

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ (КРОНОЦКИЙ ЗАПОВЕДНИК, КАМЧАТКА) ПОСЛЕ КАТАСТРОФЫ 3.06.2007

Кирюхин А.В.¹, Рычкова Т.В.¹, Дубинина Е.О.²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, avkiyukhin2@mail.ru

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва

Введение

С 2007 г. в Долине Гейзеров осуществляется непрерывный мониторинг гидрогеологического режима на гейзерах Великан, Большой, на Подпрудном Озере, а также дискретное опробование одиннадцати основных режимных гейзеров и источников с целью выявления динамики изменений после катастрофического оползня 3.06.2007.

В долине Гейзеров обнаружено не менее 57 гейзеров (Сугробов В.М.), на 13-ти из которых проводились систематические наблюдения за циклом.

Учитывая значительную образовательную ценность Долины Гейзеров, важно выявить механизм формирования и параметры гидротермальной системы, контролирующие гидротермальные взрывы и оползни, осуществлять мониторинг этих параметров с целью прогнозирования возможных природных катастрофических явлений и оценки влияния изменения условий разгрузки/питания на режим гейзеров, оставшихся после катастрофического оползня 3 июня 2007 г.

Гидротермальная система Долины Гейзеров сформирована в пределах двух термовыводящих линейных зон (разломов), расположенных над предполагаемым частично расплавленным магматическим телом и получает водное питание метеорными водами вдоль выходов риолит-дацитовых экструзий (ξQ_3^4), в частности через экструзию Гейзерную. Термогидродинамическое моделирование TOUGH2-EOS3 показывает, что высокотемпературный флюид поступает по двум зонам на Нижне-Гейзерном и Верхне-Гейзерном полях, а также подтверждает формирование двухфазного резервуара под наклонно залегающим водоупором.

В данной работе приводятся и обсуждаются последние результаты мониторинга гидрогеологического режима в 2007-2012 гг. на гейзерах Великан, Большой, Подпрудном Озере и девяти основных режимных гейзерах и источниках.

Режим гейзеров, Подпрудного Озера и динамики разгрузки гидротерм в 2007-2012 гг.

1. Методика проведения мониторинга. Для регистрации периодичности извержений гейзеров Великан и Большой с июля 2007 г. были использованы температурные логгеры НОВО U12-015.

Для регистрации уровня Подпрудного Озера использована пара логгеров НОВО U20-001-04.

Величина скрытой разгрузки гидротерм оценивается хлоридным методом на наблюдательном створе «Плотина» с использованием логгера НОВО U24-001 (диапазон 0- 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) для непрерывной записи электропроводности раствора.

Самую высокую и стабильную величину разгрузки на Нижне-Гейзерном участке имеет кипящий источник Аверий (около 12 кг/с). Великан - самый мощный гейзер в Долине Гейзеров, поэтому они были выбраны для осуществления мониторинга газогидрохимического режима гидротермального резервуара в первую очередь. Кроме того, в этот список включены крупные горячие и кипящие источники и гейзеры на различных участках гидротермальной системы: Первенец, Большой, Трубы, Верхний, Хлоридный, N16 и N17 – кипящие источники, обнаруженные после оползня 3.06.2007, 56 – Кислый Котел, М – Младенец (Крепость), N37 – кипящий источник на урзе озера, возникший после оползня приблизительно на месте Артефакта (2011 г.) и переместившийся в 2012 г. на позицию Скалистого. По всем указанным источникам осуществляется газогидрохимическое опробование и отбор проб на анализ изотопного состава воды с целью диагностики и анализа состояния гидротермального резервуара.

2. Режим извержений гейзеров Большой и Великан, изменения уровня в Подпрудном Озере (2007-2012 гг.). Режим работы гейзера Большой чувствителен к положению уровня озера Подпрудное. Гейзер Большой прекращает извержения тогда, когда относительный уровень озера превышает 25-30 см, так как холодная вода заливается из озера в канал гейзера. Когда уровень озера падает ниже 25-30 см, гейзер Большой вновь начинает извергаться со средним периодом от 45 до 85

мин. Средний период извержений гейзера Большой в течение данного времени наблюдений составил – 64 мин.

В период с 3 июня 2007 г. по август 2012 г. средний период извержений гейзера Великан составил – 341 мин.

До катастрофического оползня период составлял 339 мин. Цикличность работы гейзера Великан зависит также от количества атмосферных осадков, попадающих в ванну гейзера.

В процессе разрушения плотины рекой Гейзерной происходит систематическое понижение уровня воды в Подпрудном Озере (130 см в течение 4 лет, или около 33 см в год), на это понижение накладываются сезонные изменения уровня озера.

Анализ взаимосвязи периодичности извержений гейзера Великан с атмосферным давлением показывает, что такая связь отсутствует.

Диаграмма взаимосвязи периодичности извержений гейзера Великан с изменением уровня в Подпрудном Озере выглядит более сложным образом. Здесь отчетливо видно, что аномальные увеличения периода извержений гейзера Великан имеют выраженный сезонный характер.

3. Динамика изменения естественной разгрузки и тепловой мощности гидротерм.

Разгрузка глубинной термальной компоненты в Йеллоустонской гидротермальной системе (США) оценивается в 3000 кг/с, и варьирует на 25-50% в пределах гидрологического года. Разгрузка также зависит от сейсмичности, которая определяет степень проникновения метеорных вод в основную магматическую камеру.

Для оценки разгрузки термальной глубинной компоненты (Q_d , кг/с) гидротермальной системы Долины Гейзеров использовался хлоридный метод. Разгрузка измеряется непосредственно на выходе (Плотина) и входе (Щель) в озеро Подпрудное.

Средняя величина зафиксированной хлоридным методом термальной разгрузки на створе «Плотина» составляет 219 кг/с. Разгрузка термальной глубинной компоненты может быть выражена в терминах тепловой мощности гидротермальной системы W (МВт), представляющей собой произведение Q_d и энтальпии глубинного теплоносителя. Энтальпия глубинного теплоносителя принимается 900 кДж/кг по данным геотермометрии. Среднее значение тепловой мощности гидротермальной системы оценивается в 197 МВт.

4. Мониторинг газогидрохимических параметров разгрузки теплоносителя. Разгрузка гейзеров и горячих источников в Долине Гейзеров представлена субщелочными низкоминерализованными хлоридно-натриевыми водами.

Сравнение результатов гидрохимического опробования режимных гейзеров и источников в 2010 г. с результатами 2011-2012 гг. показывает (в целом) стабилизацию содержания хлор-иона (на уровне несколько ниже 2007 г.) и сульфат-иона (на уровне несколько выше 2007 г.). Кроме того, в 2012 г. фиксируется повышение глубинных температур на Верхне-Гейзерном поле по данным SiO_2 геотермометра (максимальное значение 233°C) и по данным Na-K геотермометра (192°C).

Пробы на растворенный газ отбирались погружением пробоотборных трубок в грифоны источников или ванны гейзеров. Результаты газогидрохимических данных после оползня 3.06.2007 г. показывают признаки разбавления по основным компонентам глубинного теплоносителя (уменьшение содержания Cl-иона на 6%) при некотором увеличении компонент, связанных с притоком охлажденных метеорных вод обогащенных атмосферным воздухом (увеличение содержания SO_4 -иона на 87%, Ca, N_2 , O_2), что, вероятно, связано с инъекцией в гидротермальную систему воды из Подпрудного Озера.

5. Мониторинг изотопного состава (δD , $\delta^{18}O$) гидротермального флюида. Опробование кипящих источников в Долине Гейзеров для определения изотопного состава воды выполнялось нами в 1985 и 2010 годах.

Сходимость точек опробования термальных источников (δD , $\delta^{18}O$) с линией изотопного фракционирования метеорных вод свидетельствует об их преимущественно метеорном происхождении, диапазон изменения δD от 92 до 102 ‰ (данные 1985 г.) и от 98 до 106 ‰ (данные 2010 г.). Это говорит о том, что область водного питания горячих источников находится на +500 - +900 м. абс. (по данным 1985 г.) и от +700 до +1200 м. абс. (по данным 2010 г.). Наиболее благоприятные зоны для водного питания совпадают с областями распространения риолитовых экструзий с проницаемыми питающими каналами (ξQ_3^4) и с границей кальдеры, особенно в пределах прогретых участков, допускающих всесезонную инфильтрацию.

Положительный сдвиг по $\delta^{18}O$ (1 - 2‰) для группы кипящих источников и гейзеров объясняется приуроченностью к зонам восходящих потоков высокотемпературного глубинного теплоносителя. Большие сдвиги по $\delta^{18}O$ сопровождаются более высокой концентрацией хлорида.

Разделение горячих источников по изотопному сдвигу $\delta^{18}\text{O}$ на две подгруппы: Нижне-Гейзерного поля и Верхне-Гейзерного поля свидетельствует о существовании двух восходящих потоков глубинного теплоносителя. Конденсатные источники 59 и 56 (с низким содержанием хлора) ложатся на линию метеорных вод и по составу близки к метеорным водам, прогретым паром.

Прогнозное TOUGH2-EOS3 моделирование влияния Подпрудного Озера на режим гейзера Великан

Для осуществления прогноза влияния инъекции холодной воды из Подпрудного Озера (сформировавшегося после катастрофического оползня 3 июня 2007 г.) на гидрогеологический режим гейзера Великан используется TOUGH2-EOS3 моделирование. На численной термогидродинамической модели была определена внутренняя область, совпадающая с контурами Подпрудного Озера с граничным условием Дирихле (соответствующим уровню воды в озере + 423 м). Расчеты по прогнозному моделированию выполнялись при условии, что в течение прогнозного времени не произойдет новых катастрофических явлений.

Учитывая что инъекция холодной воды из Подпрудного Озера имеет некоторый положительный эффект на активность Великана, по результатам моделирования его средний расход должен возрасти на 10.3%, а период извержений соответственно должен уменьшиться на 9.4%.

Взаимосвязь режима гейзеров с сейсмическими событиями и гидрологическим циклом

Реакция гейзеров на изменения сезонного гидрологического цикла связана с зависимостью периодичности их извержений от уровня подземных вод в питающем гидрогеологическом резервуаре (давления в питающем гидротермальном резервуаре) и степени охлаждения канала извержения. Данные по известным гейзерам в Верхнем Бассейне Гейзеров (Йеллоустонский национальный парк, США) за период с 1997 по 2006 гг. (Daisy, Castle, Aurum, Depression, OldFaithful) показывают обратную корреляцию периода извержения гейзеров с расходом реки Madison. Коэффициенты корреляции оцениваются от -0.65 до -0.98 (OldFaithful).

По мнению американского ученого Hurwitz S. на увеличение периодов извержений влияет инфильтрация холодной воды в каналы гейзеров, образование ледяных корок и отложений криогенного кремнезема на поверхности, длительный засушливый период.

Сейсмичность также является фактором, влияющим на период извержения гейзеров. Доказательством этому явились изменения, произошедшие в Йеллоустонской гидротермальной системе через час после разрушительного землетрясения Денали 3 ноября 2002 г. на Аляске ($M=7.9$).

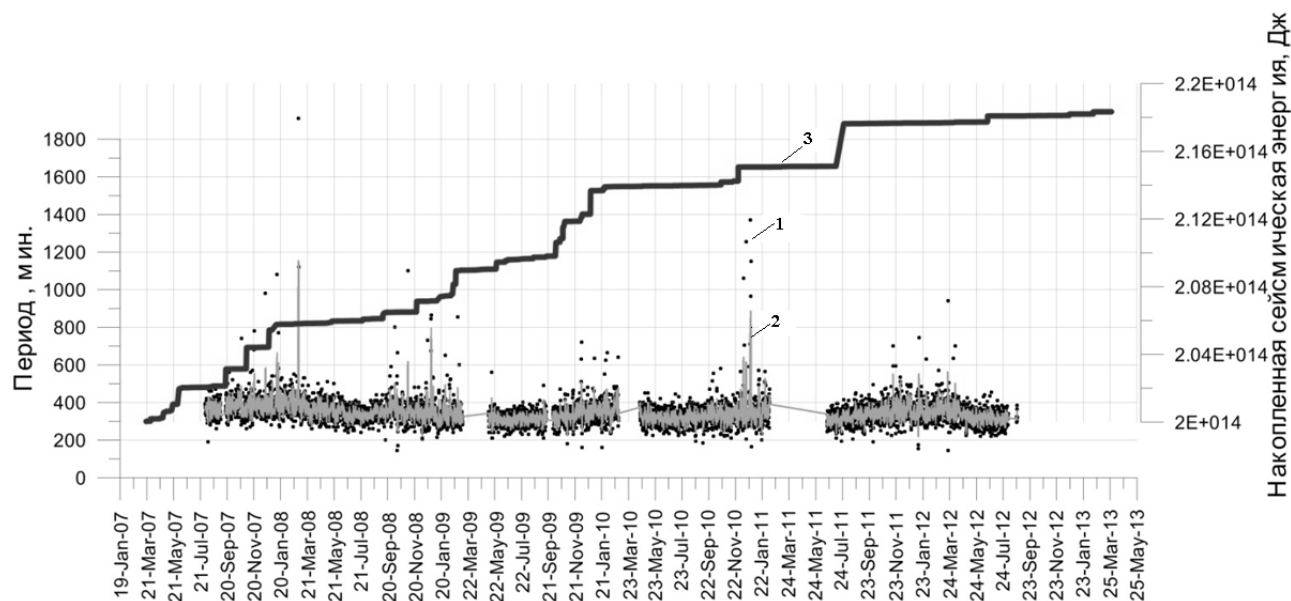


Рис.1. Период извержений гейзера Великан и региональная сейсмичность (радиус 200 км, глубина до 40 км). 1 – период извержения гейзера Великан (мин); 2 – график сейсмических событий по датам (Дж); 3 – накопленная сейсмическая энергия (Дж).

Кроме того, в процессе исследований гейзеров Йеллоустонского национального парка выяснилось, что между некоторыми гейзерами даже на большом расстоянии существует гидравлическая связь. Это указывает на то, что резервуары, питающие гейзеры, включают высокопроницаемые горизонтальные каналы.

Сопоставление кумулятивного графика сейсмической энергии (по региональному и глобальному каталогам) с динамикой изменения периода извержений гейзера Великан (Долина Гейзеров, Камчатка) пока не позволило обнаружить однозначной синхронизации этих изменений с сейсмическими событиями. Можно лишь отметить, что одно из сильных региональных землетрясений (27 ноября 2010 г, $M=5.2$), происшедшее в 40 км к ССВ от Долины Гейзеров, могло инициировать замедление периодичности Великана. Из трех сильных ($M>7$) землетрясений в радиусе 3500 км – одно синхронизировано с замедлением периодичности Великана в тот же период времени (Рис.1).

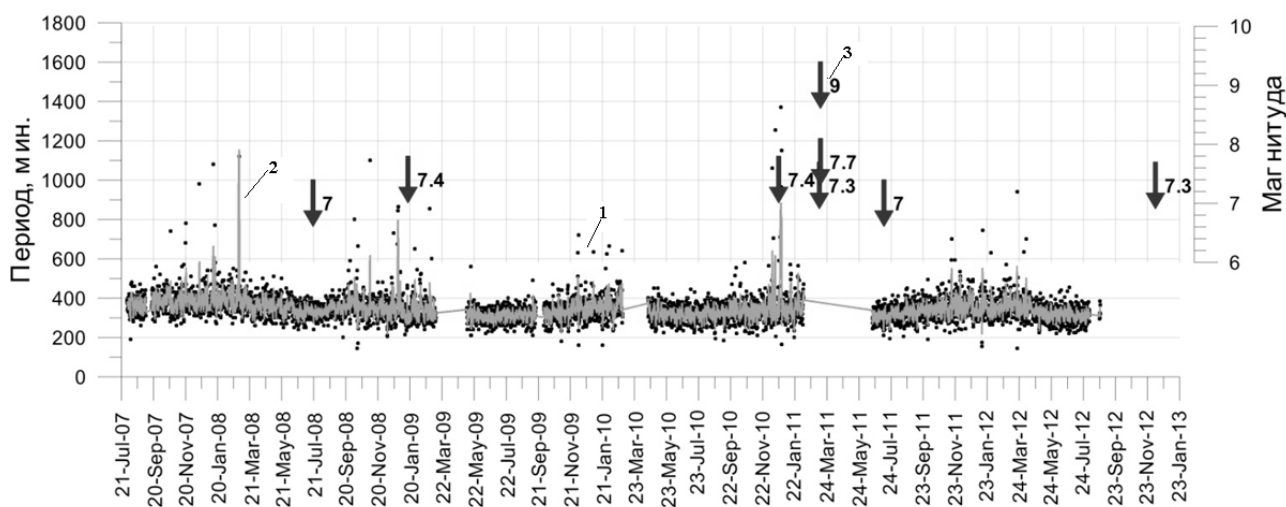


Рис.2. Период извержений гейзера Великан и глобальная сейсмичность (радиус 3500 км, глубина до 40 км, $M \geq 7$). 1- период извержения гейзера Великан (мин); 2 – график сейсмических событий по датам (Дж); 3 – значение магнитуды.

Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что зарегулированность и инерционность Великана позволяют рассматривать его как потенциальный предвестник катастрофических событий.

Список литературы

1. Дроздин В.А., 2007, <http://www.ch0103.emsd.iks.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. Кононов В.И. Геохимия термальных вод в областях современного вулканизма. Москва, Наука. 1983. 212 с.
4. Леонов А. В. Каталог основных объектов в Долине гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) 2011 г 208 стр. Версия 08.10.2011.
5. В.М.Степаненко. Отчет о выполнении программы научно-исследовательских работ по теме «Комплексные метеорологические исследования в Кроноцком заповеднике» за 2012 гг., М. МГУ, 2012, 42 с.
6. Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дроздин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л. Долина Гейзеров - жемчужина Камчатки. // Научный путеводитель. Камчатпресс, Петропавловск–Камчатский, 2009, 108 с.
7. Устинова Т.И. Гейзеры Камчатки. Москва. Географиз, 1955.
8. A. Belousov, M. Belousova, and A. Nechayev Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism // GEOLOGY, March 2013; v. 41; no. 3; p. 1–4 doi:10.1130/G33366.1
9. Fournier, R.O., 1981. Application of water chemistry to geothermal exploration and reservoir engineering. // In: Geothermal Systems. Principle and Case Histories, Edited by Rybach, L. and Muffler, L.J.P.), P. 109-143.
10. Fournier, R., 1989. Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park Hydrothermal System. // Ann. Rev. Earth Planet Sci. 17 p.13-53.
11. Hutchinson R. A., Westphal J. A., Kieffer S. W. In situ observations of Old Faithful Geyser // Geology, October 1997 P. 875-878.

12. Hurwitz S., Kumar A., Taylor R., Heasler H. Climate-induced variations of geyser periodicity in Yellowstone National Park, USA // *Geology*, June 2008, P. 451-454.
13. Hurwitz S., Hunt A.G., Evans W.C. Temporal variations of geyser water chemistry in the Upper Geyser Basin, Yellowstone National Park, USA // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, Q12005, doi:10.1029/2012GC004388
14. Husen S., Taylor R., Smith R.B., Heasler H. Changes in geyser eruption behavior and remotely triggered seismicity in Yellowstone National Park produced by the 2002 M 7.9 Denali fault earthquake, Alaska // *Geology*; June 2004, P. 537–540.
15. Ingebritsen S.E., Rojstaczer S.A. Geyser periodicity and the response of geysers to deformation // *Journal of geophysical research*, vol. 101, No. B10, October 10, 1996 P. 891-905.
16. Kiryukhin A.V. INVERSE MODELING OF THE NATURAL STATE OF THE GEYSERS VALLEY HYDROTHERMAL SYSTEM (KRONOTSKY NATURE RESERVE, KAMCHATKA) PRECEDING OF THE GIANT LANDSLIDE // V53A-2585 AGU Abstract , 4-9 Dec. 2011, San Francisco, USA
17. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K. Hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide // *Applied Geochemistry Journal*, 2012, №27, 1753–1766.
18. Pruess, K., Oldenburg C., and Moridis, G., 1999. TOUGH2 user's guide, Version 2.0. // Rep. LBNL-43134, Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, California. 198 p.
19. Rojstaczer S., Galloway D. L., Ingebritsen S. E., Rubin D. M. Variability in geyser eruptive timing and its causes: Yellowstone National Park // *Geophysical research letters*, Vol. 30, 2003, P.1-4.