

Моделирование влияния инъекции холодной воды на гидротермальный резервуар на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров

Т.В. Рычкова

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

Создана 2D модель неглубокозалегающего продуктивного резервуара, позволившая понять основные особенности инъекции холодной воды из озера через каналы затопленных гейзеров, и через размываемые селевыми потоками окна в водоупорном слое на участке, выше по течению реки Гейзерной. Проанализированы результаты мониторинга за режимом основных гейзеров, а также результаты моделирования последствий инъекции холодной воды в локальную часть гидротермальной системы Долины Гейзеров.

Введение

Подпрудное озеро, сформировавшееся в результате катастрофического оползня, стало областью инъекции холодной воды в оставшуюся часть гидротермальной системы Долины Гейзеров.

Для мониторинга химических и термогидродинамических изменений в кипящих источниках и гейзерах на Нижнем Гейзерном поле были выбраны кипящий источник Аверий (№ 21), гейзеры Великан (№ 23) и Большой (№ 28).

Начиная с июля 2007 года, с помощью температурных логгеров нами фиксировались интервалы между извержениями гейзеров Великан и Большой. С помощью логгеров давления регистрировался уровень воды в озере Подпрудном. Начиная с мая 2012 года, с помощью логгеров проводимости непрерывно оценивалось изменение концентрации Cl-иона и одновременно - динамика изменения величины скрытой разгрузки и тепловой мощности гидротермальной системы.

В результате наблюдений было установлено, что после оползня 2007 г. режим работы гейзера Большого стал зависим от уровня воды в озере Подпрудном и средний период его извержений (с 2007 по 2013 гг.) снизился от 108 мин [1] до 63 мин.

Средний интервал между извержениями гейзера Великан до катастрофического оползня составлял 375-379 мин. [1]. С июля 2007 г. по сентябрь 2013 года, средний интервал между извержениями гейзера Великан снизился до 340 мин.

Кроме того, период инъекции из озера для гейзеров Большой и Великан характеризуется изменяющейся концентрацией хлор-иона с фиксированным максимумом (разбавление 23% и 12%, соответственно).

Для оценки влияния Подпрудного озера на уменьшение периода извержений гейзеров и изменяющуюся концентрацию хлор-иона была создана 2D модель гейзерного резервуара. TOUGH2-моделирование было также применено для проверки одной из альтернативных гипотез о влиянии озера на гидротермальную систему - охлаждение резервуара и снижение гейзерной активности.

Позиции основных гейзеров самой активной части гейзерной разгрузки Долины Гейзеров показаны на рис. 1.

Модель гейзерного резервуара

На рис. 2 изображена геометрия TOUGH2-EOS1 + tracer модели [2, 4], включающей моделирование процесса переноса трассера (в качестве которого рассматривается Cl ион). Модель охватывает неглубокозалегающий продуктивный гейзерный резервуар вдоль линии разреза АВ (рис. 1). Резервуар состоит из докальдерных верхне-плейстоценовых проницаемых озерных туфов и осадочных

отложений, которые осложнены комплексом даек (Q_3^{ust}) устьевой пачки. Горизонтальные размеры модели продуктивного гейзерного резервуара охватывают площадь $1000 \text{ м} \times 200 \text{ м}$. Нижняя граница резервуара задана на а.о. 350 м. Верхняя граница совпадает с топографической поверхностью. В 2D модели использована регулярная прямоугольная вычислительная сетка ($100 \times 1 \times 60$, $DX = 10 \text{ м}$, $DY = 100 \text{ м}$, и $DZ = 2 \text{ м}$).

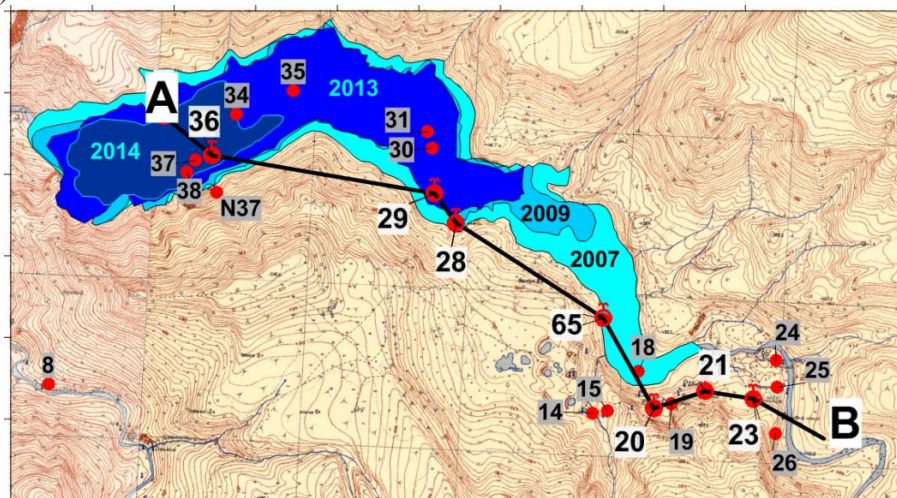


Рис. 1. Схема основного гейзерного резервуара гидротермальной системы Долины Гейзеров и позиции основных гейзеров (номера из табл. 1 [3]). Цветом показано распространение площади Подпрудного озера в 2007, 2009, 2013 и 2014 годах.

Зонирование модели (рис. 2) включает домен резервуар (RESERVOIR) и домен CAPROCK (относительный водоупор) с термическими и петрофизическими свойствами, отраженными в табл. 1 [7]. Условия питания были заданы в домене UPFLO: массовый тепловой поток $5,2e^{-3} \text{ кг/с м}^2$, с энтальпией 504 кДж/кг (120° C), а также массовый поток хлор-иона $4,86e^{-6} \text{ кг/с м}^2$ (соответствует концентрации хлора 900 мг/л), что соответствует массовому расходу 260 кг/с . На верхней границе модели задано фиксированное состояние (давление 1.5 бара, температура 10° C , и массовая концентрация $\text{Cl } 2e^{-6}$). Вертикальные границы модели термогидродинамически изолированы.

Разгрузка гейзеров и кипящих горячих источников на модели была задана как самоизливающиеся скважины с давлением в скважине, соответствующем гидростатическому давлению на данной глубине, и индексом продуктивности равным $1e^{-7} \text{ м}^2$.

Результаты моделирования

Моделирование естественного состояния показало довольно однородные температуру и концентрацию хлора в продуктивном неглубокозалегающем гейзерном резервуаре (рис. 3 А). Восходящий поток горячей воды в основном разгружается в гейзеры, заданные на модели как скважины. Инжекция холодной воды (с температурой 10° C) из Подпрудного озера задана в модели как фиксированное состояние вдоль каналов затопленных гейзеров 36, 29, 28 (см. рис. 3 В) и в некоторых локальных районах выше по течению р. Гейзерной, где водоупорный слой был поврежден незначительными наводнениями и селями (2011-2013 гг.). На этом (втором) этапе моделирования время задано на 3 года. Затем, когда гейзер Большой возобновил свою работу, моделирование задано еще на 4 года (2010 - 2014 гг.) (рис. 3 С).

Дополнительный сценарий моделирования предполагал возможность дополнительного поступления холодной воды в течение 2010-2014 гг. в районе выше по потоку от гейзера Великан (рис. 3 D). Эта зона инъекции холодной воды была "подсказана" самой программой для соответствия модельного периода извержений гейзера Великан и пониженного наблюдаемого. Дополнительная зона инъекции могла быть создана в результате регулярных селевых потоков (2011-2013 гг.), которые могли разрушить верхний относительный водоупор гейзерного резервуара в русле р. Гейзерной.

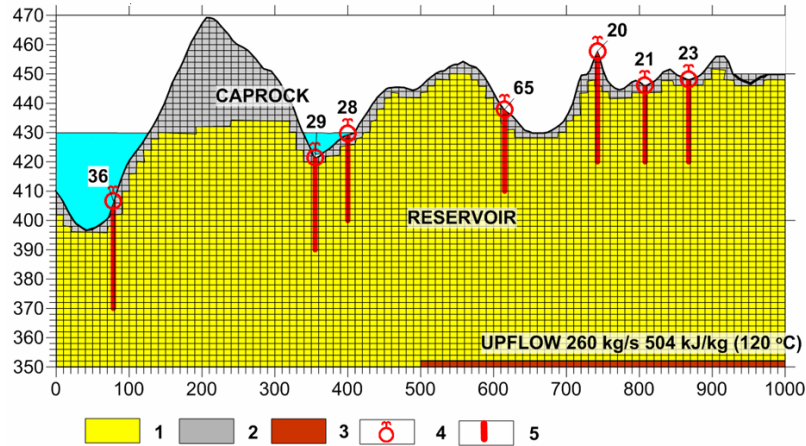


Рис. 2. Разрез по линии АВ основного гейзерного резервуара гидротермальной системы Долины Гейзеров, линия разреза показана на рис. 1. На рисунке показана вычислительная сетка 2D модели гейзерного продуктивного резервуара и позиции гейзеров (в модели заданы как скважины). **Легенда:** 1, 2, 3 - домены модели (1 - резервуар (RESER), 2 – водоупорный слой (CAPRK) и 3 - зона восходящего потока теплоносителя (UPFLO)); 4 – устья гейзеров; 5 - каналы гейзеров. Гейзеры 28, 29, и 36 действуют как инжекторы холодной воды (INJEC) после оползня 03.06.2007.

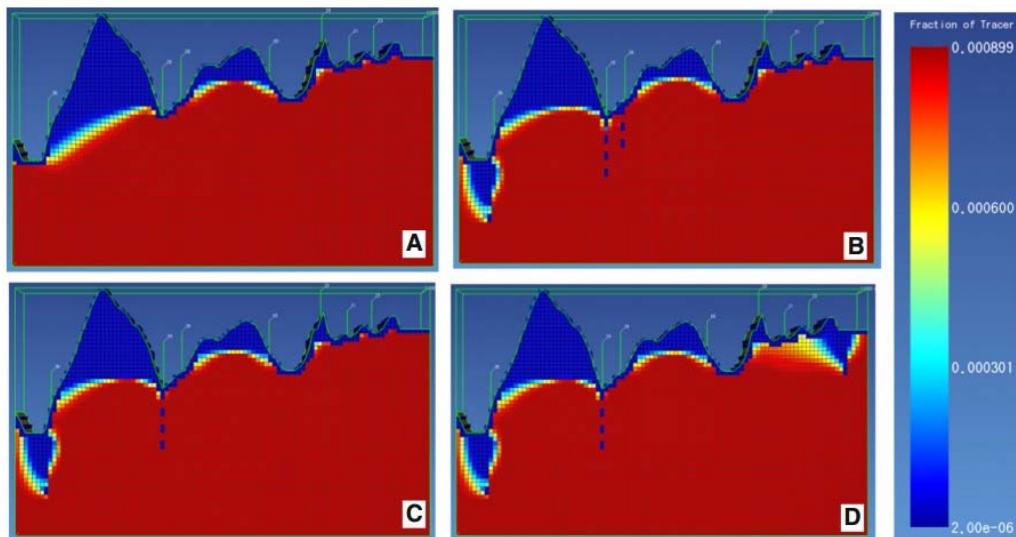


Рис. 3. Моделирование TOUGH2-EOS1+tracer (распределение массовой доли Cl иона): А) - установившееся естественное состояние гидротермальной системы (до инъекции холодной воды из озера Подпрудного); В) - состояние на 2010 г., спустя 3 года инъекции холодной воды из Подпрудного озера через каналы гейзеров 36, 29, 28; С) – состояние на 2014 год, спустя еще 4 года инъекции холодной воды из озера через каналы гейзеров 36, 29; D) то же, что и С, но с дополнительной инъекцией холодной воды выше по течению реки Гейзерной (справа на модели). Масштаб шкалы от 2e-6 до 900e-6.

Оба сценария моделирования (С и D), показали значительное увеличение расхода разгрузки гейзера Большой (+54,6%), сценарий моделирования D также показал некоторое увеличение разгрузки гейзера Великан (+ 5,9%). Тем не менее, моделирование не показало существенного изменения по хлору, хотя в действительности такое разбавление наблюдается в гейзерах Большой и Великан.

Таким образом, сценарии моделирования (С и D) объясняют значительное уменьшение периода извержений гейзера Большой (-54,6%) как результат увеличения его расхода разгрузки, если мы допускаем, что период извержений имеет обратную зависимость от среднего расхода разгрузки гейзера в течение полного цикла. Модель по сценарию D (с дополнительной инъекцией выше по р. Гейзерной) объясняет наблюдаемое уменьшение периода извержений гейзера Великан (-5,9%) в течение 2011-2013 гг.

Как уже упоминалось выше, оба сценария (С и D) не предсказывали разбавление по хлору в гейзере Большом (№ 28) в те периоды, когда он оказывался выше уровня воды в озере. Значительное разбавление по хлору в гейзере Большом (-23%) можно отнести к наблюдаемому прямому притоку холодной воды в канал гейзера через открытое отверстие в конусе гейзера. Разбавление хлора в гейзере Великан может быть объяснено дополнительной инъекцией холодной воды в область речного дна выше по потоку от гейзера Великан.

Выводы

1. Модельная разгрузка гейзеров выросла вследствие увеличения давления в резервуаре из-за инъекции холодной воды, что соответствует наблюдаемому уменьшению периода извержений наблюдаемых гейзеров.
2. Вопреки предположению, что инъекция холодной воды из озера приведет к остыванию резервуара, необходимо отметить, что семилетняя инъекция в целом не повлияла на изменение температуры в резервуаре. Модельные гейзеры и источники, в каналы которых заливалась вода, однозначно показывали снижение температуры; но те источники и гейзеры, в которые не попадала вода, показали прямую зависимость температуры от давления: если давление в резервуаре возрастало – температура тоже возрастала, если давление падало – температура падала. И в том и в другом случае, температура, в целом, восстанавливалась, т.е. с течением времени термодинамическая система приходила в состояние равновесия.
3. Моделирование также показало разбавление хлора в гейзере Великан как следствие предполагаемой дополнительной инъекции холодной воды выше по потоку от гейзера Великан. Разбавление хлора в гейзере Большом (-23 %) можно объяснить наблюдаемым поступлением холодных поверхностных потоков через открытое отверстие в конусе гейзера.

Работы выполнялись при поддержке РФФИ по проекту 15-05-00676.

Список литературы

1. Дроздин В.А. 2007. <http://www.ch0103.emsd.ru/>
2. Finsterle, S. iTOUGH2 User's Guide // Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-40040. Berkeley. CA. USA. 1999. 130 p.
3. Kiryukhin A. Modeling and observations of geyser activity in relation to catastrophic landslides–mudflows (Kronotsky nature reserve, Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. № 323. P. 129-147.
4. Pruess, K., Oldenburg, C., and Moridis, G. TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Rep. LBNL-43134, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, California. 1999. 198 p.