

# TOUGH2 МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТАТИСТИКА ДЛЯ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГЕЙЗЕРОВ ВЕЛИКАН И БОЛЬШОЙ (ДОЛИНА ГЕЙЗЕРОВ, КАМЧАТКА)

**Рычкова Т.В.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, [tvr62@mail.ru](mailto:tvr62@mail.ru)*

## 1. Введение

По результатам мониторинга, проведенного в Долине Гейзеров начиная с июня 2007 г., установлено уменьшение среднего периода извержений основных гейзеров – Большого (от 108 мин до 63 мин) и Великана (от 375-379 мин до 340 мин.), а также снижение концентрации Cl-иона в воде этих гейзеров (на 23% и 12% соответственно) [2, 6]. Предполагалось, что уменьшение периода извержений гейзеров и изменяющаяся концентрация хлор-иона связаны с влиянием Подпрудного озера, ставшего областью инъекции воды после оползня 03.06.2007 г. Для проверки этой гипотезы была создана 2D модель гейзерного резервуара и выполнено TOUGH2-EOS1+tracer моделирование инъекции холодной воды в гидротермальный резервуар [3].

**2. TOUGH2-EOS1+tracer моделирование инъекции холодной воды в гидротермальный резервуар Долины гейзеров [5, 8].** Модель, включающая моделирование процесса переноса трассера (в качестве которого рассматривается Cl ион) разделена на зоны (домены) с различными материальными свойствами (табл. 1). В модели заданы начальные условия и граничные условия на поверхности и на подошве модели (табл. 2).

Таблица 1. Материальные свойства доменов, заданных в модели

| Домены модели                         | Минер. плотность, кг/м <sup>3</sup> | Пористость | Вертик. проницаемость, м <sup>2</sup> | Гориз. проницаемость, м <sup>2</sup> | Теплопроводность, Вт/м <sup>2</sup> °C | Уд. теплоемкость, Дж/кг°C |
|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
| Резервуар                             | 2600                                | 0.4        | 5.0E-14                               | 1.0E-12                              | 1.5                                    | 1000                      |
| Относительный водоупор                | 2600                                | 0.4        | 1.0E-15                               | 1.0E-15                              | 10                                     | 1000                      |
| Зона восходящего потока теплоносителя | 2600                                | 0.4        | 1.0E-12                               | 1.0E-12                              | 1.5                                    | 1000                      |
| Зона инъекции холодной воды           | 2600                                | 0.4        | 1.0E-12                               | 1.0E-12                              | 1.5                                    | 1000                      |

Граничные условия на поверхности модели (в водоупорном слое) включают температуру (°C), давление (Па), и массовую долю Cl (мг/л). Все эти параметры неизменны для всех ячеек водоупорного слоя (Fixed State) (табл. 2).

Граничные условия на подошве модели (заданы в 50 ячейках) включают условия питания (инъекцию восходящего потока теплоносителя с энтальпией 5.04E5 Дж/кг и инъекцию хлора CL с энтальпией 0 Дж/кг). Значения этих параметров (табл. 2) заданы как постоянные (Constant Flux – постоянный поток)

Таблица 2. Начальные и граничные условия, заданные в модели

|                                               | Начальные условия                                                                                   | Граничные условия |                       |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
|                                               |                                                                                                     | на подошве модели | на поверхности модели |
| Температура (T), °C                           | 10                                                                                                  |                   | 10                    |
| Давление (P), Па                              | Задано функцией $F = A + Bx + Cy + Dz$ , где $A = 4.3183E6$ ; $B = 0.0$ ; $C = 0.0$ ; $D = -9810.0$ |                   | 1.5E5                 |
| Массовая доля Cl, мг/л                        | 2                                                                                                   |                   | 2                     |
| Инъекция восход. потока теплоносителя, г/с*м2 |                                                                                                     | 0.0052            |                       |
| Инъекция Cl, кг/с*м2                          |                                                                                                     | 4.86E-6           |                       |

Вертикальные границы модели термодинамически изолированы. Кроме того, путем модельной аппроксимации гейзеры и горячие источники на модели заданы как скважины, работающие в режиме самоизлива с давлением, соответствующем давлению на данной глубине и коэффициентом продуктивности 1.0E-7 м<sup>2</sup>. Последовательно выполнив моделирование естественного состояния гидротермальной системы, инъекции холодной воды в резервуар из Подпрудного озера,

возобновленных извержений гейзера Большого, дополнительной инъекции выше гейзера Великан по течению р. Гейзерной, были получены следующие результаты:

- 1) моделирование подтвердило уменьшение периода извержений гейзеров, связанное с гидродинамическим подпором резервуара, созданным озером;
- 2) но моделирование не показало фактически наблюдаемое разбавление хлора в гейзерах Большой и Великан. И если снижение концентрации хлора в воде гейзера Большого мы можем рассматривать как результат прямого залива холодной воды в канал (2007-2010 гг.) и плохой герметичности стенок ванны (ухудшающейся с каждым следующим оползнем), то причина наблюдаемого снижения концентрации хлора в воде Великана осталась невыясненной.

Было решено еще 14 вариантов задач с иными (возможными) значениями горизонтальной проницаемости в зонах резервуара, восходящего потока теплоносителя и зоне инъекции холодной воды (табл. 3), а также с разными типами горизонтальной проницаемости между элементами модели.

Таблица 3. Тип проницаемости и значения, определенные для дополнительных вариантов решения задач.

|                   |                |         |         |                |         |         |         |         |
|-------------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Upstream Weighted | <b>1.0E-12</b> | 2.0E-13 | 3.0E-13 | <b>8.0E-13</b> | 5.0E-13 | 1.0E-13 | 2.0E-14 | 5.0E-14 |
| Harmonic Weighted | 1.0E-12        | 2.0E-13 | 3.0E-13 | 8.0E-13        | 5.0E-13 | 1.0E-13 |         | 5.0E-14 |

Нужно отметить, что из достаточно большого диапазона значений горизонтальной проницаемости только два значения удовлетворяют условиям существования и функционирования гейзеров в естественном состоянии термодинамической системы и в состоянии, нарушенном оползнем. Но и с этими значениями моделирование не показало снижение концентрации Cl в воде гейзеров Великана и Большого.

### 3. Данные по гидродинамическому и гидрохимическому режимам гейзеров Великана и Большого за период с 1941 по 2016 гг.

Фактические данные по гидрохимическому режиму до оползня 03.06.2007 г. Существуют данные Сугробова В.М. по концентрации хлора в воде гейзеров Большой и Великан за период наблюдений с 1971 по 1990 гг. (рис. 1а, б), где отчетливо видна тенденция к снижению хлора для обоих гейзеров. Далее, во временном интервале примерно 17 лет, в связи с труднодоступностью Долины гейзеров, наблюдения отсутствуют. Есть моментные данные Батаевой О.Б. на дату 27.11.2003 г. Регулярные наблюдения за гидрохимическим режимом возобновились только после катастрофического оползня 03.06.2007 г. [2].

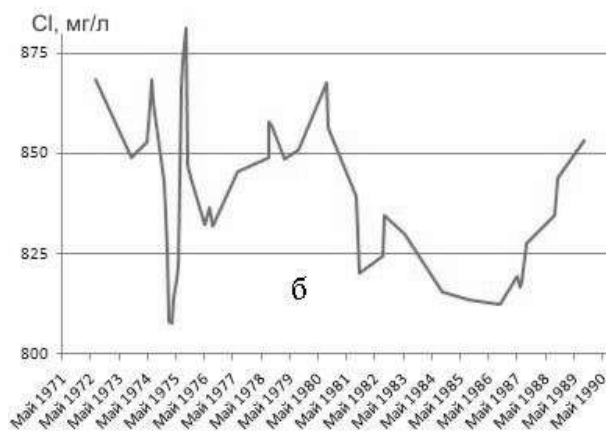
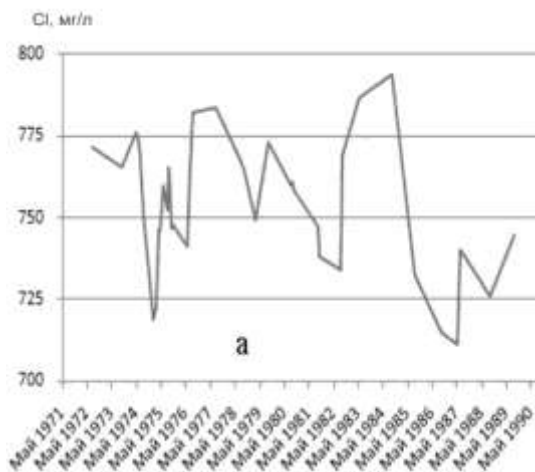


Рис. 1. Изменение концентрации Cl-иона в воде гейзеров Большого (а) и Великана(б) за период времени с 1971 по 1990 гг. по данным В.М. Сугробова

Фактические данные по гидродинамическому режиму до оползня 03.06.2007 г. По обобщенным данным Сугробова В.М. (за период с 1941 по 1993 гг.) средняя продолжительность цикла извержений гейзера Великан была 320 мин, а у гейзера Большого средний период извержений был равен 100 мин [2].

По данным В.А. Дрознина (за период с августа 1993 г. по октябрь 2003 г.) среднее значение периода извержений гейзера Великана составляло 379 мин, а гейзера Большого - 107.7 мин [1].

Т.о. в течение временного интервала 1941-2003 гг. период извержений гейзеров Великана и Большого постепенно увеличивался (на 6.25 % и 7.7 % соответственно).

Для выяснения причины уменьшения концентрации хлора в воде гейзеров Великана и Большого до появления Подпрудного озера, мы воспользовались двумя методами исследования: 1) TOUGH2-EOS1+tracer моделированием инъекции Cl в гидротермальный резервуар, убывающей на 2% в течение каждых 5 лет; 2) статистическим методом выявления основной тенденции (тренда) в рядах динамики.

**4. TOUGH2-EOS1+tracer моделирование инъекции Cl в гидротермальный резервуар.** За основу была взята прежняя модель на стадии установившегося естественного состояния гидротермальной системы. Последовательно меняя некоторые параметры модели (время моделирования, тип горизонтальной проницаемости между элементами модели, метод интерполяции граничных условий, тип инъекции Cl в гидротермальный резервуар), но каждый раз задавая снижение поступления хлора на 2 % в течение каждых 5 лет, был найден вариант, отражающий модельное снижение концентрации Cl с течением времени. В этом варианте моделирования методом интерполяции граничных условий задана линейная функция, а тип инъекции Cl в гидротермальный резервуар задан как Table Flux (переменное значение).

**5. Статистический метод выявления тренда (закономерности) в рядах динамики.** Данные В.М. Сугрובה и А.В. Кирюхина мы стали рассматривать как ряды динамики, отображающие развитие изучаемого явления во времени (в данном случае процесса снижения концентрации Cl-иона). Статистические методы позволяют определить в рядах динамики общую тенденцию (закономерность) развития процесса. Для обработки уровней ряда динамики использован *метод скользящих средних*. Построены графики и определены показатели изменения тренда (коэффициенты детерминации) (рис. 2).

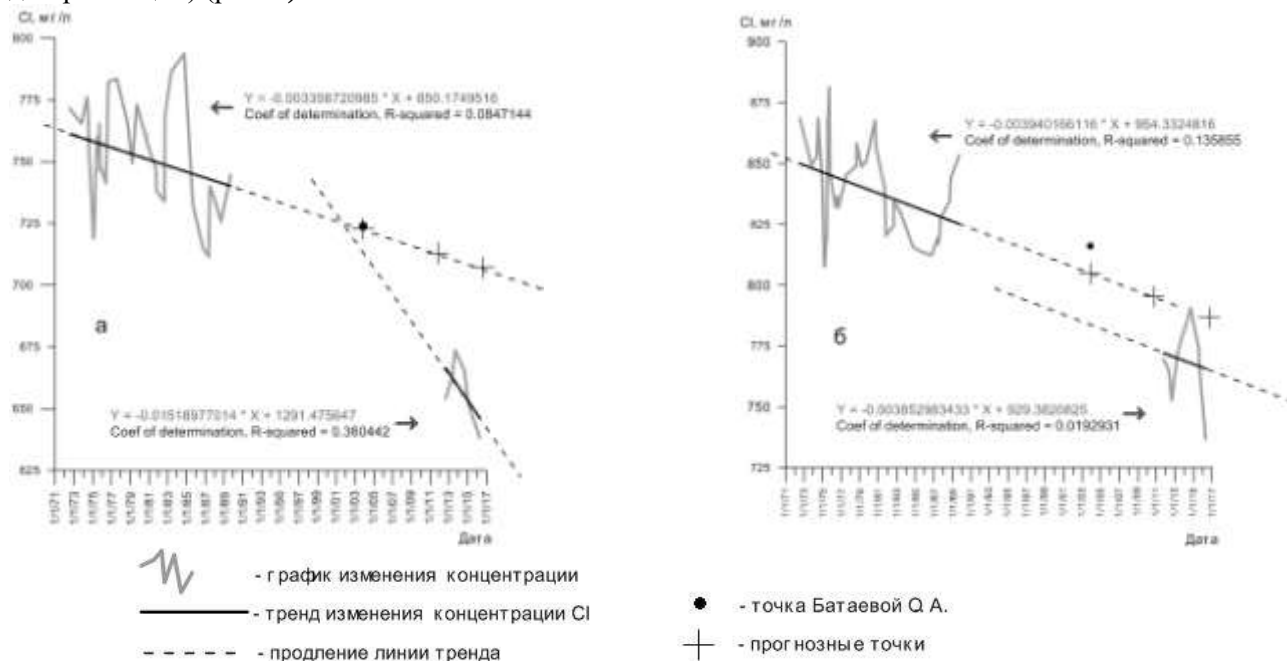


Рис. 2. Графики изменения концентрации хлора в воде гейзеров Большой (а) и Великан (б) по фактическим данным Сугрובה В.М. (период времени с 1971 по 1990 гг.) и Кирюхина А.В. (период времени с 2010 по 2016 гг.).

Выбрав *прямую линию тренда*, мы получили небольшие коэффициенты детерминации, они были равны 0.136 для Великана и 0.085 для Большого (по данным В.М. Сугрובה). А также 0.019 для Великана и 0.36 для Большого (по данным А.В. Кирюхина).

Но, учитывая то, что, как и любая другая регрессия, тренд может быть как линейным (степень влияющего фактора времени равна 1), так и нелинейным (степень больше или меньше единицы), мы принимаем эти коэффициенты. Итак, тренд – это закономерность, описывающая подъем или падение показателя в динамике. В таких случаях мы говорим, что ряд динамики имеет тенденцию (к росту или падению соответственно).

На рисунках 2а и 2б очевидна тенденция к снижению концентрации Cl в воде гейзеров Большой и Великан задолго до катастрофического оползня, произошедшего в Долине Гейзеров в июне 2007 г. и послужившего образованию Подпрудного озера.

Линии тренда позволяют наглядно показать тенденции изменения данных и помогают анализировать задачи прогноза. Используя эти возможности, были рассчитаны прогнозные значения концентрации хлора в воде гейзеров Большой и Великан на те моменты времени, которые находятся за пределами фактических данных по Сугробову В. М.. Но эти моменты времени совпадают с датами фактического отбора проб Кирюхиным А.В. Далее, с помощью регрессионного анализа была продолжена линия тренда на диаграмме (рис. 2а, 2б).

На диаграмме **а** на продолжение линии тренда удачно легли расчетные значения на 2003 г. и фактические данные Батаевой О.Б. (ноябрь 2003 г.); расчетные значения на 2011 и 2016 гг.

На диаграмме **б** фактические данные Батаевой О.Б. (ноябрь 2003 г.) не совпадают с прогнозным значением на 2003 г. (возможно, это артефакт), но расчетные значения на 2010 и 2016 гг. также попали на продолжение линии тренда

## **6. Обсуждение полученных результатов**

Анализ результатов моделирования инъекции хлора позволил убедиться в том, что причина снижения его концентрации, вероятнее всего, не в инъекции воды из озера в резервуар (разбавлении), а в уменьшении поступления глубинной составляющей в каналы гейзеров Большого и Великана.

Анализируя результаты статистического метода выявления закономерности по изменению концентрации Cl для гейзера Великан (рис. 2 б) очевидно, что две линии тренда (для графика в естественных условиях гидротермальной системы и графика в нарушенных условиях) практически параллельны друг другу. Значит, процесс снижения концентрации хлора до оползня и после него происходил с одинаковой скоростью. А ступенька между двумя линиями тренда – это и есть момент и результат катастрофического оползня. Что касается гейзера Большого (рис. 2а), то графики показывают, что здесь снижение концентрации хлора до катастрофы происходило примерно с такой же скоростью, как и в воде Великана (поскольку линии аппроксимации для обоих графиков тоже практически параллельны). Но после появления озера и начала систематического залива метеорной воды в канал, скорость снижения концентрации хлора в воде гейзера Большого стала, вероятно, больше.

Итак, мы располагаем фактическими данными постепенного увеличения периода извержений гейзеров и одновременно постепенного снижения концентрации Cl до природной катастрофы.

Также мы знаем, что длительность интервала между извержениями обеспечивает циклический приток газовой фазы CO<sub>2</sub>, которая играет ключевую роль в механизме извержения гейзера Великан, [7]. И если мы допускаем, что увеличивающийся со временем (до 2007 г.) период извержений гейзеров Большого и Великана обратно пропорционален циклическому притоку CO<sub>2</sub> с каким-либо расходом, то можем предположить, что период между извержениями гейзеров постепенно увеличивался за счет того, что уменьшался приток CO<sub>2</sub>.

Компоненты CO<sub>2</sub> и Cl являются магматическими и уменьшение их поступления в каналы гейзеров возможно объяснить одной из причин:

1) сужением трещин, как следствием землетрясений, или тектонических подвижек; 2) «самозалечиванием» канала и подводящих трещин затвердевшими кремнистыми отложениями; 3) «саморазрушающим» действием самого гейзера, увеличивающего или уменьшающего сечение и изменяющего форму канала; 4) уменьшением проницаемости пород (вмещающих каналы гейзеров) вследствие процессов гидротермального изменения, что является очень важным фактором контроля гидрогеологического режима; 5) изменением (во времени) траектории движения потоков флюидов к каналам гейзеров; 6) угасанием активности гидротермальной системы в целом, но этот фактор мы исключаем, поскольку допускаем предполагаемое недавнее внедрение магматической интрузии под Верхне - Гейзерным полем, и, кроме того, результаты TOUGH2-EOS1+tracer моделирования показали, что остывание резервуара не происходит; 7) попаданием холодной грунтовой и поверхностной воды в систему гейзера вследствие эксплуатации, чего в данном случае тоже нет.

По каким же причинам, если не в результате катастрофических процессов, происходят изменения в гидрогеохимическом режиме самых больших гейзеров в Долине? Мы считаем, что это эволюционные изменения.

Понятие эволюции в философии означает не только процесс развития, но также и процесс постепенного ухудшения состояния объекта с течением времени, движение назад, упадок, разрушение материи вследствие внешнего воздействия по законам природы и времени. Это процессы и прогресса, и необратимого изменения, протекающие в живой и неживой природе. Эволюция – это один из законов мироздания. И гейзеры, как часть природы, подчиняются этому закону.

В.М. Сугробов и Н.Г. Сугробова [4] в научно-популярном очерке "Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров" отмечают, что гейзеры могут возникнуть на любом этапе становления гидротермальной системы. По мнению В.В. Аверьева гейзер Великан, или его предшественник могли возникнуть приблизительно 1 000 лет тому назад. Самый первый известный в мире гейзер (Geysir) в Исландии действует уже около 700 лет. Знаменитые гейзеры Йеллоустона в США существуют не менее 150 лет, а гейзеры в Новой Зеландии, по легендам коренных жителей маори, существуют не меньше 400 лет. И там же, в Новой Зеландии был гейзер Ваймангу, который действовал всего 4 года.

Определить время преобразования или исчезновения конкретных гейзеров невозможно. Гейзеры, как тип разгрузки гидротермальной системы, могут функционировать в течение первых сотен лет и, предположительно, на протяжении 2–3 тысячелетий. Но индивидуальные гейзеры рождаются и живут в значительно меньшем временном интервале (в пределах сотен и десятков лет), поскольку внешние условия, влияющие на работу гейзеров, изменяются в более короткий период времени, по сравнению с основными показателями гидротермальной деятельности в целом.

По мнению В.М. Сугробова [4], в ряду крупных гейзеров Долины гейзеров, вероятность исчезновения которых велика, одним из первых стоит гейзер Великан. Только В.М. Сугробов связывал исчезновение Великана с тем, что вышеуказанный гейзер практически достиг баланса между привносимой из недр системы энергией и ее потерей в результате извержения, испарения воды и теплоотдачи через стенки канала.

Нынешний анализ изменений гидрогеохимического режима гейзеров обещает Великану ту же участь, но ее причину сегодня мы называем эволюцией, что предполагает рождение гейзеров, их яркую жизнь и, как это ни печально, исчезновение.

## 7. Заключение

1. Причина снижения концентрации хлора не в инъекции метеорной воды в резервуар, а в уменьшающейся со временем величине поступления глубинной составляющей в каналы гейзеров Большого и Великана.
2. Увеличение периода извержений гейзеров Большого и Великан до оползня, а также (начиная с 1971 г. и продолжающееся до сегодняшнего дня) постепенное снижение концентрации хлора в них, возможны в результате эволюционного процесса.
3. В результате катастрофических событий в Долине гейзеров в 2007 г. увеличение периода сменилось уменьшением (за счет гидродинамического подпора озера), а процесс снижения хлора вероятно ускорился.

## Список литературы

1. Дроздин В.А. 2007. <http://www.ch0103.emsd.ru/>
2. 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.
3. Рычкова Т.В. Моделирование влияния инъекции холодной воды на гидротермальный резервуар на примере гидротермальной системы Долины Гейзеров // Сборник материалов XX ежегодной научной конференции, посвященной Дню Вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 200-203.
4. Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дроздин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров // Научн.-поп. очерк – путеводитель. П-Камчатский: Камчатпресс, 2009. С. 120-133.
5. Finsterle, S. iTOUGH2 User's Guide // Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-40040. Berkeley. CA. USA. 1999. 130 p.
6. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky nature reserve, Kamchatka) and triggers of the giant landslide // Applied Geochemistry. 2012. T. 27. № 9. P. 1753-1766.
7. 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.
8. 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.