

## АНАЛИЗ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ (КАМЧАТКА) ПОСЛЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ОБВАЛА-ОПОЛЗНЯ 3 ИЮНЯ 2007 Г

А.В. Кирюхин, Т.В. Рычкова, В.А. Дрознин, Е.В. Черных

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: avk2@kscnet.ru

Исследования высокотемпературных гидротермальных систем являются уникальной возможностью для проверки и развития теоретических основ термофлюидогеодинимики на примере объектов, находящихся в экстремальных гидрогеологических условиях.

### **Концептуальная гидрогеологическая модель условий, предшествующих катастрофическому обвалу 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров.**

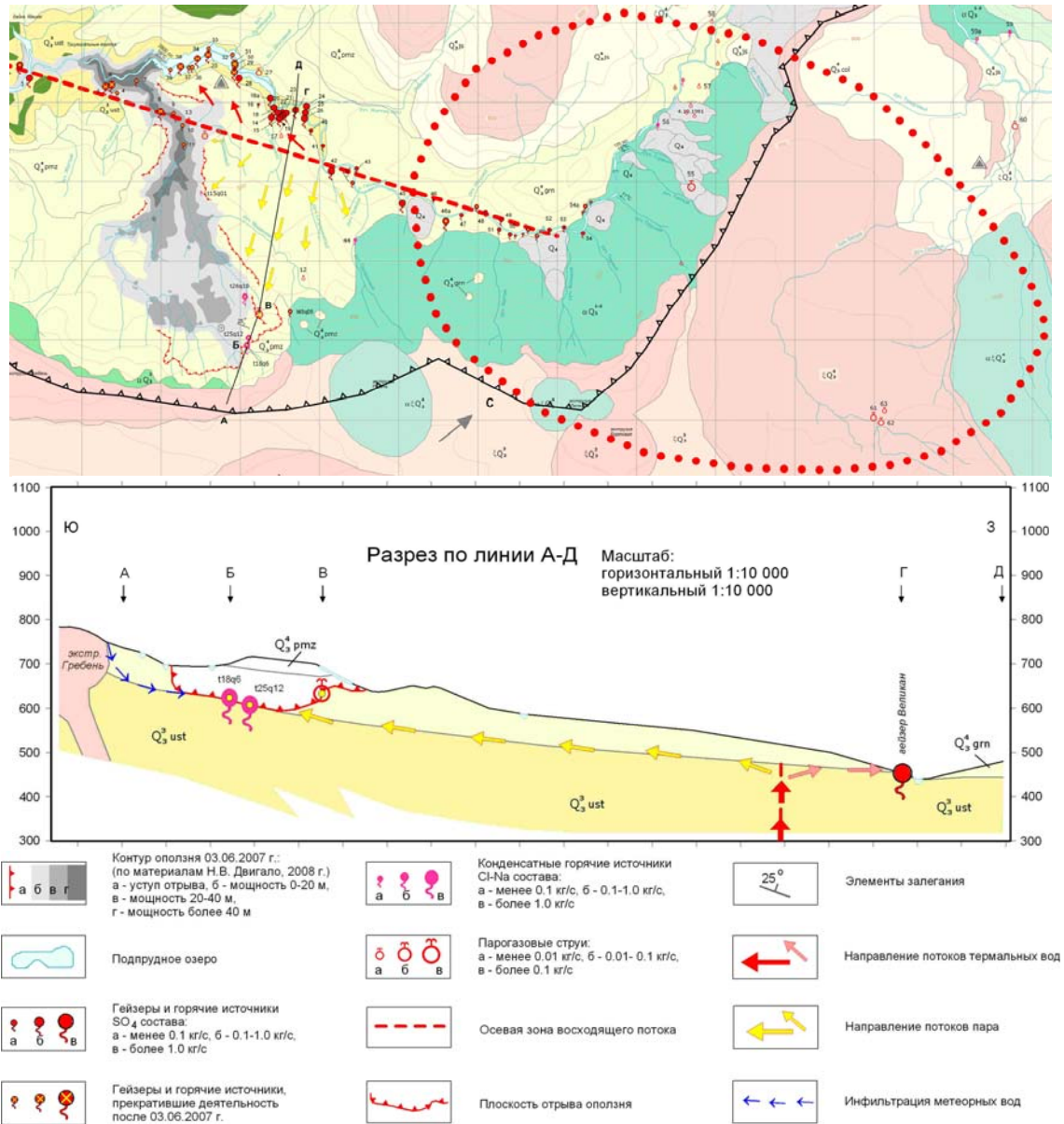
Обвал 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров на Камчатке не явился неожиданным для региона, в котором постоянно извергаются 2-3 вулкана и ежегодно происходит 1-2 землетрясения с магнитудой более 6.0. Однако неожиданным явилось то место в Долине Гейзеров, в котором этот оползень произошел - бассейн ручья Водопадного, не характеризующийся такими крутыми склонами и такой интенсивной гидротермальной деятельностью, как река Гейзерная в ее среднем и нижнем течении. Поэтому ключевым является вопрос почему 3 июня 2007 г. обвал, сопровождаемый мощным выбросом пара в зоне отрыва (Шпиленок, личн. сообщ., 2007) преобразовался в обломочно-грязевой поток и за 2 минуты переместил около 20 млн. м<sup>3</sup> горных пород [Двигало, 2007].

В [Голева, 1993; Сугробов и др., 2004] изложена гидрогеологическая модель гидротермальной системы Долины Гейзеров. Оползневые процессы 3-06-07 имели место на кровле гидротермального резервуара, сложенной преимущественно Гейзерной пачкой ( $Q_3^4$  grn) озерно-кальдерных отложений (пемзовые туфы, туфогравелиты, туфопесчаники, линзы брекчий), выполняющих роль верхнего относительного водоупора и характеризующихся углом падения на северо-запад 8-25° (рис. 1) Восходящий поток глубинного теплоносителя на контакте подошвы Гейзерной пачки и кровли Устьевого пачки разделяется на водную фазу, движущуюся по падению контактовой зоны в западном направлении, и паровую фазу, движущуюся по восстанию контактовой зоны в юго-восточном направлении. Западный преимущественно водный поток фиксируется разгрузкой гейзеров и горячих источников № 7, 16 – 41 хлоридного натриевого состава (с 3 июня 2007 г. часть этого расхода поступает в Подпрудное озеро). Юго-восточный поток пара движется по восстанию контакта подошвы Гейзерной пачки и кровли Устьевого пачки в направлении северо-восточного борта оползня 3-06-07 и фумарол № 12 и 44. Изложенная выше схема циркуляции потоков подтверждается также следующими наблюдениями. Подошва верхнего относительного водоупора (Гейзерная пачка) вскрыта цирком отрыва оползня 3-06-07, а в месте вскрытия в 2007 г. образовались фумарольное поле и горячие источники с температурой 12-26°C и суммарным расходом около 30 л/с. По химическому составу вода соответствует конденсату пара, смешанному с метеорными водами. Блоки раздробленных пород в верхней части оползня 3-06-07 полностью гидротермально изменены и представлены высококремнистым монтмориллонитом (Вергасова, личн. сообщ. 2008).

Отметим также, что по данным радарной интерферометрии в результате спутниковых наблюдений, в районе кальдеры Узон выявлена обширная положительная деформация с амплитудой до 15 см за период 2000-2003 гг. [Lundgren, 2006], связанная вероятно с наполнением магмой корового магматического очага (рис. 1). Апикальная часть указанной выше зоны деформации с амплитудами 12-15 см находится в среднем и верхнем течении р. Гейзерной. Внутри или в непосредственной близости от этого контура нами в результате полевых исследований в 2007-2008 гг. обнаружено двенадцать крупных горячих и кипящих источников. Кроме того, мощная группа термальных источников образовалась на продолжении осевой зоны восходящего потока на пр. берегу р. Шумной напротив бывшего гейзера Первенец (вероятно на продолжении оперяющей трещины или дайки, примыкающей к магматическому резервуару).

Из вышеизложенного вытекает, что катастрофический обвал 03-06-07 явился очередным этапом общего сценария постепенной паро-гидротермальной переработки

Гейзерной пачки ( $Q_3^4$  grn), слагающей кровлю гидротермального резервуара, с постепенным насыщением ее конденсатом пара и соответствующим снижением устойчивости к обрушению [Кирюхин и др., 2008; Droznin, 2007]. Триггером такого обрушения явилось, вероятно, повышение давления в магматической питающей системе и насыщение влагой Гейзерной пачки во время весеннего паводка. Останцы Гейзерной пачки на западном склоне уступа докальдерного комплекса являются указателями предшествующих обрушений такого типа (рис. 1).

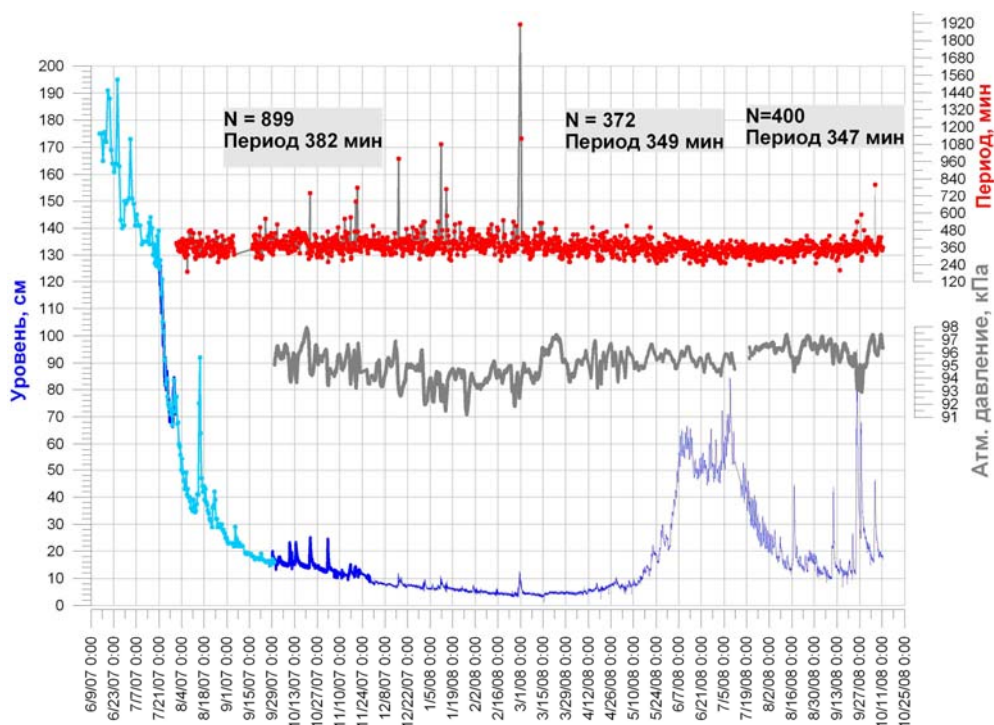


**Рис. 1.** Условия циркуляции теплоносителя в гидротермальном резервуаре (в плане и в разрезе по линии АД) в нижнем и среднем течении р. Гейзерная, Долины Гейзеров. Геологическая основа по В.Л. Леонову. Позиции горячих источников и паровых струй (с номерами) по О.П. Батаевой (личн. сообщ. 2003 г.), новообразованные горячие источники и паровые струи промаркированы желтым кружком или показаны с атрибутом в формате  $t \cdot q^*$  (где  $t$  – температура,  $q$  - расход). Красной пунктирной точечной линией показана предполагаемая апикальная часть магматического очага - источника деформации с амплитудой 12-15 см за период 2000-2003 гг. Сетка карты – 500 м.

### Периодичность извержений гейзеров Великан и Большой после обвала 3 июня 2007. Режим разгрузки гидротермальной системы в реку Гейзерная.

**Режим извержений гейзера Великан.** Гейзер Великан является самым мощным в Долине Гейзеров. Объем ванны Великана составляет  $13.5 \text{ м}^3$  ( $6 \text{ м} \cdot 4.5 \text{ м}^2$ ), объем извергающейся воды оценивается в  $40-60 \text{ м}^3$  [Rinehart, 1980], т.е. средний расход его составляет не менее  $2.4 \text{ кг/с}$ . На рис. 2 приводятся интегрированные результаты наблюдений за

периодичностью извержений гейзера Великан, уровнем Подпрудного озера и барометрическим давлением с августа 2007 г. по апрель 2008 г. Режим извержений Великана наиболее чувствителен к охлаждению за счет попадания атмосферных осадков непосредственно в ванну гейзера (площадь поверхности ванны около 4.5 м<sup>2</sup>), в периоды прохождения тайфунов и пург с обильным выпадением осадков циклическая деятельность Великана замедляется. Максимальная продолжительность периода бездействия Великана составила 32 часа во время пурги 29 февраля 2008 г. Средний период извержений гейзера Великан с августа 2007 г. по апрель 2008 г. составил 382.3 мин (при этом было зарегистрировано 899 извержений). Средний период извержений гейзера Великан с апреля 2008 г. по июль 2008 г. составил 348.6 мин (при этом было зарегистрировано 372 извержения). Для сравнения отметим, что по данным В.А. Дрознина (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru>) среднее значение периода извержений гейзера Великан до обвала 3-06-07 (в августе-октябре 2003 г.) составляло 339.4 мин (207 извержений).



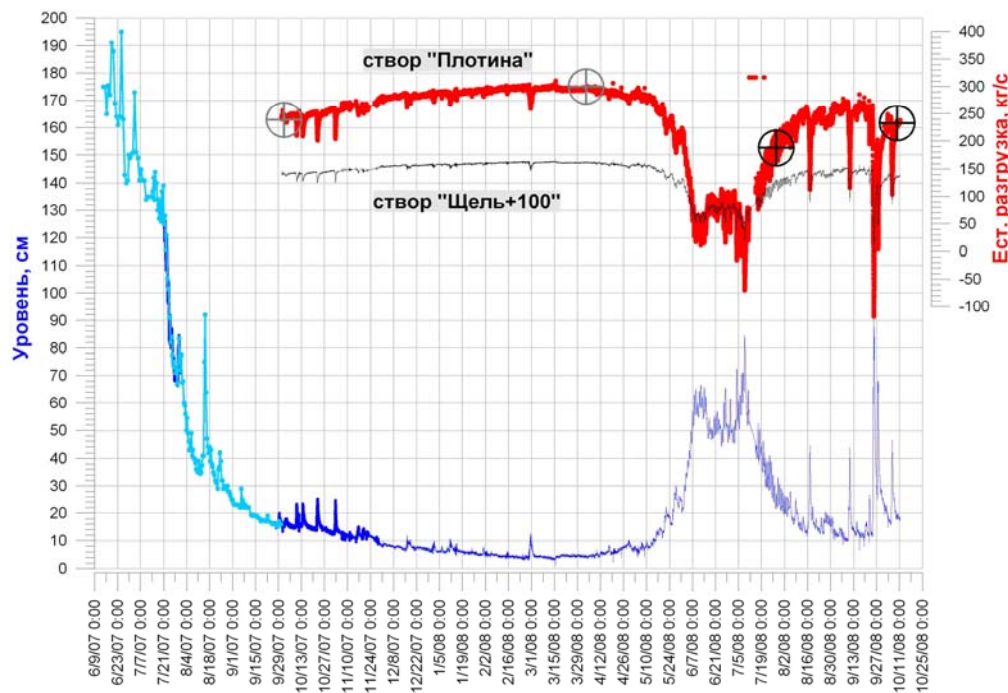
**Рис. 2.** Изменение относительного уровня озера (синяя линия), барометрического давления (серая линия) и периода извержений гейзера Великан (красные кружки) после обвала 3 июня 2007 г.

**Режим извержений гейзера Большой.** После образования Подпрудного озера деятельность гейзера Большой стала в значительной степени определяться уровнем озера. При относительном уровне в озере выше 25 см гейзер Большой практически не извергался (июль 2007 г.), происходил постоянный залив холодной воды из озера в канал гейзера. При снижении относительного уровня озера ниже 25 см, с 1 сентября 2007 г. извержения гейзера Большой возобновились. Средний период извержений гейзера Большой составил в период с сентября по ноябрь 2007 г. - 85 мин (по данным регистрации 943 извержений), с декабря 2007 по март 2008г. – 69 мин. (2315 извержений), в апреле-мае 2008 г. – 64 мин (822 извержения). В июне-августе 2008 г. уровень Подпрудного озера в связи с паводком существенно повысился, вновь начался залив холодной воды в ванну гейзера и Большой прекратил извержения (рис. 4). Для сравнения отметим, что по данным В.А. Дрознина (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru>) до обвала 3-06-2007 и образования Подпрудного озера - среднее значение периода извержений гейзера Большой составляло (август-октябрь 2003 г.) 107.7 мин (697 извержений).

**Режим разгрузки гидротермальной системы в реку Гейзерная.**

Используя аналогичный изложенному в [Сугробов и др., 2004] метод подсчета разгрузки гидротерм, и принимая максимальное содержание Cl в термальных источниках равным 900 мг/л, определена функциональная зависимость между разгрузкой гидротерм (по хлор-иону) и уровнем в озере. В результате этого получена зависимость изменения разгрузки гидротерм (по хлор-иону) от времени (рис. 3), с учетом того, что регистрация уровня осуществляется непрерывно с сентября 2007 г. В годовом гидрологическом цикле суммарная

разгрузка гидротерм (по хлор-иону) на створе «Плотина» (исток из Подпрудного озера) плавно растёт от 243 кг/с (октябрь 2007г.) до максимума 300 кг/с (март 2008 г.), далее, начиная с мая, во время летнего паводка, резко снижается до 30-100 кг/с (июнь 2008 г.), затем опять возрастает до 245-260 кг/с (август-сентябрь 2008г.). Суммарная разгрузка гидротерм (по хлор-иону) на створе «Щель+100 м» (приток р. Гейзерной в Подпрудное озеро) плавно растёт от 140 кг/с (октябрь 2007 г.) до максимума 160 кг/с (март 2008 г.), далее резко снижается во время летнего паводка до 20-80 кг/с (июнь 2008 г.), затем опять возрастает до 130-150 кг/с (август-сентябрь 2008 г.). Между створами «Плотина» и «Щель+100» разгрузка гидротерм составляет в среднем 115-140 кг/с (с августа по начало мая), в период паводков (конец мая-начало июля) падает до 10-20 кг/с.



**Рис. 3.** Изменение относительного уровня озера (синяя линия) и естественной разгрузки гидротерм на створе «Плотина» (красная жирная линия) и на створе «Щель+100м» (черная тонкая линия) (расчет по хлор-иону) после обвала 3 июня 2007 г. Кружки с крестами соответствуют времени проведения гидрометрических измерений (черные – с использованием гидрометрической вертушки, серый – с использованием поплавкового метода)

**Выводы**

1. Катастрофический обвал 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров явился очередным этапом общего сценария постепенной паро-гидротермальной переработки пемзовых туфов Гейзерной пачки ( $Q_3^4$  gm), слагающей кровлю гидротермального резервуара. Одним из вероятных триггеров обрушения явилось внедрение магмы в 2003 г. с эпицентром на Верхне-Гейзерном поле.
2. Средний период извержений гейзера Великан несколько увеличился после обвала 3-06-07 (с 5.8 до 6.4 часа). Периодичность гейзера наиболее чувствительна к охлаждению за счет попадания атмосферных осадков непосредственно в ванну гейзера.
3. Суммарная разгрузка гидротерм (по хлор-иону) в Долине Гейзеров по данным наблюдений на створе «Плотина» не является постоянной и характеризуется сезонными вариациями с максимумом до 300 кг/с (март 2008 г.) и минимумом во время летнего паводка до 30-100 кг/с (июнь 2008 г.).

Авторы выражают признательность В.А. Злотникову, В.Л. Леонову, Ю.А. Норватову, И.Ф. Делемену, оказавшим помощь при подготовке данной статьи. Помощь при транспортировке в Долину Гейзеров оказывалась руководством КГБЗ – О.А. Дахно, В.И. Мосоловым и начальником КФ ГС РАН В.Н. Чебровым. Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 09-05-00605-а.

## Список литературы

**Голева Г.А.** Гейзеры и горячие озера Кроноцкого заповедника (Камчатка). Путеводитель. М.: Прогресс-Академия, 1993. 64 с.

**Двигало В.Н., Делемень И.Ф., Дрознин В.А.** Проведение краткосрочного прогноза оползневых процессов в Долине Гейзеров // Отчет по Гос. Контракту № 5 от 14.12.2007. П-Камчатский. 2008. 155 с.

**Кириухин А.В., Леонов В.Л., Делемень И.Ф., Рычкова Т.В.** Разработка проекта долгосрочного слежения за развитием оползневых процессов в Долине Гейзеров \ \ Отчет по Гос. Контракту № 14 от 20.12.2007, П-Камчатский. 2008. 55 с.

**Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Карпов Г.А., Леонов В.Л.** “Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров”. Научно-популярный очерк – путеводитель. М.:, 2004. 212 с. (электронная версия).

**Droznin V.A., Kiryukhin A.V., Muraviev J.D.** Geysers Characteristics Before and After Landslide June 3-rd 2007 (Geysers Valley, Kamchatka) // Abstract AGU Meeting 10-14 Dec. 2007. San-Francisco, USA.

**Lundgren P., Lu Z.** Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations \ \ Geophysical Research Letters, 2006. V. 33. L06301. P. 4.

**Rinehart J.S.** Geysers and Geothermal Energy. Springer-Verlag, New York. 1980. P. 223.