

## TOUGH2-EOS2 моделирование влияния инфильтрации в двухфазный гейзерный резервуар на динамику естественной разгрузки гидротерм

Усачева О.О.<sup>1</sup>, Кирюхин А.В.<sup>1,2</sup>, Солдатова П.Д.<sup>2</sup>

## TOUGH2-EOS2 modeling of the effect of infiltration in a two-phase geysers reservoir on the dynamics of natural discharge of hydrotherms

Usacheva O.O.<sup>1</sup>, Kiryukhin A.V.<sup>1,2</sup>, Soldatova P.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;  
e-mail: lel89@yandex.ru

<sup>2</sup> Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

В работе предпринята попытка объяснить снижение разгрузки глубинной составляющей, наблюдаемое в Долине Гейзеров в период снеготаяния. Для этого на двухмерной модели, построенной в программе PetraSim с использованием модуля состояния EOS2, задается инфильтрация холодной воды в область резервуара с двухфазными условиями (пар + вода).

### Введение

Исследованиями, проведенными на гейзерных полях Йеллоустонского национального парка [6] и Долины Гейзеров [1, 3], были выявлены сезонные изменения глубинной составляющей термальной разгрузки. В Долине Гейзеров это изменение составляет 31 % (уменьшается в паводок). Задача исследования: оценить возможную связь между изменениями естественной разгрузки источников и инфильтрацией холодной воды в двухфазный резервуар на примере профильной двухмерной модели Долины Гейзеров.

Оценка содержания глубинной составляющей Qd в речной воде была выполнена В.М. Сугробовым в период 1962-1994 гг., далее работы были продолжены А.В. Кирюхиным – с 2007 г. по настоящее время [4, 5]. В 2012 и 2019 гг. удалось получить непрерывный ряд значений Qd в течение большого промежутка времени (4 месяца).

### Моделирование инфильтрации в двухфазный резервуар

Для создания модели используется программа PetraSim – графическое приложение к семейству программ TOUGH2 [7]. Модуль состояния EOS2 предназначен для описания двухфазного двухкомпонентного (вода + углекислый газ) флюида [2, 7]. Описывается двухмерная профильная модель Долины Гейзеров, включающая Верхне-Гейзерное и Нижне-Гейзерное поля, Гейзерный резервуар (рис. 1).

На верхней границе резервуара в районе Верхне-Гейзерного поля заданы двухфазные условия. Модель состоит из 4508 элементов. На поверхности задана граница с фиксированными значениями давления и температуры (1.5 Бар и 10 °С, соответственно). В модели так же заданы 14 скважин, работающих в режиме самоизлива с индексом продуктивности  $PI=1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$  и давлением  $P=2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (2 Бар). Для описания резервуара используются 5 материалов. Основная часть резервуара – материал RESER с проницаемостью по X и Y –  $5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , по координате Z –  $1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ . Материалы CAPRK и cap2 используются для описания водоупорных пород низкой проницаемости на поверхности модели (проницаемость  $2 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$  и  $1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2$ , соответственно). Материал UPFLO с высокой проницаемостью ассоциируется с источниками в подошве модели. Источники – это заданные притоки воды и CO<sub>2</sub> с общим расходом 260 и 1.3 кг/с, соответственно. Энтальпия воды –  $5.04 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ , соответствует температуре 120 °С. Для задания инфильтрации холодной воды в резервуар использовались ячейки с заданным материалом INJES, проницаемостью по X, Y –  $5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ , по Z –  $1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ . Инфильтрация холодной воды с энтальпией

42 кДж/кг (соответствует температуре 10 °С) задавалась в зависимости от варианта моделирования в разные временные отрезки (от 2 до 4 месяцев). Таким образом, была воспроизведена сезонность, наблюдаемая в Долине Гейзеров.

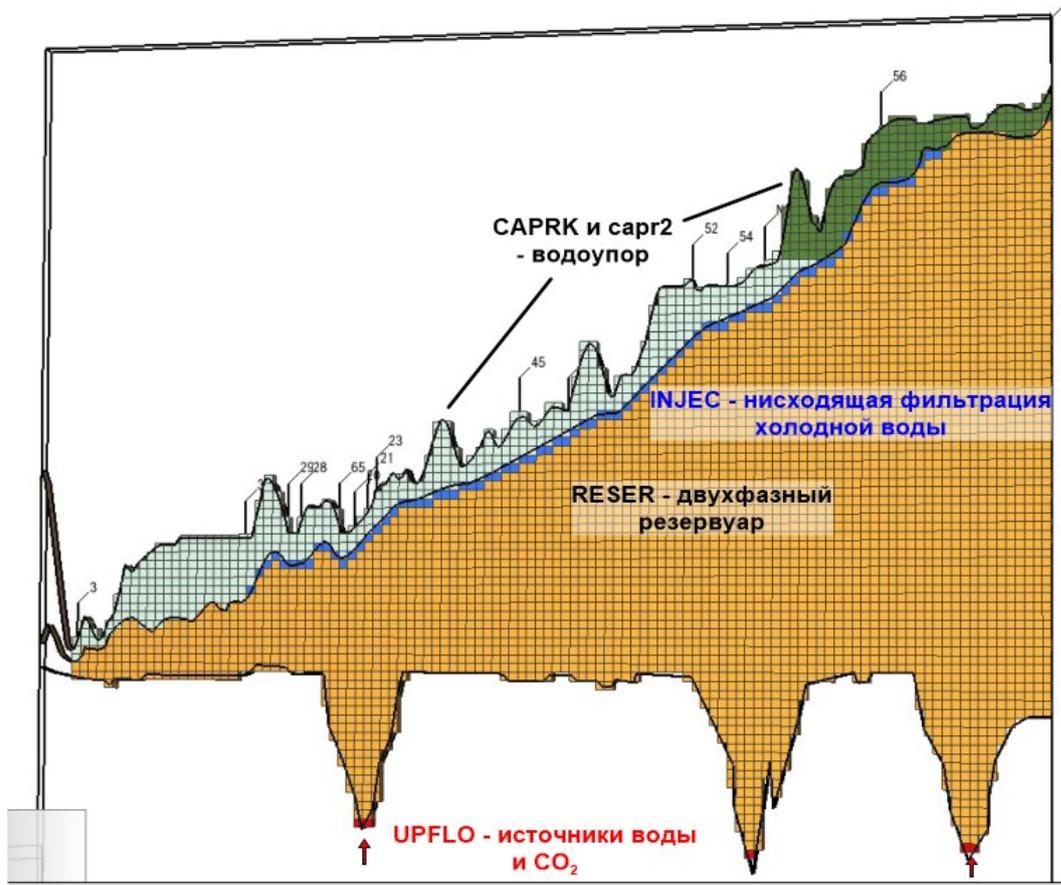


Рис. 1. Двухмерная модель двухфазного Гейзерного резервуара.

**Результаты и обсуждения**

Для достижения наилучшей сходимости модельных и фактических значений расхода глубинной составляющей Qd в воде р. Гейзерной было разработано и решено порядка 20 различных сценариев моделирования. Предположение о том, что холодная вода инфильтруется через каналы затопленных Подпрудным озером гейзеров, не нашло подтверждения при сравнении результатов с исходными данными. Наиболее сопоставимые с натурными наблюдениями результаты были получены при задании инфильтрации по кровле двухфазного резервуара. Так же было отмечено, что сжимаемость пород резервуара влияет на результаты моделирования – для наилучшей сходимости было подобрано значение  $2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$ , тем самым удалось «убрать» высокие значения величины глубинной составляющей сразу после окончания периода паводка.

Для представления в данной работе было выбрано три варианта моделирования – 4-100E-9, 4-100E-6, 4-100E-5 (рис. 2, табл. 1). Стоит отметить, что во всех вариантах задана достаточно высокая пористость пород резервуара – 60 %, и коэффициент объема равен 2, что позволило без внесения изменений в геометрию модели увеличить объем резервуара в 2 раза.

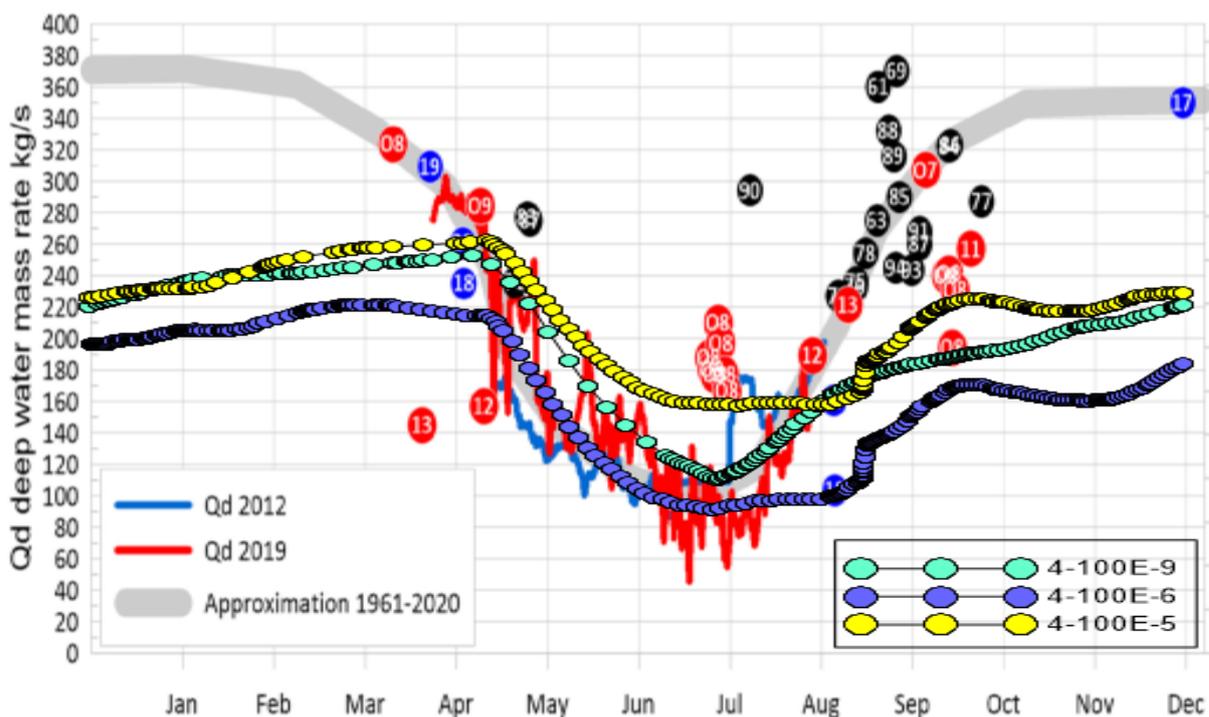


Рис. 2. Расход глубинной составляющей Qd – исходные данные и наиболее сопоставимые результаты моделирования. Исходные данные взяты из [5]. Линиями обозначены непрерывные ряды значений, полученные в 2012 и в 2019 гг. Кружками указаны дискретные измерения с указанием года.

Таблица. Варианты моделирования и принятые переменные

Сценарий моделирования	Массовая доля CO <sub>2</sub>	Расход инфильтрации, время	Сжимаемость резервуара Па <sup>-1</sup>	Дополнения
4-100E-9	0.005	400 кг/с, 2 мес.	2E-8	Пористость 0.6; VF 2, инъекция холодной воды по кровле (80 ячеек, 5 кг/с)
4-100E-6	0.005	400 кг/с, 4 мес.	2E-8	Пористость 0.6; VF 2, инъекция холодной воды по кровле (80 ячеек, 5 кг/с)
4-100E-5	0.005	200 кг/с, 4 мес.	2E-8	Пористость 0.6; VF 2, инъекция холодной воды по кровле (40 ячеек, 5 кг/с)

Примечание. VF (Volume factor) – множитель, использующийся для задания конечного объема элементов модели.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) Инфильтрация холодной воды в Гейзерный резервуар может объяснить наблюдаемые изменения расхода глубинной составляющей Qd в период снеготаяния.

2) Снижение расхода глубинной составляющей в период паводка в модели происходит за счет превращения жидкости и CO<sub>2</sub> из газовой фазы в жидкую. При охлаждении пар конденсируется, в двухфазном резервуаре появляется пустое пространство, ранее занятое паром. Вследствие этого образуются области с очень низким давлением («вакуум»), которые, как ловушки, захватывают и удерживают внутри себя поступающий снизу родительский флюид, тем самым снижая содержание Qd в воде р. Гейзерной.

Авторы выражают признательность А.С. Кулиевой (СПбГУ) за выполнение отдельных сценариев TOUGH2-моделирования и их обработку. Работа выполнена при

поддержке РФФИ по проекту № 21-55-50003\21 ЯФ «Магматический фрекинг и флюидные потоки в вулканических структурах».

### Список литературы

1. *Кiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubinina E.O.* Анализ гидрогеологического режима ГТС Долины гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 20-30.
2. *Кiryukhin A.V.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб: ООО «Эко-Вектор Ай-Пи», 2020. 431 с.
3. *Рычкова Т.В., Усачева О.О.* Моделирование условий функционирования гейзеров под воздействием Подпрудного озера-2 (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), Петропавловск-Камчатский, 03-08 сентября 2020 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2020. С. 106-110.
4. *Kiryukhin A.V., Sugrobov V.M., Sonnenthal E.* Geysers valley CO<sub>2</sub> cycling geological engine (Kamchatka, Russia) // *Geofluids Journal*. 2018. Art. 1963618. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/1963618>
5. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Zhuravlev N.B. et al.* Dynamics of natural discharge of the hydrothermal system and geyser eruption regime in the Valley of Geysers, Kamchatka // *Applied Geochemistry*. 2022. V. 136. Art. 105166. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2021.105166
6. *McCleskey R.B., Clor L.E., Lowenstern J.B. et al.* Solute and geothermal flux monitoring using electrical conductivity in the Madison, Firehole and Gibbon rivers, Yellowstone National park // *Applied Geochemistry*. 2012. V. 27. № 12. P. 2370-2381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.07.019>
7. *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.