кДж/моль К; R – газовая константа кДж/моль К; T – температура, К. Константы равновесий для химического взаимодействия вода–порода рассматриваются как функции температуры.

Константы кинетического взаимодействия воды с минеральными фазами заданы по [Xu et al., 2006] (моделирование гидротермальных изменений в кальдере Лонг Вэллей) и по работе [Kiryukhin et al., 2012] (см. табл. 3). В качестве термодинамической базы данных использована база данных Tianfu Xu, 03/18/2003.

Таблица 2. Химический состав воды, определенный на модели и химический состав воды из гейзеров Великан, Большой и Первенец

	Содержание, принятое в модели		Первенец		Большой		Великан	
	мг/л	моль/кг H ₂ O	мг/л	моль/кг H ₂ O	мг/л	моль/кг H ₂ O	мг/л	моль/кг H ₂ O
pH	8.0		9.14		9.2		8.17	
NH ₄ ⁺	1	7.0×10^{-5}	1.3	7.23×10^{-5}	2.5	1.39×10^{-4}	3.1	1.72×10^{-4}
Na ⁺	605	2.64×10^{-2}	329	2.63×10^{-2}	462	2.01×10^{-2}	527	2.29×10^{-2}
K ⁺	47	1.20×10^{-3}	31	1.21×10^{-3}	41	1.04×10^{-3}	63	1.61×10^{-3}
Ca ²⁺	22	5.50×10^{-4}	13	5.51×10^{-4}	21	5.21×10^{-4}	10	2.60×10^{-4}
Mg ²⁺	0	0	0.10	0	0.10	4.17×10^{-6}	0.10	4.17×10^{-6}
SiO ₂	300	5×10^{-3}	260	4.3×10^{-3}	262	4.4×10^{-3}	367	6.1×10^{-3}
Fe ^{2+/3+}	0	0	0	0	0	0	0	0
AlO ₂ ⁻	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl ⁻	872	2.46×10^{-2}	433	2.43×10^{-2}	656	1.82×10^{-2}	691	1.92×10^{-2}
SO ₄ ²⁻	161	1.68×10^{-3}	106	1.68×10^{-3}	173	1.80×10^{-3}	202	2.10×10^{-3}
HCO ₃ ⁻	68	1.12×10^{-3}	31	1.12×10^{-3}	19	3.10×10^{-4}	28	4.52×10^{-4}

Примечание. Пробы отобраны А.В. Кирюхиным 29–30 сентября 2018 г., проанализированы в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН.

Пористость в модели пересчитывалась на каждом временном шаге с учетом изменения объемных долей минеральных фаз. Проницаемость (k) рассматривалась в качестве функции пористости ($\emptyset$) по уравнению Карман–Козени (2):

$$k = k_i \frac{(1 - \emptyset_i)^2}{(1 - \emptyset)^2} \left(\frac{\emptyset}{\emptyset_i} \right)^3, \quad (2)$$

где i — индекс, относящийся к начальному значению.

Процессы механического выноса (суффозии) при моделировании не учитывались, но по результатам очевидно, что, начиная с некоторого момента химической проработки канала, его пористость увеличивается настолько, что механический перенос отдельных слабосвязанных фрагментов с образованием полого канала становится возможным.

3.2. Результаты TOUGHREACT-моделирования

Моделирование эволюции проницаемости канала выполнялось в нескольких вариантах, отраженных в табл. 3 и примечаниях к ней. Время моделирования определено до 3500 лет. В целом указанные варианты показывают схожие тенденции изменения фильтрационно-емкостных свойств в результате гидротермальных преобразований при восходящей фильтрации термальных вод в горных породах риолитового состава.

На рис. 7 показаны результаты TOUGHREACT-моделирования эволюции проницаемости канала разгрузки при восходящей фильтрации теплоносителя в породах риолитового состава спустя 1000 лет после начала фильтрации (вариант 1k4). В результате гидротермальных преобразований при проточной восходящей фильтрации термального флюида происходит растворение вулканического стекла и образование вторичных минералов — вы-

Таблица 3. Минеральные фазы, рассматриваемые при TOUGHREACT-моделировании, константы кинетического взаимодействия (k_{25}) и энергия активации (E_a) при растворении исходных и генерации вторичных гидротермальных минералов

Минеральные фазы	Химическая формула	Исходная доля, %	k_{25} , моль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ осаждение	k_{25} , моль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ растворение	E_a , кДж/моль
Вулканическое стекло glass3	$\text{Na}_{0.73}\text{Ca}_{0.012}\text{K}_{0.0040}\text{Mg}_{0.0011}\text{Si}_{2.24}\text{Al}_{0.76}\text{O}_6$	50–100	0.0	9.66E-12	45.08
Кварц	SiO_2	0	0.0	4.3E-14	75.0
SiO_2 (am)	SiO_2	0	1.0E-10	7.32E-13	62.9
К полевой шпат	KAlSi_3O_8	0	1.0E-17	1.0E-17	67.83
Олигоклаз	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{—CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	0–50	0.0	1.445E-13	69.8
Клинохлор-14a	$(\text{Mg}, \text{Al})_6[\text{Si}_{3.1\text{—}2}\text{Al}_{0.9\text{—}1.2}\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	0	1.0E-16	1.0E-21	58.62
Гейландит	$(\text{Ca}, \text{Na}, \text{K})_5[\text{Si}_{27}\text{Al}_9\text{O}_{72}] \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	0	2.5E-15	2.5E-17	58.0
Клиноптитолит	$(\text{Na}, \text{Ca}_{0.5})_6[\text{Si}_{30}\text{Al}_6\text{O}_{72}] \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	0	2.5E-15	2.5E-17	58.0
Ломонтит	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0	2.5E-18	2.5E-18	58.0
Морденит	$(\text{Na}_2, \text{K}_2, \text{Ca})[\text{Al}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{24}] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0	2.5E-15	2.5E-17	58.0
Вайрацит	$\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0	2.5E-14	2.5E-14	58.0
Каолинит	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$	0	1.0E-17	1.0E-17	62.76
Са-сметит	$\text{Ca}_{0.3}[\text{Al}_{3.5}\text{Mg}_{0.5}][\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	0	1.0E-14	1.0E-14	58.62
К-сметит	$\text{K}_{0.5}[\text{Al}_{3.5}\text{Mg}_{0.5}][\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	0	1.0E-14	1.0E-14	58.62
Mg-сметит	$\text{Mg}_{0.25}[\text{Al}_{3.5}\text{Mg}_{0.5}][\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	0	1.0E-14	1.0E-14	58.62
Na-сметит	$\text{Na}_{0.5}[\text{Al}_{3.5}\text{Mg}_{0.5}][\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$	0	1.0E-14	1.0E-14	58.62
Al-иллит	$\text{KAl}_4[\text{Si}_7\text{AlO}_{20}](\text{OH})_4$	0	1.0E-14	1.0E-14	58.62

Примечание. Приведены значения для базового варианта 1K2. В варианте 1K4 введен запрет на генерацию олигоклаза; в варианте 1K5 дополнительно увеличена k_{25} для генерации морденита до 2.5E-15; в варианте 1K6 дополнительно увеличена k_{25} для растворения вулканического стекла до 9.66E-12; в варианте 1K7 в геохимическую систему добавлены гейландит и клиноптитолит с параметрами кинетического взаимодействия как у морденита; удельная площадь поверхности для всех минеральных фаз задана 0.01 $\text{м}^2/\text{дм}^3$.

сококремнистых цеолитов и опала, которые заполняют поровое пространство и формируют стенки канала. В ходе преобразований в осевой части канала значительно увеличивается пористость и проницаемость (в 2 раза и в 9.5 раза в нижней части канала соответственно). В противоположность этому в оболочке канала в приповерхностных условиях (начиная с глубины 6.5 м)

происходит уменьшение пористости/проницаемости (до нуля) за счет заполнения порового пространства опалом и высококремнистыми цеолитами (морденит, гейландит, клиноптитолит).

TOUGHREACT-моделирование показывает, что в природных условиях вулканогенно-артезианских бассейнов, сложенных горными породами риолитового состава, происходит естествен-

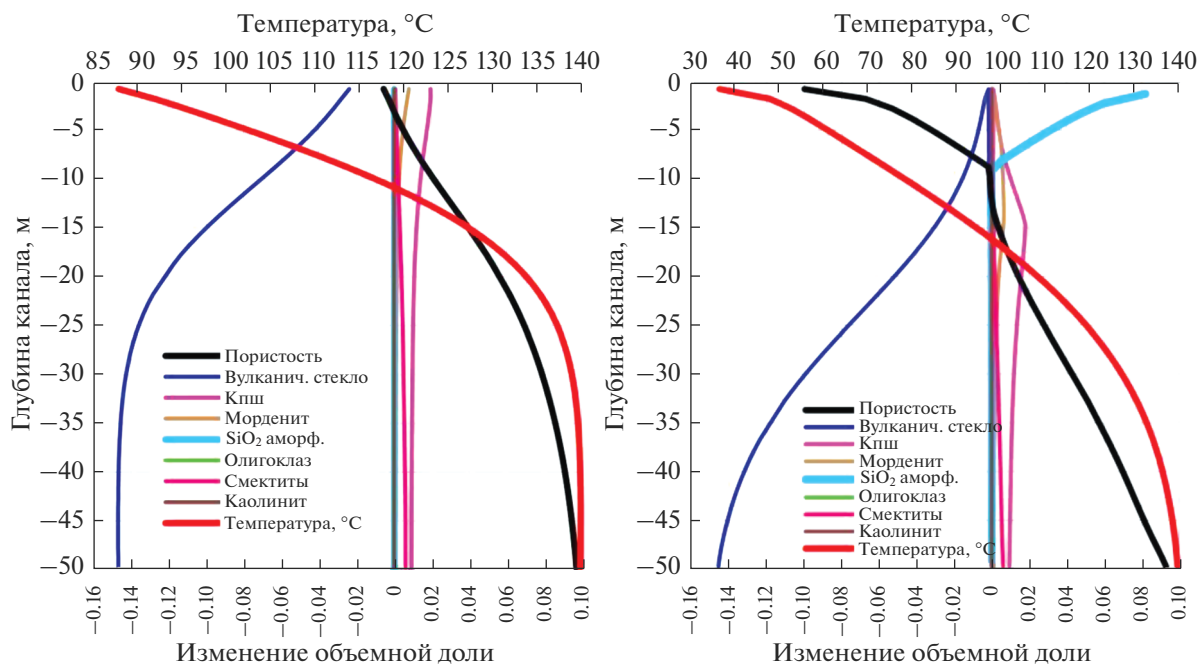


Рис. 7. Результаты TOUGHREACT-моделирования (вариант 1K4) на 1000 лет: профили изменения объемных долей минеральных фаз, изменения пористости и температуры по глубине в осевой части канала (слева) и в оболочке канала (справа).

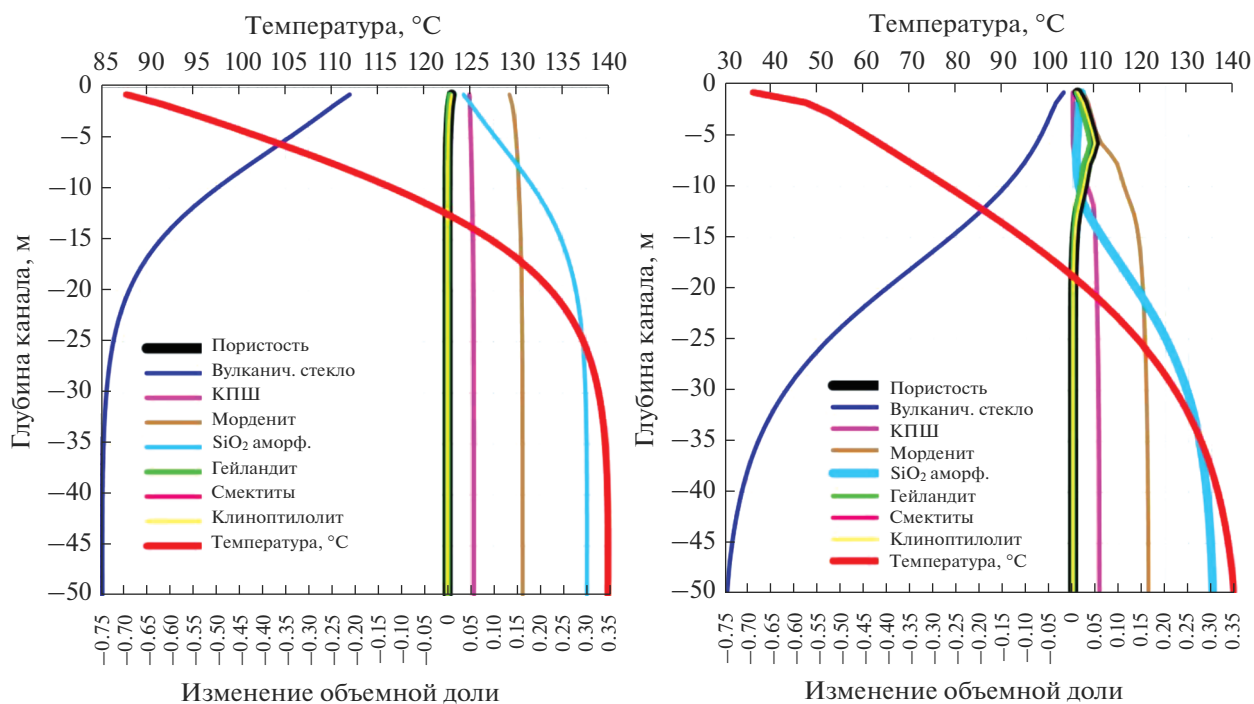


Рис. 8. Результаты TOUGHREACT-моделирования (вариант 1K7A) на 1000 лет: профили изменения объемных долей минеральных фаз, изменения пористости и температуры по глубине в осевой части канала (слева) и в оболочке канала (справа).

ная боковая самоизоляция каналов разгрузки термальных вод с одновременным увеличением вертикальной пропускной способности их осевых участков. Это обеспечивает условия формирования полых каналов и каверн, в которых при определенных термогазогидродинамических условиях могут функционировать гейзеры.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ TOUGHREACT-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обнаружение в гейзеритах, слагающих грифоны разгрузки, преобладания цеолитов над аморфным кремнеземом (опалом) [Sergeeva, Kiryukhin, 2019] указывает на необходимость корректировки TOUGHREACT-модели минералообразования. Коррекция модели выражалась в рассмотрении нескольких дополнительных вариантов начального минералогического состава (в геохимическую систему добавлены гейландит и клиноптилолит) и кинетических параметров для осаждения и растворения фаз. Константы осаждения морденита, гейландита и клиноптилолита были увеличены на два порядка, до 2.5×10^{-15} моль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$, а константа растворимости вулканического стекла была увеличена до 9.66×10^{-12} моль $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Основанием для увеличения констант осаждения цеолитов послужило то обстоятельство, что в щелочных средах происходит ускорение генерации цеолитов [Жданов, 1981], что соответствует измерениям pH термальных растворов 8–9.2 (см. табл. 1). Также в щелочных условиях резко (на несколько порядков) возрастает растворимость вулканического стекла, поэтому в модели его константа растворимости увеличена.

При этих условиях на модели удалось воспроизвести существенное преобладание морденита, клиноптилолита и гейландита над аморфным кремнеземом (опалом) в верхней части канала, начиная с глубины 8 м в его осевой части, и с глубины 15 м в оболочке канала (рис. 8). При указанных условиях отношение масс морденита, клиноптилолита и гейландита в сумме к массе опала достигает 4, но существенного увеличения пористости (проницаемости) в осевой части канала не наблюдается. Таким образом, одновременное воспроизведение на TOUGHREACT-модели преобладающей генерации цеолитов и увеличения пористости по всему протяжению канала не наблюдается.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующие гейзеры и палео-гейзеры на Камчатке распространены в артезианско-вулка-

ногенных бассейнах, сложенных продуктами современного кислого вулканизма и водно-ледниковыми отложениями, что соответствует общемировым закономерностям распространения гейзерных полей.

2. Исследование минерального состава поверхности гейзеритовых плащей и грифонов гейзеров Великан, Большой и Первенец показывает, что преобладающими минералами в них являются цеолиты (гейландит, клиноптилолит и морденит), при подчиненном содержании аморфного кремнезема (опала).

3. Результаты TOUGHREACT-моделирования показывают, что проточная восходящая фильтрация щелочных термальных вод в породах риолитового состава приводит к формированию вертикального канала глубокого заложения, в осевой (наиболее прогретой) части которого пористость и проницаемость со временем значительно возрастают. Одновременно, в менее прогретой периферической части канала формируется его оболочка с уменьшающейся во времени пористостью и проницаемостью. Изменения фильтрационно-емкостных свойств связаны с изменением объема порового пространства при гидротермальных преобразованиях, которые включают растворение исходного вулканического стекла и генерацию вторичных минералов, в основном аморфного кремнезема (опала), гейландита, клиноптилолита и морденита. Формирование гейзеров в указанных выше условиях возможно при последующем механическом выносе высокопористой матрицы и преобразовании высокопроницаемого канала в полый канал.

4. Одной из задач дальнейших исследований может быть исследование механизма формирования высокопродуктивных геотермальных и нефтяных резервуаров в приконтактных зонах экстрезивных комплексов риолит-дацитового состава. В качестве примеров участков таких продуктивных геотермальных резервуаров можно привести Паужетский [Kiryukhin, Yampolsky, 2004, рис. 5] и Мутновский (риолитовый шток вблизи наиболее продуктивной скважины 042 с расходом 100 кг/с). Сведения о нефтепродуктивности вулканогенных резервуаров кислого состава: гранитов, риолитовых порфиров, эффузивов риолитового состава и гранодиоритов, приводятся в обзоре [Panteleyko et al., 2017]. Отмечается, что расход нефти из индивидуальных продуктивных скважин в таких резервуарах может достигать 620 т/сут (или 7.2 кг/с).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 18-05-00052-19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аверьев В.В., Сугробова Н.Г.* Естественные термопроявления на Паужетском месторождении // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 31–42.
- Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.* Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 3–27.
- Жданов С.П., Хвощев С.С., Самулевич Н.Н.* Синтетические цеолиты. М.: Химия, 1981. 358 с.
- Карпов Г.А., Двигало В.Н.* Термопроявления кальдеры Академии Наук: результаты топосъемки, гидрохимия термальных источников после катастрофического подводного извержения 1996 г. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 101–114.
- Карпов Г.А., Николаева А.Г., Акимов В.Н., Гальченко В.Ф.* Эволюция режима и физико-химических характеристик растворов новообразованного гейзера в кальдере Узон (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 3–13.
- Кирсанова Т.П.* Гидротермы Киреунской Долины в Срединном хребте Камчатки // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 239–246.
- Кирюхин А.В., Рычкова Т.В.* Условия формирования и состояние гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 238–253.
- Кирюхин А.В., Рычкова Т.В., Дубинина Е.О.* Анализ гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3–20.
- Кирюхин А.В., Шадрин С.В., Пузанков М.Ю.* Моделирование термогидрогеохимических условий формирования продуктивных резервуаров в вулканогенных породах // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 90–104.
- Крашенинников С. П.* Описание земли Камчатки / Издание 9-ое дополненное. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2018. 920 с.
- Пийп Б.И.* Термальные ключи Камчатки. М.: АН СССР, 1937. 286 с.
- Соболевская О.В.* Больше-Банные источники: история изучения, современное состояние // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. № 2. Вып. 4. С. 130–135.
- Устинова Т.И.* Камчатские гейзеры. М.: Географгиз, 1955. 77 с.
- Федотов С.А., Муравьев Я.Д., Иванов В.В. и др.* Извержения в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана в 1996–1997 гг. и их воздействие на окружающую среду // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: СО РАН НИИЦ ОИГГМ, 1998. С. 127–145.
- Фролова Ю.В., Гвоздева И.П., Чернов М.С., Кузнецов Н.П.* Инженерно-геологические аспекты гидротермальных преобразований туфогенных пород Долины Гейзеров (полуостров Камчатка) // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 30–42.
- Chukanov N.V.* Infrared spectra of mineral species: extended library // Springer Science & Business Media. 2013. 1726 p.
- Hurwitz S., Manga M.* The fascinating and complex dynamics of geyser eruptions // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. Т. 45. P. 31–59.
- Kiryukhin A.V.* Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides-mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // J. Volcanology and Geothermal Research. 2016. V. 323. P. 129–147.
- Kiryukhin A.V., Yampolsky V.A.* Modeling Study of the Pauzhetsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2004. V. 33. № 4. P. 421–441.
- Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka, Russia) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. № 9. P. 1753–1766.
- Kiryukhin A.V., Sugrobov V.M., Sonnenthal E.L.* Geysers Valley CO₂ Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2018. V. 2018. P. 1–16.
- Kiryukhin A.V., Xu T., Pruess K. et al.* Thermal-Hydrodynamic-Chemical (THC) Modeling Based on Geothermal Field Data // Geothermics. 2004. V. 33. № 2. P. 349–381.
- Panteleyko I.A., Rube A.A., Supolkina I.V., Gachegov E.V.* Geological Structure and Petroleum Potential of the Area High-Latitude Ob Riverside // 19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development “Geomodel 2017”. Gelendzhik, 2017. P. 1–6.
- Sergeeva A.V., Kiryukhin A.V.* Secondary minerals in the geysers of the Geysers Valley (Kamchatka) // E3S Web of Conferences. EDP Sciences. Tomsk. 2019. V. 98. P. 08019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199808019>.
- Xu T., Sonnenthal E., Spycher N., Pruess K.* TOUGHREACT – a simulation program for Non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO₂ geological sequestration // Computers & Geosciences. 2006. V. 32. № 2. P. 145–165.

Modeling of the Conditions for the Formation of Permeable Geyser Channels in Acid Volcanism Areas

A. V. Kiryukhin^{1,2,*}, T. V. Rychkova¹, and A. V. Sergeeva¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

²*FSBI "Kronotsky State Biosphere Reserve", Ryabikova str., 48, Elizovo, 684000 Russia*

**e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru*

Existing geysers and paleo-geysers in Kamchatka are widespread in the volcanic-artesian basins, composed of products of modern acidic volcanism, which corresponds to the global patterns of the distribution of geyser fields. The TOUGHREACT simulation of upflow filtration of thermal waters, with a chemical composition corresponding to geysers of the Geyser Valley and occurring in the host rocks of the rhyolite composition, shows the formation of channels with high porosity and permeability with lateral self-isolation. Modeling shows that this occurs due to high rate of volcanic glass dissolution within upflow axial and silica deposition in a lateral envelope. Studies of the mineral composition of the top surfaces of the cones sinter of the Velikan, Bolshoy, and Pervenets geysers show that the predominant mineral phase there are zeolites (heulandite, clinoptilolite, and mordenite), with a subordinate content of amorphous silica (opal).

Keywords: geysers, zeolites, mineral formation, TOUGHREACT modeling.