

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Кирюхин А.В.

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

Введение

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

В этой связи анализ данных по термогидродинамическому и газогидрохимическому режиму, полученных при эксплуатации Паужетского геотермального месторождения в 1960-2006 гг., и последующее термогидродинамическое моделирование привели к получению следующих результатов (Kiryukhin et al. 2004, 2008):

1. Уточнена концептуальная гидрогеологическая модель Паужетского геотермального месторождения; установлено, что в процессе его эксплуатации происходит постепенное охлаждение резервуара за счет инфильтрации в него охлажденных вод по каналам, служившим в естественных условиях проводниками разгрузки термальных источников и гейзеров на поверхность Земли.

2. Построена трехмерная численная термогидродинамическая TOUGH2-модель геотермального месторождения.

3. Выполнена калибровка модели по данным естественного состояния и эксплуатации Паужетского геотермального месторождения 1960-2006 гг. (всего использовано 13675 калибровочных точек) и осуществлено решение обратных многопараметрических задач.

4. Установлены источники формирования эксплуатационных запасов Паужетского геотермального месторождения (в расходном балансе 25.7% составляют естественные и привлекаемые ресурсы глубинного теплоносителя, 30% - инфильтрация холодных метеорных вод, 36.0% - упругая емкость гидротермального резервуара (в том числе 15.3% - из «трещин» и 20.7% - из матричного пространства) и 8.3% - реинжекция).

5. Прогнозное численное моделирование до 2032 г. показывает возможность стабильного получения пара со средним расходом 29 кг/с (пароводяной смеси 288 кг/с) при условии последовательного бурения и ввода в эксплуатацию пяти дополнительных скважин и оптимизации потерь давления от скважин до сепараторов, т.е. при используемой технологии эксплуатации возможно обеспечение пара для ГеоЭС 6.8 МВт, при использовании более эффективных технологий преобразования пара в электроэнергию – до 14 МВт (бинарные технологии или применение специализированных турбин).

По Мутновскому геотермальному месторождению установлено следующее (Кирюхин и др., 1996, 2004, 2005, 2006):

1. Уточнена концептуальная гидрогеологическая модель участка Дачный Мутновского геотермального месторождения, продуктивный резервуар (продуктивная зона «Основная») приурочен к разломной зоне северо-северо-восточного простирания, падением 60° на восток-юго-восток и средней вертикальной мощностью около 240 м.

2. Построена численная термогидродинамическая TOUGH2-модель участка Дачный, включающая продуктивную зону «Основная» и массив вмещающих горных пород, результаты моделирования и анализ газогидрохимических данных свидетельствует, что в процессе эксплуатации происходит интенсификация кипения в двухфазном геотермальном резервуаре и приток в него метеорных вод из вышележащих горизонтов.

3. TOUGHREACT-моделирование термогидродинамических-химических условий восходящей фильтрации теплоносителя в продуктивной зоне показывает образование вторичных минералов (вайрацит, кварц, К-полевой шпат и хлорит), что подтверждается прямыми наблюдениями. Моделирование показывает также, что образование вторичных гидротермальных минералов может привести в естественных условиях к заполнению трещин и существенному снижению пористости в течение первых сотен лет.

4. За период наблюдений за изменением давления в высокотемпературном гидротермальном резервуаре Мутновского геотермального месторождения в 1995-2006 гг. выявлены семь краткосрочных гидродинамических аномалий, предшествующих сейсмическим событиям (из них пять аномалий, характеризующихся средним снижением давления на 0.10-4.0 бар за 1.5-4 часа до землетрясений с $M=4.1-5.7$ на глубинах до 41 км и на расстоянии до 234 км от точки наблюдений, и постсейсмическими циклическими вариациями давления).

Исследования термогидродинамических условий и последствий обвала 3 июня 2007 г в Долине Гейзеров (Камчатка) (Droznin et al. 2007) необходимы для того, чтобы предвидеть подобные события в будущем, понимать какие наблюдения могут дать информацию о готовящейся новой катастрофе и какие меры возможны для уменьшения возможного ущерба. Ниже остановимся более детально на анализе гидрогеологической ситуации в гидротермальной системе Долины Гейзеров.

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.

Ключевым вопросом является поэтому вопрос - почему 3 июня 2007 г оползень, сопровождаемый мощным выбросом пара в зоне отрыва (Д. Шпиленок, личн. сообщ., 2007), преобразовался в обломочно-грязевой поток и за 2 минуты переместил около 20 млн. м³ горных пород (В.Н. Двигало, 2008).

На основе интегрированного анализа геологической карты бассейна реки Гейзерной (1: 10 000), составленной В.Л. Леоновым, и гидрогеологической информации по известным и новообразованным источникам, предложена концептуальная гидрогеологическая модель гидротермального резервуара и связанных с ним процессов теплопереноса, которые привели к насыщению зоны отрыва оползня 3.06.07 пароконденсатными водами с последующей потерей устойчивости блока горных пород.

В электронном издании книги В.М. Сугрובה, Н.Г. Сугрובовой, Г.А. Карпова, В.Л. Леонова (2004) изложена гидрогеологическая модель гидротермальной системы Долины Гейзеров, которая объясняет условия формирования и разгрузки гейзеров, кипящих источников и паровых струй, размещенных в бассейне реки Гейзерной.

Нами рассматривается фрагмент гидротермальной системы Долины Гейзеров, а именно гидротермальный резервуар, обеспечивающий питание гейзеров и кипящих источников в нижнем и среднем течении реки Гейзерной (далее - гидротермальный резервуар). Оползневые процессы имели место на его кровле, сложенной преимущественно Гейзерной пачкой (Q_3^4 gm) 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). Поэтому 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 (рис. 1).

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 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 (рис. 1). По химическому составу вода источников соответствует конденсату пара смешанному с метеорными водами. В районе источников подошва верхнего водоупора (Гейзерной пачки) имеет падение на СЗ под углом 25°. Блоки раздробленных пород в верхней части оползня 3.06.07 полностью гидротермально изменены и представлены высококремнистым монтмориллонитом (Л.П. Вергасова, личн. сообщ., 2008). К этому следует добавить, что во время полевых исследований в 1985 г А.В. Кирюхиным был обнаружен горячий источник с температурой 45°C и расходом 0.5 л/с к юго-востоку от фумаролы № 12. Указанный источник (t45q05) был расположен на «необычно» высокой абсолютной отметке +670 м, вблизи эпицентра зоны отрыва оползня 3.06.07, происшедшего спустя 17 лет.

Таким образом, весь ареал распространения верхнего водоупора (Гейзерной пачки) к северу от границы оползня 3.06.07 пропаривается и насыщается конденсатом пара за счет восходящего движения пара по восстанию подошвы водоупора из основной продуктивной зоны (рис. 1). Стенка докальдерного комплекса блокирует распространение пара в восточном направлении, способствует образованию конденсата и направляет его сток в северо-восточный сектор цирка отрыва оползня 3.06.07, где в настоящее время осуществляется разгрузка в виде фумарольного поля и конденсатных источников. Кроме того, как уже отмечалось, разгрузка пара осуществляется частично в ослабленных зонах через кровлю верхнего относительного водоупора (паровые струи № 12 и 44, источник t45q05).

Из вышеизложенного вытекает, что катастрофический обвал 3.06.07 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. С этой точки зрения следующим вероятным объектом обрушения может являться бассейн ручьев Щелевой и Ступенчатый, примыкающий с севера к оползню 3.06.07, и нависающий над гейзерами № 14-26, 40-41, включая гейзер Великан. Триггером такого обрушения могут быть геодеформационные процессы, связанные с повышением давления в магматической питающей системе Узон-Гейзерной депрессии, региональные землетрясения, извержения вулканов и внедрение даек, приливные и барометрические аномалии, насыщение влагой во время паводков, парогидротермальные взрывы, если давление пара превысит вес ослабленных пород (для пемзовых туфов условие парогидротермального взрыва при давлении пара 17.6 бар (соответствующего температуре 206°C, SiO₂-геотермометр) может возникнуть на глубине 150-200 м), давление большого количества снега в весенне-зимний период. Останцы Гейзерной пачки на западном склоне уступа докальдерного комплекса являются указателями предшествующих обрушений такого типа (рис. 1).

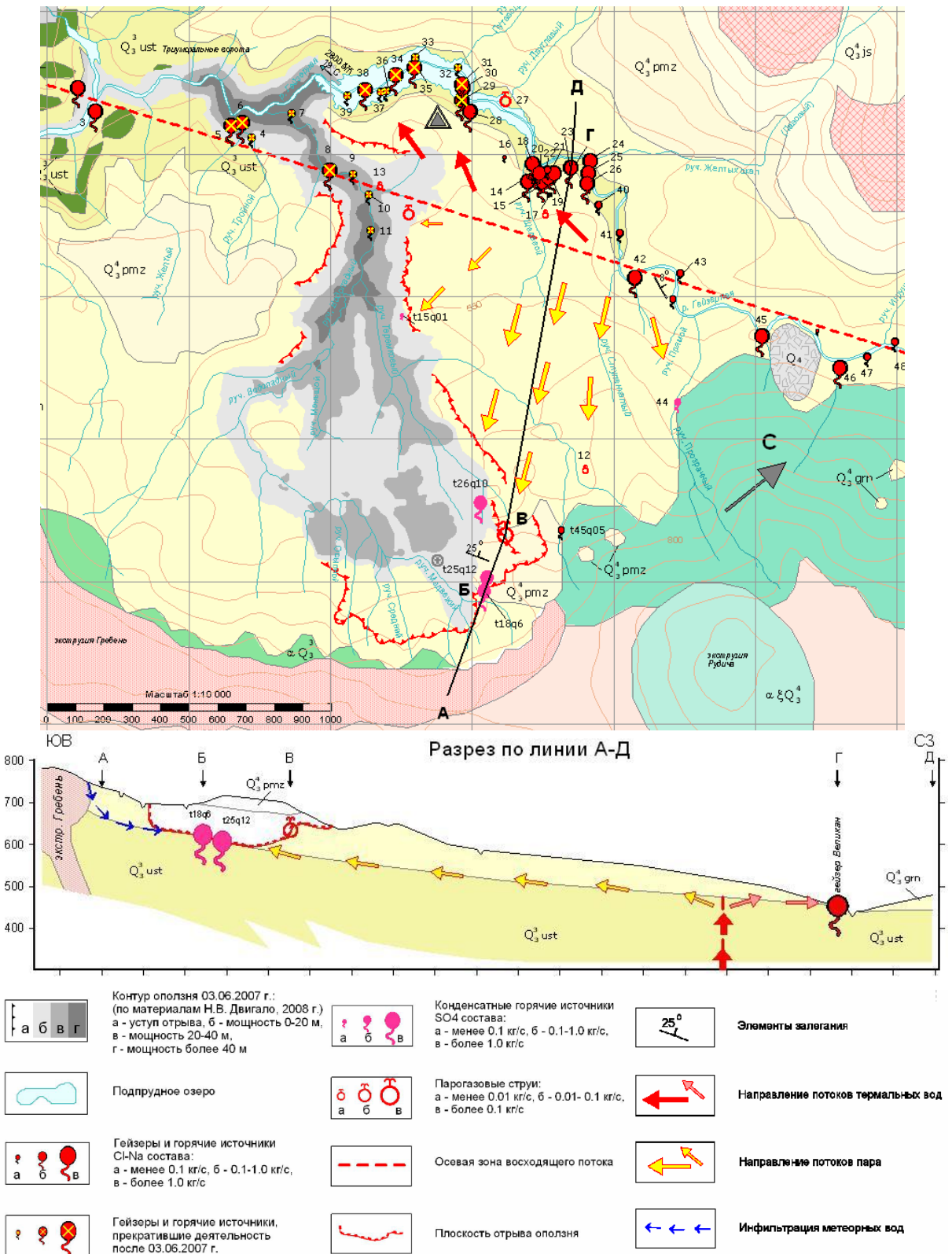


Рис. 1 Условия циркуляции теплоносителя в гидротермальном резервуаре (в плане и в разрезе по линии АД) в нижнем и среднем течении р. Гейзерная, Долины Гейзеров. Геологическая основа по В.Л. Леонову (Белоусов и др., 1983). Позиции горячих источников и паровых струй (с номерами) по О.П. Батаевой (личн. сообщ., 2003). Горячий источник, зафиксированный в 1985 г., и новообразованные конденсатные источники и паровые струи показаны с атрибутом в формате t^*q^* (где t – температура, q - расход).

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

Методика проведения наблюдений. Для регистрации периодичности извержений гейзеров Великан и Большой, начиная с августа 2007 г., использовались температурные логгеры НОВО U12-015. Технические характеристики прибора: температурный логгер НОВО U12-015 является одноканальным программируемым логгером, способным записывать в память до 43000 измерений в диапазоне температур от -40°C до 125°C с точностью 0.2°C , разрешающей способностью 0.025°C и временем инерционного запаздывания 3.5 мин (в воде). Запись температурных логгеров программировалась с интервалом 2-5 мин, логгеры устанавливались в каналах изливающейся из гейзеров воды, что позволяет однозначно определить время извержения гейзеров по последнему максимуму температуры перед ее абсолютным минимумом.

Для регистрации уровня озера и барометрического давления использована пара логгеров температуры и давления НОВО WATER LEVEL LOGGER U20-001-04. Поскольку озеро является проточным, то по полученным данным возможна также оценка расхода реки Гейзерной, при наличии графика зависимости расхода реки от уровня (ряд дискретных измерений расхода реки Гейзерной выполнен во время непрерывных наблюдений за уровнем озера). Технические характеристики прибора: логгер U20-001-04 давления и температуры является двухканальным программируемым логгером, способным записывать до 21700 измерений в диапазоне температур от -40°C до 75°C и давлений до 145 кПа (4 м водяного столба с учетом атмосферного давления). Точность измерения температуры 0.37°C , давления – 0.3 см вод. столба, разрешающая способность по температуре – 0.1°C , давлению – 0.14 см. вод. столба. Время инерционного запаздывания датчика давления составляет 1 сек., датчика температуры (в воде) - 3.5 мин. Один из логгеров U20-001-04 непосредственно записывал атмосферное давление, второй был подвешен через 50 мм кольцо в вертикальной трубе диаметром 40 мм, установленной в озере, и регистрировал суммарное давление столба воды над ним и атмосферное давление. Относительный уровень озера определялся по разнице записей давления.

Режим извержений гейзера Великан. Гейзер Великан является самым мощным в Долине Гейзеров. Объем ванны Великана составляет 13.5 м^3 , объем извергающейся воды оценивается в $40\text{-}60 \text{ м}^3$ (по данным Г.С. Штейнберга, J.S. Rinehart, 1980), т.е. средний расход его составляет не менее 2.4 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.

На рис. 2 видно, что в некоторых случаях проявляется синхронизация повышения уровня озера с увеличением периода извержений гейзера Великан, причем при более низком уровне в зимнее время наблюдается повышенная «чувствительность» периода гейзера к относительному повышению уровня в озере. Так, например, если 22 окт. 2008 г. при повышении уровня в озере на 12 см (относительный уровень 14 см) период извержения Великана увеличился до 720 мин, то 29 февр. 2008 г. при повышении уровня на 8 см (относительный уровень 4 см) период извержения Великана увеличился до 1920 мин. (32 часа) (рис. 3). Вместе с тем, прохождение летних паводков с амплитудой подъема уровня до 80 см и продолжительностью 1.5 месяца практически не повлияло на периодичность извержений гейзера Великан. Отсюда вытекает, что режим извержений Великана наиболее чувствителен к охлаждению за счет попадания атмосферных осадков непосредственно в ванну гейзера (площадь поверхности ванны около 4.5 м^2), при этом осадки в виде снега в наибольшей степени замедляют его циклическую деятельность.

Средний период извержений гейзера Великан с августа 2007 г. по апрель 2008 г. составил 382.3 мин (при этом было зарегистрировано 899 извержений, среднее число промежуточных вскипаний 10.0). Средний период извержений гейзера Великан с апреля

2008 г. по июль 2008 г. составил 348.6 мин (при этом было зарегистрировано 372 извержения, среднее число промежуточных вскипаний 8.9). Для сравнения отметим, что по данным В.А. Дрозина (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru>) среднее значение периода извержений гейзера Великан составляло до обвала 3.06.07 в августе-октябре 2003 г. 339.4 мин, среднее значение промежуточных вскипаний – 8.8 (207 извержений). Замедлилась ли существенно циклическая деятельность Великана после обвала 3.06.07 – покажут дальнейшие наблюдения.

По данным (Rinehart, 1980) наблюдения за режимом извержений гейзеров, проводимые в Йеллоустонском национальном парке США и на скважинах, работающих в гейзерном режиме показали чувствительность активности ряда гейзеров к изменениям атмосферного давления (повышение атмосферного давления приводит к увеличению периода извержений гейзеров). Гейзеры Old Faithful и Riverside реагируют на изменения атмосферного давления, хотя и не всегда с одинаковой амплитудой. Наиболее полные данные получены по скважине Old Faithful of California, работающей в гейзерном режиме и находящейся в Калистоге (Калифорния, США). По результатам детальных четырехлетних наблюдений (1963-1967 гг.) установлено, что сезонное повышение атмосферного давления на 10 мбар приводит к уменьшению среднемесячного периода извержений с 49 до 40 мин (со сдвигом по времени 70 сут.). Физический смысл этого заключается в том, что повышение давления на границе (кровле) гидротермального резервуара приводит спустя некоторое время к увеличению разгрузки из него (что равносильно уменьшению периода действия гейзеров). Следовательно, режим гейзеров может в некоторых случаях служить индикатором внешнего давления на гидротермальный резервуар.

Предварительный анализ взаимосвязи между барометрическим давлением и периодом извержений гейзера Великан с августа 2007 г. по октябрь 2008 г. (рис. 2) показывает, что сезонное уменьшение барометрического давления (зима, 930-940 мбар) синхронизируется с увеличенными периодами извержений (382 мин.), а повышенные барометрические давления (лето, 960-965 мбар) синхронизируются с уменьшением периода извержений (347-349 мин.). Если чувствительность периода гейзера Великан к изменению давления на кровле гидротермального резервуара подтвердится дальнейшими наблюдениями, то эту особенность гейзера можно использовать для оценки изменения геодинамических условий: давления в магматических питающих системах вулкана Кихпинич и кальдеры Узон или давления на кровлю перекрывающих гидротермальную систему озерных туфов.

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 г. по март 2008 г. – 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. Дрозина (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru>) до обвала 3.06.07 и образования Подпрудного озера - среднее значение периода извержений гейзера Большой составляло (август-октябрь 2003 г.) 107.7 мин (697 извержений).

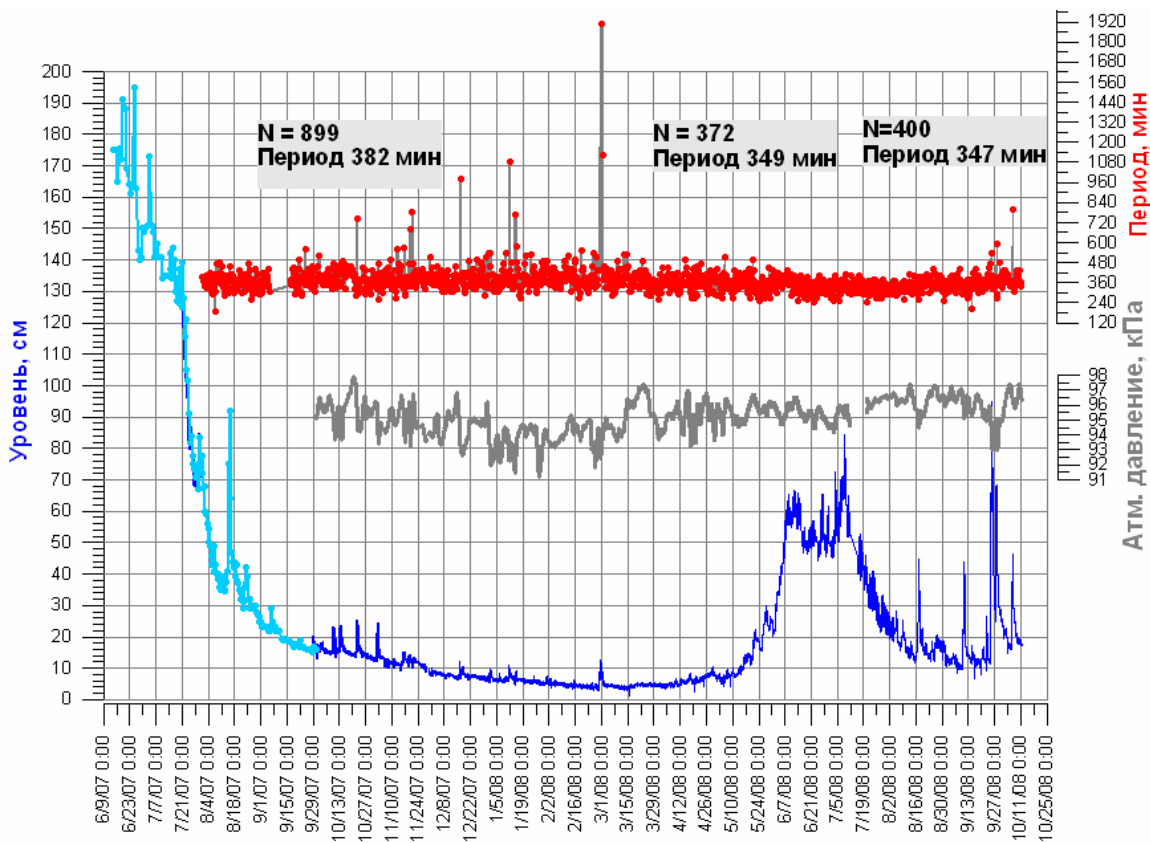


Рис. 2. Изменение относительного уровня озера (синяя линия), барометрического давления (серая линия) и периода извержений гейзера Великан (красные кружки) после обвала 3 июня 2007 г.

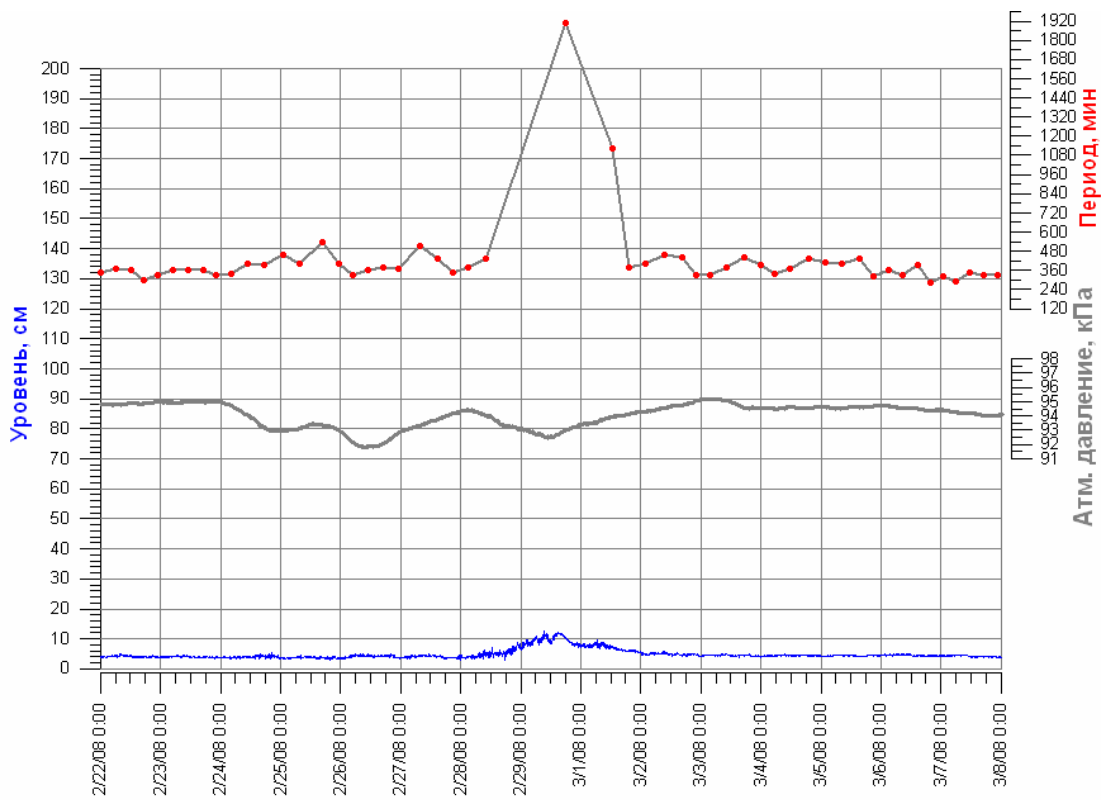


Рис. 3. Изменение относительного уровня озера (синяя линия), барометрического давления (серая линия) и периода извержений гейзера Великан (красные кружки) с 22.02.2008 по 8.03.2008 г. В это время зафиксирован максимальный «простой» Великана – 32 часа.

Режим разгрузки гидротермальной системы в реку Гейзерная

По данным В.М. Сугрובה в сентябре 1989 г. расход реки Гейзерной в устьевой части составлял 3340 кг/с, при этом содержание хлора в речной воде – 85 мг/л (суммарный вынос хлор-иона - 283.9 г/с). Принимая максимальное содержание Cl в термальных источниках 900 мг/л, оценка суммарной разгрузки гидротерм (с учетом скрытой) оценивается В.М. Сугрובהм в 315 кг/с.

После обвала 3.06.07 гидрометрические наблюдения с целью оценки динамики изменения разгрузки гидротерм проводились на четырех створах р. Гейзерной (створы «Плотина», «Щель+100», «Жемчужный» и «Первенец+200»), при этом регулярные наблюдения с использованием гидрометрической вертушки осуществлялись на двух створах (створы «Плотина» и «Щель+100»). Синхронно с измерениями расхода реки отбирались пробы воды для последующего определения хлор-иона. Используя аналогичный изложенному в монографии В.М. Сугрובה и др. (2004) метод подсчета разгрузки гидротерм, определена функциональная зависимость между разгрузкой гидротерм (по хлор-иону) и уровнем, после чего получена зависимость изменения разгрузки гидротерм (по хлор-иону) от времени (рис. 5), 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» плавно растет от 243 кг/с (октябрь 2007 г.) до максимума 300 кг/с (март 2008 г.), далее резко снижается начиная с мая во время летнего паводка до 30-100 кг/с (июнь 2008 г.), затем опять возрастает до 245-260 кг/с (август-сентябрь 2008 г.). Суммарная разгрузка гидротерм (по хлор-иону) на створе «Щель+100 м» плавно растет 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.

Обращает внимание то, что произошло некоторое перераспределение естественной разгрузки: практически вся она происходит до плотины Подпрудного озера (83% от оценки В.М. Сугрובה 315 кг/с на сентябрь 1989 г.). Барраж существенной доли естественной разгрузки плотиной Подпрудного озера свидетельствует о ее в целом пониженной проницаемости. Вероятно, к этому привела закупорка телом оползня 3.06.07 бассейна нижнего течения долины реки Гейзерной. На участке от створов «Щель+100м» до «Плотины» после обвала 3.06.07 осуществляется 48% от суммарной величины естественной разгрузки.

Выводы

1. Разработанные численные термогидродинамические модели Паужетского и Мутновского геотермальных месторождений позволяют выяснить условия их формирования, оценить тепловой и массовый баланс в естественных и нарушенных эксплуатацией условиях, модель Паужетского геотермального месторождения достаточно адекватно воспроизводит историю эксплуатации 1960-2006 гг. и позволяет выполнить надежный прогноз различных сценариев дальнейшей эксплуатации.

2. Катастрофический обвал 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров 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.

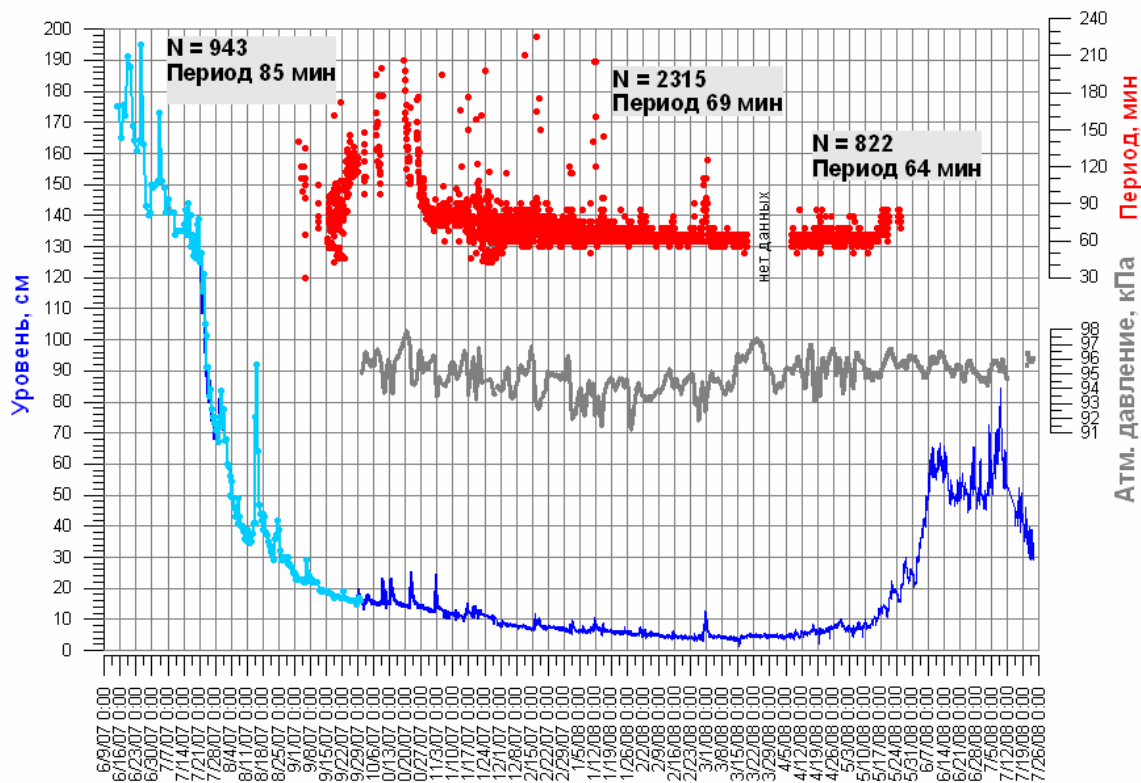


Рис. 4. Изменение относительного уровня озера (синяя линия), барометрического давления (серая линия) и периода извержений гейзера Большой (красные кружки) после обвала 3 июня 2007г.

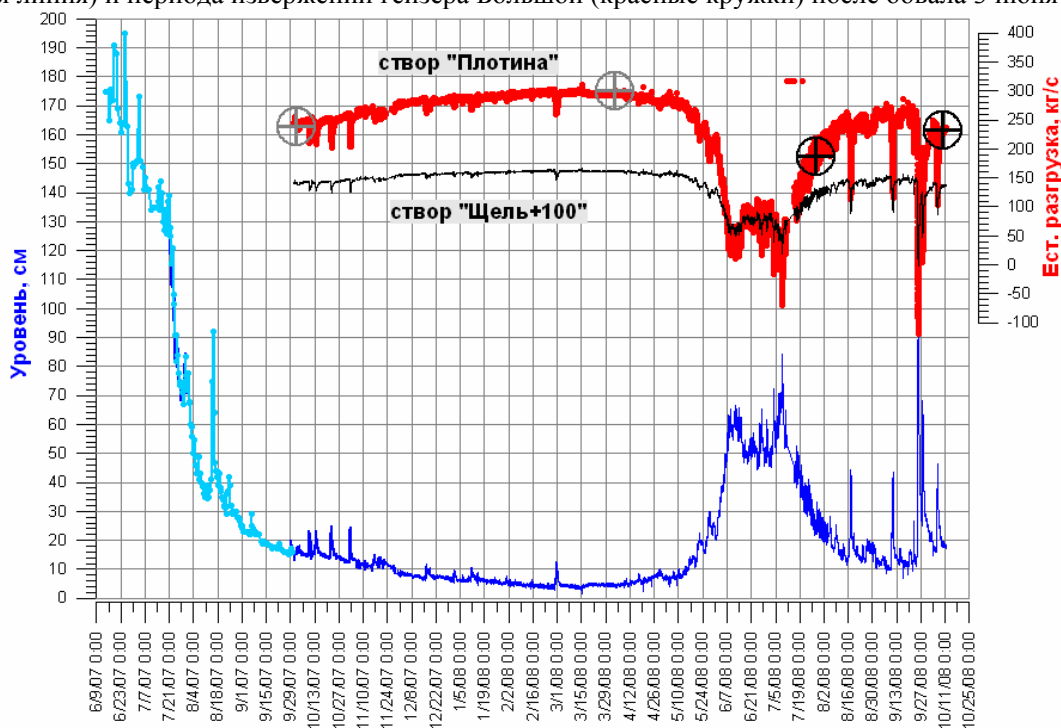


Рис. 5. Изменение относительного уровня озера (синяя линия) и естественной разгрузки гидротерм на створе «Плотина» (красная жирная линия) и на створе «Щель+100м» (черная тонкая линия) (расчет по хлор-иону) после обвала 3 июня 2007 г. Кружки с крестами соответствуют времени проведения гидрометрических измерений (черные – с использованием гидрометрической вертушки, серые – с использованием поплавкового метода).

3. Проявление взаимосвязи между сезонным изменением барометрического давления и периодом извержений гейзера Великан (Долина Гейзеров) с августа 2007 г. по

октябрь 2008 г. указывает на возможную чувствительность периода гейзера к изменению внешнего давления на кровле гидротермального резервуара. Режим извержений гейзера Великан наиболее чувствителен к охлаждению за счет попадания атмосферных осадков непосредственно в ванну гейзера, при этом осадки в виде снега в наибольшей степени замедляют его циклическую деятельность (период извержений увеличивается до 32 часов).

4. Суммарная разгрузка гидротерм (по хлор-иону) в Долине Гейзеров не является постоянной и характеризуется сезонными вариациями. По наблюдениям на створе на выходе из Подпрудного озера она плавно растет от 243 кг/с (октябрь 2007 г.) до максимума 300 кг/с (март 2008 г.), далее резко снижается во время летнего паводка до 30-100 кг/с (июнь 2008 г.), затем опять возрастает до 245-260 кг/с (август-сентябрь 2008 г.).

Автор выражает признательность В.А. Дрознину, В.А. Злотникову, В.Л. Леонову, Т.В. Рычковой, Ю.А. Норватову, И.Ф. Делемену, Е.В. Черных, оказавшим помощь при подготовке данной статьи. Помощь при транспортировке в Долину Гейзеров оказывалась руководством КГБЗ – О.А. Дахно, В.И. Мосоловым и директором КФ ГС РАН В.Н. Чебровым. Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 06-05-64688 и ДВО РАН по проекту 06-И-ОНЗ-109.

Список литературы

Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология, 1983. № 1. С. 65-79.

Кiryukhin A.B., Леонов В.Л., Словоц И.Б. и др. Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт // Вулканология и Сейсмология № 5. 2005. С.19-44.

Кiryukhin A.B., Корнеев В.А., Поляков А.Ю. О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре // Вулканология и сейсмология. № 6. 2006. С.1-9.

Кiryukhin A.B., Пузанков М.Ю., Словоц И.Б. и др. Термогидродинамическое-химическое моделирование процессов вторичного минералообразования в продуктивных зонах геотермальных месторождений // Вулканология и сейсмология № 5. 2006. С.27-41.

Дрознин В.А. (<http://www.ch0103.emsd.iks.ru>)

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

Droznin V.A., Kiryukhin A.V., Muraviev J.D. Geysers Characteristics Before and After Landslide June 3-rd 2007 (Geysers Valley, Kamchatka) // Eos Trans. AGU. 88 (52) 2007. Fall Meet. Suppl., Abstract G41A-0146.

Kiryukhin A.V. Modeling Studies: Dachny Geothermal Reservoir, Kamchatka, Russia // Geothermics, 1996. V. 26. № 1. P.63-90.

Kiryukhin A.V., T. Xu, K. Pruess, J. Apps, I. Slovtsov Thermal-Hydrodynamic-Chemical (THC) Modeling Based on Geothermal Field Data // Geothermics, 2004. V. 33, № 2, P. 349-381.

Kiryukhin A.V., Yampolsky V.A. Modeling Study of the Pauzhetsky Geothermal Field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2004. V. 33. № 4. P.421-441.

Kiryukhin, A.V., Asaulova N.P., Finsterle S. Inverse Modeling and Forecasting for the Exploitation of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia // Geothermics. 2008. V.37. P. 540-562.

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