

УДК 556.3

## **Моделирование некоторых частных условий формирования и функционирования гейзеров**

**Т.В. Рычкова, А.В. Кирюхин**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: tvr62@mail.ru*

С использованием TOUGHREACT-моделирования показана возможность формирования вертикального проницаемого канала в неизменных риолитовых туфах, состоящих из вулканического стекла. Применение TOUGH2-моделирования [4] с модулем состояния включающим  $\text{CO}_2$ , показывает необходимость притока теплоносителя с массовым газосодержанием более 0.1 г/л для обеспечения кипения по всей глубине канала. Рассмотренные выше гидрогеологические условия могут способствовать формированию гейзеров в активных вулканических областях.

### **Введение**

Фундаментальные основы механизма функционирования гейзеров рассмотрены в многочисленных публикациях российских и зарубежных ученых. Актуальный обзор указанных выше работ содержится в статьях [5, 3].

Целью данного исследования является выяснение механизма формирования проницаемых гейзерных каналов и диапазона концентраций неконденсирующихся газов, необходимых для обеспечения газлифта в каналах гейзеров.

### **Термогидродинамическое-химическое моделирование условий формирования проницаемого гейзерного канала в вулканогенных породах риолитового состава**

Гидрогеологические разрезы продуктивного гейзерного резервуара Долины Гейзеров приведены в работе [1]. В работе [2] содержатся сведения о минералогическом составе горных пород, слагающих продуктивный гейзерный резервуар Долины Гейзеров. Для объяснения формирования вертикальных каналов гейзеров в артезианско-вулканогенных бассейнах, сложенных пирокластическими породами риолитового состава, построена термогидродинамическая-химическая модель TOUGHREACT, учитывающая взаимодействие воды с горными породами (генерацию минералов и их растворение) [7].

Геометрия модели определена в виде цилиндра (рис. 1), осевая часть которого (Tuff1) служит каналом для восходящей циркуляции термальных вод; промежуточная оболочка цилиндра (Tuff2) – вмещающие породы, внешняя часть цилиндра (Fixed) – представляет вмещающие горизонты холодных грунтовых вод. Глубина модельного канала равна 50 м. В модели использована радиальная вычислительная сетка, включающая 300 элементов (ячеек) с размерами  $\Delta X = 1$  м,  $\Delta Y = 1$  м, и  $\Delta Z = 0,5$  м.

В модели определены изотермические условия, начальная 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.

Моделирование формирования канала гейзера выполнялось для условия, когда весь гейзерный канал заложен в массиве, сложенным неизменными риолитовыми туфами (начальный минералогический состав - вулканическое стекло). В качестве возможных вторичных гидротермальных минералов рассматриваются также: кварц, калиевый полевой шпат, клинохлор, кристобалит, ломонтит, морденит,  $\text{SiO}_2$  (am), вайрацит, каолинит-al, смектит-ca, смектит-k, смектит-mg, смектит-na, иллит-al, олигоклаз. Химический состав воды определен по составу воды гейзера Великан.

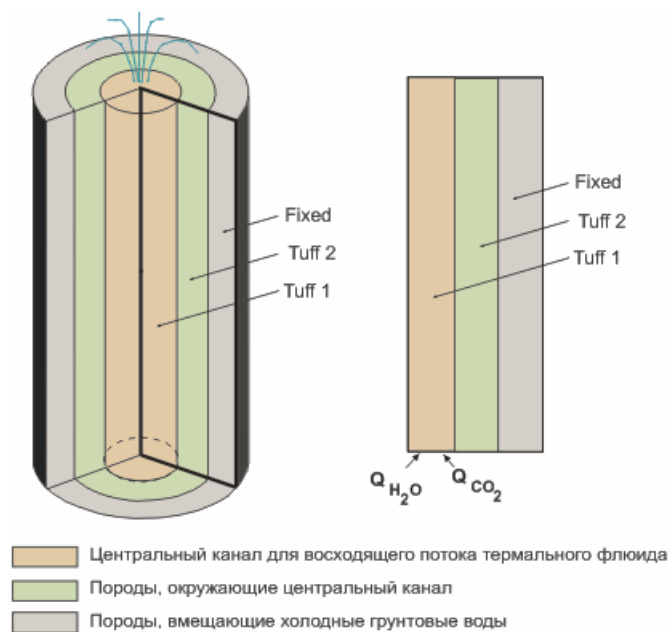


Рис. 1. Радиально-цилиндрическая геометрия термогидродинамической-химической модели TOUGHREACT-EOS2 и срез цилиндра.

Начальные условия для TOUGHREACT-моделирования определены по результатам предшествующего термогидродинамического TOUGH2-моделирования. При этом на верхней и боковой оболочке цилиндра задано фиксированное распределение давления (задано гидростатическим) и температуры (задано по термограмме по скв. 5 Паужетского месторождения). В основании модели задан массовый источник – поступление термальной воды с расходом 1 кг/с и энтальпией 589 кДж/кг (140° С) и поступление неконденсирующегося газа CO<sub>2</sub> с расходом 0,0001 кг/с и энтальпией 589 кДж/кг.

Результаты TOUGHREACT-моделирование показывают (рис. 2), что в результате проточной восходящей циркуляции термального флюида за счет растворения исходного вулканического стекла при генерации вторичных минеральных фаз с меньшим объемом - в осевой части модели за 3,7 тыс. лет формируется пористый (0,435) и проницаемый (сотни Д) канал.

На внешней оболочке цилиндра в приповерхностных условиях, начиная с глубины 6,5 м и выше, произошло осаждение аморфного кремнезема, что привело к самоизоляции в верхней части канала за счет уменьшения пористости в 2 раза и уменьшения проницаемости на порядок по сравнению с первоначальными значениями.

### **Моделирование термогидродинамического режима течения газонасыщенного флюида в канале гейзера**

Линия зависимости температуры кипения от глубины  $T_{sat}(\text{depth})$  для «чистой воды» разделяет область жидкости и пара (рис. 3). При измерениях температуры в каналах гейзеров ожидаемым было попадание точек замеров на линию кипения. В действительности же, точки фактически измеренной температуры воды на дне каналов гейзеров перед их извержением (гейзеры Большой (2016, 2017 гг.) и Великан (1994, 2016, 2017 гг.) [5, 6] оказались в зоне жидкого состояния воды со сдвигом на 3-6° С от линии кипения «чистой воды». Это показывает необходимость неконденсирующихся газов для инициирования извержений гейзеров.

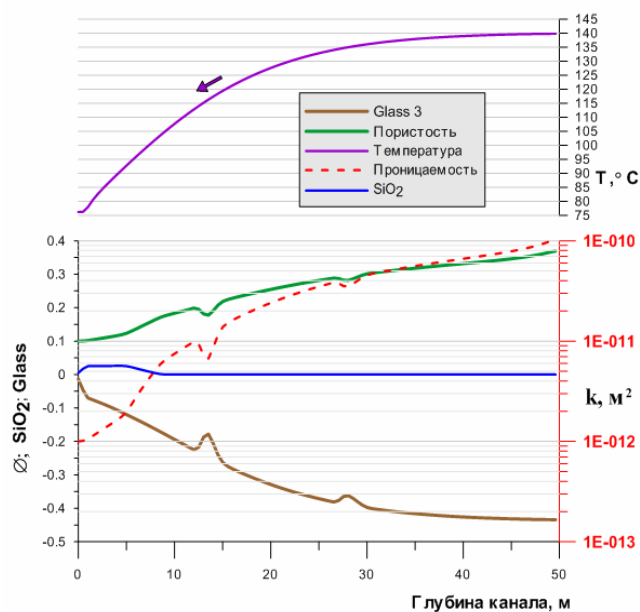


Рис. 2. Профиль растворения вулканического стекла, образования гейзерита, распределения температуры, пористости и проницаемости в центральной части радиально-цилиндрической модели (гейзерный канал) в результате моделирования формирования канала в риолитовых туфах.

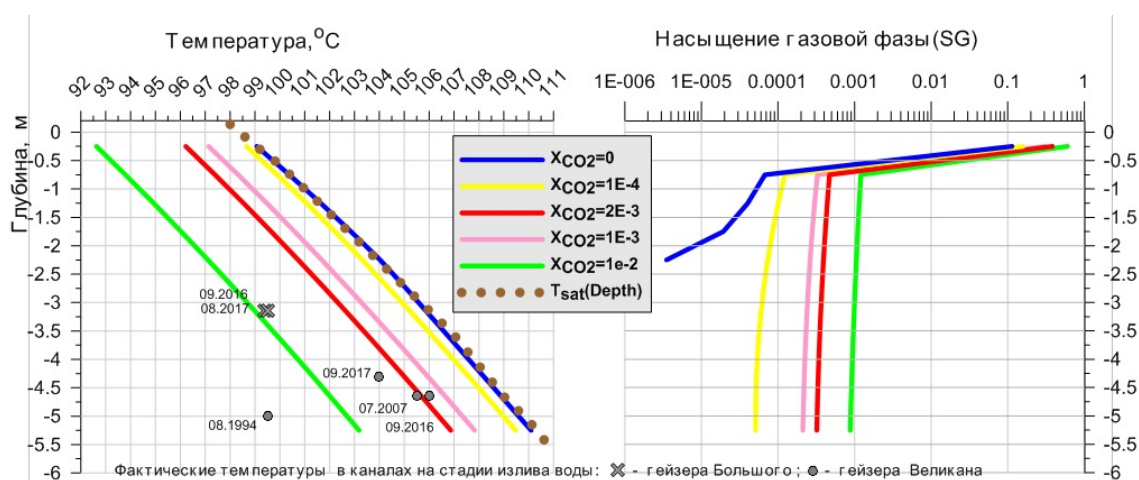


Рис. 3. Зависимости модельной температуры насыщения и модельного насыщения газовой фазы в канале гейзера Великан при заданных различных значениях массового газосодержания  $\text{CO}_2$ .

Для выяснения диапазона значений массового газосодержания  $\text{CO}_2$ , необходимого для закипания по всей глубине канала гейзеров, было использовано TOUGH2 – EOS2 моделирование [4] (в модели используется модуль состояния EOS2 (Water+ $\text{CO}_2$ )).

Геометрия модели соответствует усредненным характеристикам гейзера Великан и представляет собой цилиндр высотой 5,5 м с радиусом  $R=1.27$  м. Для генерации вычислительной сетки цилиндр разбит по вертикали на 11 элементов высотой 0,5 м каждый. Нижний элемент модели используется для задания притока теплоносителя и  $\text{CO}_2$ . Для определения на TOUGH2 модели канала - его пористость задана 0,99, а проницаемость  $10^4$  Д.

На верхней границе модели разгрузка гейзера определена как разгрузка скважины, работающей в режиме самоизлива. На нижней границе модели граничные условия заданы притоком глубинного теплоносителя (1 кг/с и энтальпией 466 кДж/кг) и

притоком  $\text{CO}_2$  (с энтальпией 466 кДж/кг) и расходом в диапазоне от нуля до 10 г/с. Теплообмен стенок канала с породами, вмещающими горизонты грунтовых вод, задан с помощью тепловых источников с отрицательным значением теплового потока (-764,4 Вт/м<sup>2</sup>) для каждого из 11 элементов.

Результаты моделирования показывают (рис. 3), что при значении массового газосодержания  $X_{\text{CO}_2}=0$ , линия кипения воды в канале совпадает с линией кипения «чистой воды» для условий Долины Гейзеров. При увеличивающихся значениях  $X_{\text{CO}_2}$  распределение температуры в канале смещается от линии кипения чистой воды в сторону пониженных температур. Точки измерений температуры для гейзеров Большой и Великан соответствуют значениям массового газосодержания  $\text{CO}_2$  от  $10^{-3}$  (1 г/л) до  $10^{-2}$  (10 г/л). Результаты также показывают, что начиная от массового газосодержания  $10^{-4}$  (0,1 г/с) и больше, кипение происходит по всей глубине канала (5,5 м), в то время как при значении  $X_{\text{CO}_2}=0$ , вода в канале кипит до глубины 2,25 м, а глубже кипение отсутствует.

### Выводы

1. TOUGHREACT-моделирование показало возможность формирования вертикального проницаемого канала в неизменных риолитовых туфах, состоящих из вулканического стекла. Синхронно с формированием канала происходит образование непроницаемой оболочки из гейзерита.

2. TOUGH2-EOS2-моделирование показало, что для кипения по всей глубине канала необходим приток теплоносителя с величиной массового газосодержания  $\text{CO}_2$  более 0,1 г/л. В частности, для условий гейзеров Большого и Великана необходимо массовое газосодержание  $\text{CO}_2$  от 1 до 10 г/л.

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

### Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Hurwitz S. and Manga M. The Fascinating and Complex Dynamics of geyser eruptions // The Annual Review of Earth and Planetary Sciences is online at earth.annualreviews.org. 2017. Vol. 45. P. 31–59.
4. Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0 // Rep. LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California. 1999. 198 p.
5. Kiryukhin A. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // J. of Volcanol. Geoth. Res. 323. 2016. P. 129-147.
6. Kiryukhin A., Sugrobov V., Sonnenthal E. Geysers Valley  $\text{CO}_2$  Cycling Geological Engine (Kamchatka, Russia) // Geofluids. Volume 2018. Article ID 1963618. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2018/1963618>
7. Xu, T., Sonnenthal E., Spycher N., Pruess K. TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Nonisothermal Multiphase Reactive Geochemical Transport in Variably Saturated Geologic, Media LBNL-55460. 2006.