

УДК 550.42.47:551.214

ЭВОЛЮЦИЯ РЕЖИМА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАСТВОРОВ НОВООБРАЗОВАННОГО ГЕЙЗЕРА В КАЛЬДЕРЕ УЗОН (КАМЧАТКА)

© 2012 г. Г. А. Карпов¹, А. Г. Николаева¹, В. Н. Акимов², В. Ф. Гальченко³

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: karpovga@kscnet.ru

²Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Скрябина РАН
142290 Московская обл., Пушино, просп. Науки, 5

³Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН
117312 Москва, просп. 60-летия Октября, 7/2

Поступила в редакцию 12.04.2011 г.

Исследованы вариации режима и физико-химических характеристик растворов гейзера, образовавшегося в 2008 г. в кальдере Узон на месте пульсирующего источника. Описаны отличительные особенности деятельности гейзера в 2009 и 2010 гг. Впервые отмечен перегрев воды до 100.13°C на устье гейзера во время извержения. Рассмотрен состав растворов и свободных газов гейзера. Обсуждаются вопросы глубинности растворов и причины возникновения гейзера.

ВВЕДЕНИЕ

Природный гейзерный процесс излияния перегретой воды, при котором происходит изменение агрегатного состояния и вещественного состава теплоносителя, характерный для современных гидротермальных систем областей активного вулканизма, еще недостаточно изучен. Это связано с невозможностью детально исследовать строение аппарата гейзера. Достоверно известно, что типичные гейзеры имеют выводной канал, по которому на поверхность поступает перегретая вода, и что прерывистый гейзерный режим определяется периодичностью поступления воды, в цикле которой имеют место следующие одна за другой стадии — покоя (когда верхняя часть канала осушается и движение воды не наблюдается), наполнения канала водой, ее излива, фонтанирования (собственно извержения) и, иногда, стадия парения. Считается, что извержение гейзера происходит вследствие вскипания воды в подземном резервуаре (камере) и вытаскивания парлифтом из канала на поверхность менее нагретой водной “пробки”. Следовательно, должен осуществляться постоянный или дискретный приток теплоносителя в зону резервуара.

Пока не ясны многие вопросы строения резервуара и механизма работы гейзера. На каких глубинах должен находиться резервуар? Какую геометрию и размеры он имеет? Какова природа теплоносителя и на какой глубине происходит вскипание? Идет ли конденсация пара в выводном канале или он весь выбрасывается с выталкиваемой

им водой? Наконец, с какой водой смешивается высокотемпературный теплоноситель — поверхностной, маломинерализованной, или с глубинным раствором, т.е. идет ли дренирование каналом гейзера одного или нескольких водоносных горизонтов?

На базе наблюдений работы геотермальных скважин [Сугробов, 1965] и природных гейзеров [Набоко, 1954; Устинова, 1955; Мержанов и др., 1970] было построено несколько моделей гейзерного процесса, дающих общее представление о гейзерном режиме истечения воды. Наблюдения за работой гейзера, возникшего в 2008 г. на термальном поле в кальдере Узон, дали возможность получить некоторые новые данные, позволяющие дополнить наши знания о гейзерном процессе.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В июле—августе 2009 г. и в сентябре 2010 г. нами были проведены режимные наблюдения за деятельностью гейзера, который возник на месте пульсирующего источника в кальдере Узон.

Кольцевая вулcano-тектоническая структура — кальдера Узон (рис. 1) приурочена к крупному верхнеплейстоценовому вулканическому центру, расположенному почти в центральной части Восточного вулканического пояса Камчатки. В кальдере локализована современная высокотемпературная гидротермальная система, проявляющаяся на поверхности выходами термальных источников, грязевых котлов и грязевых “микровулканчиков”, термальных озер и площадок прогретых пород



Рис. 1. Общий вид кальдеры Узон с юго-востока. Звездочкой обозначено местоположение гейзера Шаман, а ромбом — новообразованный грязевой вулкан.

(рис. 2). Геологическую известность кальдера приобрела после обнаружения в ней зон формирующегося в настоящее время сульфидного As—Sb—Hg—оруденения и проявлений нефти [Набоко, 1974; Бескровный и др., 1971; Карпов, Павлов, 1976]. Гидротермальная система в кальдере



Рис. 2. Общий вид Центрального (Второго) участка Восточного термального поля в кальдере Узон.

характеризуется проявлениями высокоминерализованных гидротерм хлоридно-натриевого состава с широкой дифференциацией типов терм — от кислых до субщелочных [Набоко, 1974; Карпов, 1974, 1988].

Целью наших исследований было получение новых данных по эволюции режима и динамике физико-химических характеристик новообразованного гейзера, интересного тем, что он образовался в пределах современной минерало-рудообразующей гидротермальной системы и что режим его деятельности существенно изменялся во времени.

Гейзер, которому мы дали название Шаман, возник на месте слабо пульсирующего источника, за которым велись многолетние режимные наблюдения. Его первые очень слабые извержения наблюдал инспектор Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника Р.В. Чуприн осенью 2008 г.

Грифон гейзера расположен в ССЗ секторе Первого участка Восточного термального поля кальдеры Узон, примерно в 200 м к западу от крупного оз. Банное и в 50 м к востоку от группы источников Парящий Сапожок. Он находится близ основания невысокого бугра, имеющего общую ССВ ориентировку (рис. 3). Бугор сложен измененными обохренными алевро-псаммитовыми и псефитовыми туфами. В северном секто-

ре бугра отмечены два крупных останца плиты, представляющей собой опализированные гравелиты темного цвета. На поверхности бугра встречаются изометричные обломки кавернозного гейзерита светло-серого цвета и многочисленные крупные остроугольные обломки опализированных туфов белого цвета. Здесь же наблюдаются высыпки серы. С запада грифон гейзера обтекает ручей от источника Молочный (Вертолетный), а с востока — ручей Каскадный, в котором есть грифон с пульсирующим режимом истечения воды.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения температуры. Измерения проводили с помощью термощупа “ТК-5.05” (точность измерений 0.5°C) длиной 1 м и датчиков температуры типа DS1922T (термохроны: Maxim, Dallas Semiconductor, США, точность измерений 0.01°C). Датчики помещали в пластиковые перфорированные контейнеры и в цилиндры из нержавеющей стали, которые устанавливались в канале гейзера на шнуре, подвешенном на двух растяжках. Глубина погружения датчика составляла 50 см от наименьшего уровня воды в чаше гейзера. Параллельно аналогичными датчиками проводили измерение температуры окружающего воздуха на высоте 20 см от грунта в тени. В датчиках устанавливали режим автоматической регистрации температуры через определенный промежуток времени (в канале гейзера — через 2 сек, для воздуха — через 5 мин).

Отбор воды и свободных газов. Пробы воды отбирались в пластиковые бутылки путем зачерпывания ее из грифона гейзера, а в период извержения — посредством предварительного сбора в пластиковый таз, установленный в зоне падения изверженной массы воды. Параллельно с отбором производились измерения $T^{\circ}\text{C}$, pH, Eh воды.

Пробы свободных газов отбирались непосредственно из канала гейзера в стадию его наполнения двумя методами: 1) методом вытеснения подсолонной воды в стеклянную бутылку; 2) в барбатор с поглотителями по стандартной методике [Никитина и др., 1989].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наблюдений гейзера в 2009 г. Первые детальные наблюдения на гейзере выполнялись с 17 июля по 10 августа 2009 г. В этот период в кальдере наблюдалась высокая температура воздуха — вариации температуры приземной атмосферы по нашим измерениям составляли от 8.9 ночью до 35.5°C днем. Среднестатистическая температура в дневное время была порядка 22°C .

Морфология грифона и канала гейзера. Грифон гейзера в начале своего существования имел округлую форму диаметром порядка 1.5 м, но к



Рис. 3. Общий вид термального участка с гейзером Шаман. Видно трассирование провалами грунта тектонического разлома субмеридионального простирания.

июлю 2009 г. он приобрел изометричные очертания с размером 4.5×6 м. Удлинение имеет субмеридиональную направленность. Северный берег грифона крутой. Четко просматриваются два уровня положения воды, фиксирующихся кольцевыми террасками. Верхний уровень отражает положение воды при полном заполнении грифона, а нижний, уступом порядка 0.4 м, отмечает самый низкий уровень воды после извержения. Устье канала гейзера обнажается очень редко и имеет слегка овальную форму и размер 25×30 см.

Канал несколько смещен от центра грифона к северу. Он промерен нами штангой и до глубины 1.85 м имеет диаметр около 15 см и идет вертикально. Глубже он сильно сужается.

Режимные наблюдения выполнены в два этапа. Первый (17–18 июля 2009 г.) включал визуальные наблюдения и измерения температуры воды термощупом “ТК-5.05” с хронометрированием режима деятельности секундомером. С самого начала деятельности гейзер имел все четыре характерных периода (стадии) активности: (1) подъем воды и заполнение грифона до уровня перелива в ручей; (2) бурное кипение и начало перелива воды в ручей; (3) извержение с выбросом паро-водяной смеси (нередко с грязью) на высоту более 4–6 м; (4) уход воды в канал до минимального уровня.

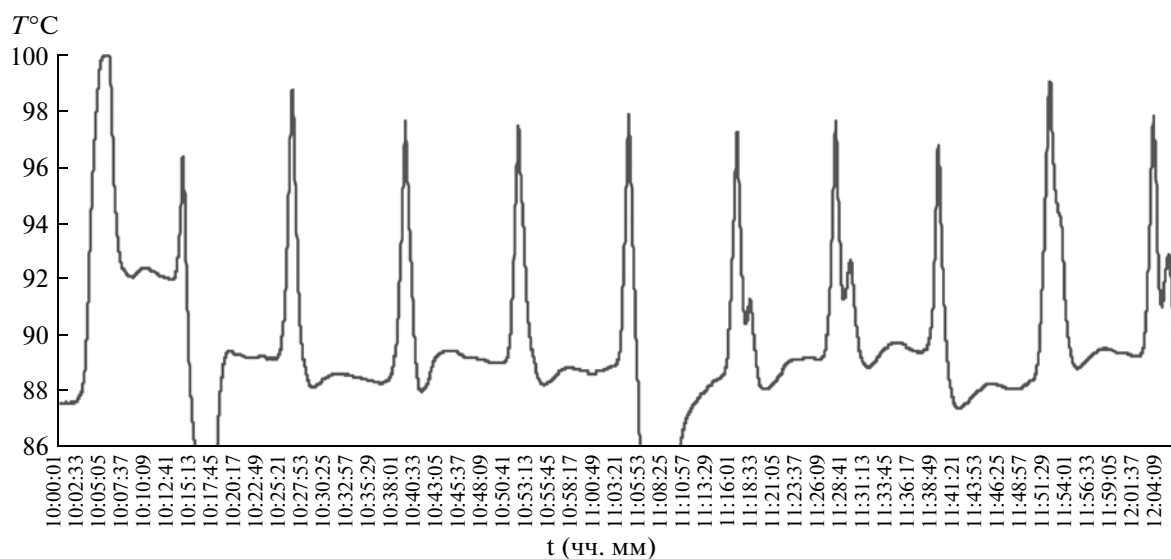


Рис. 4. Профиль температурного режима гейзера Шапан за период 11-ти извержений 28.07.2009 (время местное).

Однако деятельность гейзера этого периода наблюдения отличалась некоторыми особенностями. После завершения извержения уровень воды в грифоне обычно быстро падал на 0.5 м (с характерным воронкообразным уходом воды в канал). До минимального уровня вода уходила обычно за 1.5 мин. Достигнув минимума, уровень стабилизировался. В это время отсутствовало бурление воды. В нескольких точках наблюдались выходы мелких пузырьков газа. Этот период длился от 45 сек до 2 мин, после чего происходил небольшой всплеск над выводным каналом и начинался быстрый подъем воды и заполнение грифона. Бурление и всплески воды быстро усиливались. Как правило, грифон полностью заполнялся за 11–19 мин. Затем бурление переходило в высокие всплески. В самой пониженной части грифона начинался перелив воды и образование ручейка, и в считанные секунды происходило извержение. Очень редко излив воды из грифона, и собственно извержение не наблюдалось, а всплески поднимали воду на 0.8–1 м, и затем вода медленно уходила в канал. В этих случаях, не доходя до минимального уровня, вода снова поднималась, и весь цикл происходил далее по обычной схеме. В среднем, весь цикл активности в первый период наблюдений повторялся через 13–21 мин. Стадия самого извержения была очень короткой и занимала не более 12–22 сек. За это время гейзер извергал порядка 200 л воды. Но фонтан гейзера имел субвертикальное положение, и большая часть воды снова попадала в грифон, постепенно разрушая и расширяя его.

Имела свои особенности и температурная характеристика гейзера. При минимальном уровне температура воды составляла 81.9°C, иногда она опускалась до 79.5°C. В период стабилизации уровня воды на устье канала температура в грифо-

не сначала быстро поднималась до 83.7°C, затем медленно повышалась до 84.7°C, после чего происходило быстрое (в течение 30–40 сек) повышение температуры до 86.7°C. Затем наблюдался выброс большого пузыря пара, температура воды падала на 0.4°C и тут же начиналось интенсивное бурление в грифоне, обусловленное подъемом высокотемпературного пара. Происходил резкий подъем температуры до 90–94°C, завершающийся извержением. В ручей сливалась вода с температурой 82°C. По периферии грифона глинистая масса породы была прогрета до 49°C.

Второй этап наблюдений проводили 28 июля 2009 г. в период с 10:00 до 12:07, во время которого измерения температуры выполняли с помощью программируемых термодатчиков (термохронов). Применение растяжек, обеспечивающих постоянное нахождение датчика в водной массе даже во время бурного извержения гейзера, позволили более точно измерить температуру извергающейся воды. В течение двухчасового периода наблюдений были зафиксированы повышенные значения температуры воды гейзера в стадию извержения (до 100.13°C) по сравнению с первоначальными измерениями термощупом (рис. 4, табл. 1).

График изменения температуры полностью совпадал с классическими четырьмя стадиями активности гейзеров. Однако, как видно на рисунке 4, характер изменения температуры при каждом извержении в той или иной степени отличался. Во-первых, наивысшие значения температуры были выявлены во время меньших по высоте струй гейзера — 4–5 м (наивысшая высота достигала 5–7 м). Очевидно, при меньшей высоте струи, т.е. при меньшей силе выбрасывания контейнера, соприкосновение термохрона с воздухом, влияние которого могло уменьшать истин-

Таблица 1. Температурный режим гейзера Шаман (28.07.2009; время местное)

Параметры	Порядковый номер максимума температуры										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время максимальной температуры (час:мин:сек)	10:05:35	10:14:09	10:26:27	10:39:15	10:52:01	11:04:29	11:16:41	11:27:49	11:39:25	11:52:03	12:03:43
Время после предыдущего максимума температуры (мин:сек)	–	8:34	12:18	12:48	12:46	12:28	12:11	11:08	11:36	12:38	11:40
Максимальная температура (°C)	100.13	96.35	98.71	97.59	97.40	97.84	97.22	97.59	96.72	99.02	97.78
Разница между максимальной и температурой в предыдущие 2 сек (°C)	0.06	0.19	0.19	0.12	0.06	0.13	0.31	0.31	0.06	0.13	0.25
Разница между максимальной и температурой в последующие 2 сек (°C)	0.06	0.25	0.13	0.25	0.19	0.19	0.19	0.25	0.12	0.07	0.07

Примечание. Прочерк обозначает отсутствие данных.

ные значения температуры водной массы, было минимальным. Во-вторых, в некоторых случаях при извержении гейзера после наивысшего температурного пика наблюдался дополнительный (меньший) пик значений температуры воды. Такой эффект всегда наблюдался в случаях наивысшей высоты струи. Не исключено, что это связано со сложной морфологией камеры гейзера и/или наличием дополнительных второстепенных каналов выхода из нее. Промежутки времени между пиками значений температур (извержениями гейзера) в течение этих двух часов колебались в пределах 11–12 минут. В начале измерений наблюдался неполный укороченный цикл (см. рис. 4, пик 2) не закончившийся извержением, что в дальнейшем наблюдалось весьма редко.

В 2009 г. в зоне орошения водой гейзера вниз по стоку ручья, вытекающего из грифона при извержении, наблюдалось начальное образование гейзерита с микросталагмитовой структурой поверхности. Корочка гейзерита черного цвета (от импрегнации сульфидами железа) имела толщину 1.5–2 мм. На прогретой поверхности пород вокруг гейзера в изобилии отлагались квасцы охристого и белого цвета. В газирующем провале к востоку от гейзера обнаружили дендритовидные кристаллы самородной серы зеленовато-желтого цвета.

Результаты наблюдений в 2010 г. По данным режимных наблюдений 16 и 17 сентября 2010 г. выявлено изменение размеров грифона (увеличился до 6 × 8 м) и режима работы гейзера. Существенно изменился период работы гейзера. По данным наблюдений хронометрирования и результатам наблюдений инспектора Кроноцкого заповедника Е.С. Власова (письменное сообщение) в августе 2010 г. гейзер работал с интервалом от 1 час 31 мин до 1 час 58 мин; в сентябре – от 1 час 31 мин до 2 час 02 мин, в первые три дня октября – от 1 час 42 мин до 2 час 02 мин. Изменились и интервалы между стадиями. Минимизировалось время самого низкого уровня воды в канале. Излив ручья из грифона появлялся за несколько десятков секунд до фазы фонтанирования и функционировал весь период извержения. Само извержение имело три цикла, следующих друг за другом через 55 сек – 1 мин 30 сек и продолжающихся в течение около 1 мин (табл. 2). Наибольшую высоту имеет выброс в первый цикл извержения. Впервые замечено, что перед извержением температура воды в грифоне падает до 92.4–92.5°C и в считанные секунды поднимается до 98°C в момент извержения. После извержения пароводяная смесь в канале обычно имеет температуру 98.8–99.0°C. На корреляционных графиках: $T^{\circ}\text{C} - \text{pH}$; $Eh - T^{\circ}\text{C}$; $Eh - t$ (время) и $Eh - \text{pH}$, отражающих результаты измерений 17 сентября 2010 г. (рис. 5),

Таблица 2. Данные наблюдений за вариациями физико-химических параметров воды в гейзере Шаман

16 сентября 2010 г.					
t (чч. мм)	t°С	рН	Eh (мВ)		Состояние грифона и ручья из него
			Измеренное	Приведенное к стандарту	
9.00	98.00	7.05	-270	-70	Кипение в канале
9.12	97.00	—	—	—	—
9.13	96.50	—	—	—	—
9.15	96.10	—	—	—	—
9.18	96.50	6.69	-290	-90	Грифон полностью заполнен водой
9.25	96.00	—	—	—	—
9.30	96.50	—	—	—	—
9.31	96.50	6.54	-290	-90	Грифон заполнен. Намечается перелив.
9.37	95.50	—	—	—	Появился исток ручья из грифона
9.40	95.00	6.56	-280	-80	Ручеек из грифона увеличился
9.45	95.00	—	—	—	Идет флуктуация длины ручья
9.46	93.00	—	—	—	Расход ручья уменьшился
9.50	93.80	—	—	—	Потек ручей из грифона
9.51	97.50	—	—	—	Извержение. Три цикла
17 сентября 2010 г.					
t (чч. мм)	t°С	рН	Eh (мВ)		
			Измеренное	Приведенное к стандарту	
9.17	98.80	6.94	-250	-50	Бурное кипение в канале
9.23	97.50	7.04	-234	-34	Кипение на устье канала
9.30	96.50	6.51	-255	-55	Грифон заполнился водой
9.33	96.00	6.59	-242	-42	Грифон заполнился водой
9.40	95.50	6.57	-230	-30	Обозначился исток ручейка
9.42	94.50	6.42	-269	-69	Грифон полный. Наметился ручеек
9.47	94.00	6.38	-262	-62	Грифон полный, но руч. уменьшился
9.48	93.50	6.49	-252	-52	Колебание уровня воды в грифоне
9.50	92.50	6.32	-272	-72	То же самое
9.53	92.40	6.50	-240	-40	Грифон полный, потек ручеек
9.54	97.50	7.30	-106	94	Извержение. Первый цикл
9.55	97.70	7.35	-102	98	Второй цикл извержения
9.57	—	—	—	—	—
9.58	98.00	7.40	-90	110	Третий цикл извержения

Примечание. Прочерк обозначает отсутствие данных. Измерения температуры выполнены термощупом "ТК-5.05".

видны вполне закономерные, синхронные вариации для всех измеренных параметров. Синхронные и одновременные изменения $T^{\circ}\text{C}$ и рН (см. рис. 5а), рН – t (см. рис. 5б) показывают, по нашему мнению, большую скорость притока глубинной составляющей водного потока и его параметры. Подтверждают это заключение и данные рисунков (см. рис. 5в, 5г), где видно, что перед извержением вариации Eh наблюдаются в пределах – 34–72 мВ, отражая восстановительную обстановку газонасыщенных глубинных зон канала,

а извергается вода с Eh 94 мВ и выше, которая несет информацию об окислительной обстановке дегазированной воды. Пока не ясно с какой глубины идет приток воды с восстановительными характеристиками. Но уже в настоящее время видна синхронность в изменениях Eh и рН воды в канале гейзера (см. рис. 5д), имеющая явный направленный тренд.

Дополнительную информацию о глубинности извергаемой воды дают химические анализы проб воды и газа, отобранных в процессе извержения.

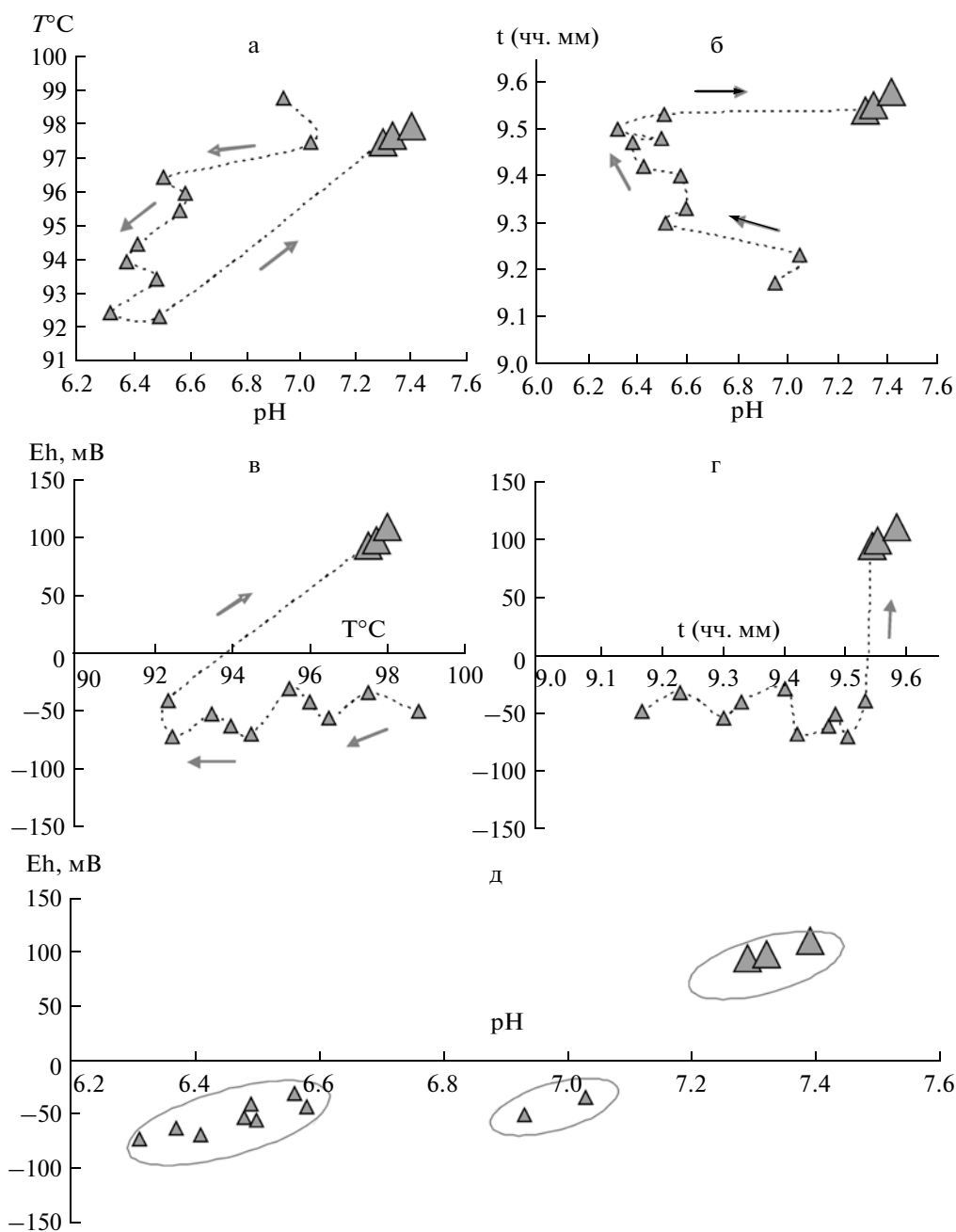


Рис. 5. Корреляционные графики вариаций параметров воды на устье канала гейзера Шаман в период с 19 ч 17 мин до 9 ч 58 мин 17.09.2010: $T^{\circ}\text{C}$ – pH (а); t (час) – pH (б); Eh – $T^{\circ}\text{C}$ (в); Eh – t (час) (г); Eh – pH (д). Маленькие треугольники – точки измерений параметров воды в стадию наполнения канала гейзера; большие треугольники – параметры в стадию фонтанирования гейзера.

Состав воды и газовой фазы гейзера. Состав воды и свободных газов несет важную информацию о месте формирования и источнике питания водной массы. Как показали режимные наблюдения (табл. 3), вода гейзера Шаман оказалась существенно хлоридно-натриевой, с небольшой долей сульфатов. Минерализация ее в 1.5 раза выше общей минерализации воды гейзеров соседней Долины Гейзеров [Набоко, 1954; Устинова, 1955] и

отвечает составу высокотемпературных гидротерм кальдеры Узон, несущих повышенное содержание рудных элементов, таких как As, Sb, Hg, Cu, Zn, Mn, Li, Rb, Cs [Карпов, 1988].

За время наших наблюдений произошли некоторые изменения солевого состава воды (см. табл. 3). В пульсирующем источнике № 81, бывшем на месте гейзера до 2008 г., вода имела высокую общую минерализацию, довольно низ-

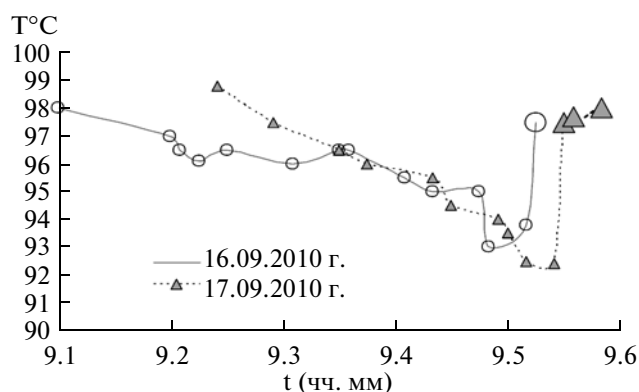


Рис. 6. Графики вариаций температуры воды на устье канала гейзера Шапан в периоды его деятельности с 9 до 10 ч утра 16 и 17 сентября 2010 г. Большой кружок и треугольник обозначают стадии фонтанирования гейзера.

кий рН и более высокое содержание сульфат-иона, чем в гейзере. Меньше было гидрокарбонат-иона и магния, но отмечалось высокое содержание ионов натрия, аммония, калия, хлора, ортокремниевой кислоты.

С переходом пульсирующего источника в гейзерный режим в воде существенно уменьшилось содержание сульфат-иона, увеличилось содержание гидрокарбонат-иона и повысился рН растворов. Остальные компоненты раствора остались без изменения, испытывая закономерные вариации, связанные с потерей паровой фазы.

Высокие содержания в воде в гейзерном режиме таких глубинных компонентов как Cl^- , Na^+ , Li^+ , H_3BO_3 , а также H_4SiO_4 , по нашему мнению, свидетельствуют о том, что при извержении на поверхность выбрасывается не чисто паровая фаза “барботируемая через собственный конденсат” [Дроздин, 2009], а минеральный раствор, вскипающий в незначительном объеме на определенной глубине.

Интерес вызывает глубина вскипания раствора. В известной степени о глубине, с которой вода поступает на поверхность, говорят такие ее параметры как T °C, рН и Eh. В 2010 г. эти параметры существенно изменились, по-видимому, отражая изменение химизма теплоносителя и режима “парлифта”.

В 2010 г. в растворе гейзерной воды во все стадии деятельности немного уменьшилось содержание катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} и анионов Cl^- и SO_4^{2-} , хотя общая минерализация и формула Курлова остались практически неизменными. Обращает на себя внимание высокое содержание в растворе кремниевой кислоты, что подтверждает высокую минерализацию глубинных растворов, вовлекаемых в гейзерный процесс.

Следствием высокой минерализации растворов является и повышенная температура их вскипания. Как известно [Васильев и др., 2007], переход воды из жидкого состояния в пар сопровождается поглощением теплоты испарения, что вызывает понижение температуры деривата. В гейзере Шапан даже после стадии извержения температура в грифоне оставалась выше температуры кипения чистой воды на высоте 652 м, на которой находится гейзер [Кондрашов, 2001]. С учетом минерализации воды (до 3.6 г/л) и атмосферного давления (702 мм рт. ст.) температура кипения раствора гейзера должна быть порядка 97.7°C. Как видно на рис. 6, большую часть времени вода в грифоне гейзера находится в состоянии, близком к кипению. Незначительный перегрев ее в момент извержения обусловлен быстрым притоком высокотемпературного пара и его конденсацией. По аналогии со скв. УК-1, пробуренной в 250 м к ЮВ от гейзера и вскрывшей зону тектонического нарушения на глубине 19.3 м (здесь произошел пароводяной выброс [Карпов, 1988]), мы предполагаем, что паровой резервуар под гейзером Шапан находится на глубине не более 15 м.

Относительно окислительно-восстановительного потенциала (Eh) можно предположить, что он отражает количество восстановленных газов в воде. В 2010 г., до извержения, водная среда имела восстановительные характеристики (Eh = 70–75 мВ), а в период извержения раствор терял восстановленные газы (Eh = 110 мВ) (см. табл. 2). В составе определенных нами свободных газов гейзера преобладает углекислота, но отмечено присутствие сернистого газа, хлористого водорода, сероводорода и большого набора углеводородных газов (табл. 4), характерных для глубинных зон питания гидротермальной системы.

Структурно-тектоническая позиция гейзера и причины его возникновения. Канал гейзера находится на пересечении тектонических трещин субширотного и северо-восточного направлений. Кроме того, линией мелких проколов и парящих площадок с провалами грунта, трассирующихся на гейзер, четко просматривается тектонический контроль субмеридионального направления (см. рис. 3). Но эти трещинные зоны существовали и до появления гейзера. Что же послужило причиной возникновения гейзера на месте ранее существовавшего источника? Можно предположить две версии. Самая простая — это следствие сухого и жаркого лета, когда грунтовые воды иссыкли, а термальное поле сильно подсохло. Вследствие этого уменьшилось разбавление термальных вод, поднялась их температура в приповерхностной зоне и возникли благоприятные условия для вскипания раствора в порово-трещинном пространстве на небольшой глубине. В этом случае можно предположить, что гейзер бу-

Таблица 3. Химический состав (мг/л) воды пульсирующего источника, бывшего на месте гейзера в 2006 г. и гейзера Шаман в 2009 и 2010 гг.

Номер пробы	81	5549	5550	7010	7011	7012
Дата отбора	24.07.2006	17.07.2009	17.07.2009	16.09.2010	16.09.2010	16.09.2010
Период наблюдения	Пульсирующий источник	Самый низкий уровень воды в канале	Период извержения	До извержения	До извержения	Период извержения
T °C	80.00	82.00	94.00	99.00	97.00	98.00
pH	5.15	5.85	6.90	7.44	7.08	7.14
Eh, Мв	—	—	—	-75.00	-70.00	110.00
NH ₄ ⁺	80.0	3.00	1.20	3.80	3.80	3.80
Na ⁺	859.00	1007.00	941.00	812.20	812.20	855.30
K ⁺	71.50	60.90	62.27	51.60	48.10	53.30
Ca ²⁺	44.90	50.00	48.10	41.10	41.10	42.10
Mg ²⁺	0.20	1.20	2.40	1.20	1.20	1.20
Li ⁺	—	4.86	4.77	—	—	—
Fe ²⁺	<0.30	<0.30	<0.30	—	—	—
Fe ³⁺	<0.30	0.09	0.16	—	—	—
Cl ⁻	1365.20	1454.00	1418.00	1223.10	1223.10	1280.20
SO ₄ ²⁻	365.00	23050	230.50	182.50	182.50	201.70
HCO ₃ ⁻	6.10	68.30	56.10	68.30	67.10	68.30
F ⁻	1.70	—	—	1.80	1.70	5.50
H ₃ BO ₃	366.00	412.00	407.80	362.30	380.80	414.80
H ₄ SiO ₄ раств.	247.00	343.70	291.50	250.80	283.80	277.00
H ₄ SiO ₄ кол.	411.00	83.60	116.40	421.20	422.20	435.50
Минерализация	3742.00	3719.55	3587.40	3419.90	3467.60	3638.70
Формула Курлова	$M_{3,74} \times \frac{C182SO_4177HCO_31}{(Na+K)94Ca5NH_31}$	$M_{3,72} \times \frac{C187SO_410HCO_33}{(Na+K)93Ca5Li1}$	$M_{3,59} \times \frac{C188SO_410HCO_32}{(Na+K)93Ca5Li1}$	$M_{3,42} \times \frac{C187SO_410HCO_33}{(Na+K)94Ca5}$	$M_{3,47} \times \frac{C187SO_410HCO_33}{(Na+K)94Ca5NH_31}$	$M_{3,64} \times \frac{C187SO_49HCO_33}{(Na+K)94Ca5NH_41}$

Примечание. Анализы выполнены в ЦХЛ ИВиС ДВО РАН (№ 81 – 12.09.2009, остальные пробы – 22.09.2009). Аналитик С.В. Сергеева. Прочерк обозначает отсутствие данных.

Таблица 4. Химический состав газовой фазы гейзера Шаман (06.09.2009)

Дата анализа	18.09.2009	17.09.2009
Газовый состав	Номер пробы	
	№ 1* (% об.)	№ 2** (% мас.)
CO ₂	89.586	77.32352
H ₂ S	0.79	0.64187
SO ₂	не определялся	12.99868
HCl	не определялся	2.59694
CO	<0.006	0.00025
CH ₄	1.8266	0.35549
H ₂	4.121	0.05381
N ₂	3.15	4.56661
O ₂	0.081	1.37004
Ar	0.01	0.09189
He	0.0004	6.48389
C ₂ H ₆	0.012489	0.00000
C ₂ H ₄	0.000199	0.00000
C ₃ H ₈	0.000199	1.25 · 10 ⁻⁶
C ₃ H ₆	1.6 · 10 ⁻⁶	1.54 · 10 ⁻⁷
C ₄ H ₁₀	<2.1 · 10 ⁻⁶	0.00000
C ₄ H ₁₀ (и)	<2.0 · 10 ⁻⁶	3.27 · 10 ⁻⁷
C ₅ H ₁₂ (н)	<1.2 · 10 ⁻⁶	—
C ₆ H ₁₄	<1.6 · 10 ⁻⁶	—
C ₇ H ₁₆	<1.9 · 10 ⁻⁶	—

Примечание. * – отбор газовой пробы произведен методом вытеснения в бутылку с подсоленной водой. Анализ Ar, N₂, O₂ и CO выполнен на газовом хроматографе Agilent 6890, на капиллярной колонке HP-MOLSIV; CO₂ и H₂S – на капиллярной колонке HP-PLOT Q; предельные и непредельные углеводороды до C₇ были проанализированы на хроматографе SHIMADZU GC-17A; H₂ и He – на хроматографе ЛХМ-80. Аналитик В.И. Гусева. ** – отбор газовой пробы произведен в барбатар с поглотителями. Анализ выполнен на газовом хроматографе ЛХМ-80. Аналитики: В.Н. Шапарь, И.Ф. Тимофеева. Прочерк – не обнаружено.

дет существовать не долго. В периоды дождей, а также интенсивного таяния снега холодная вода будет “задавливать” парообразование. Источник вновь может стать пульсирующим.

Второе предположение связано с проявлением новейшей тектоники. По-видимому, событие 2007 г. – сход каменной лавины в соседней Долине Гейзеров, уничтожившей часть гейзеров [Кирюхин, Рычкова, 2011] и возникновение гейзера в кальдере Узон спустя год, имеет одну и ту же причинно-следственную связь. По нашему мнению, в 2007 г. имела место активизация тектоно-магматической деятельности в крупном блоке земной коры в районе вулкана Кихпиньч. Это подтверждают и исследования [Двигало, Мелекесцев,

2009], а также данные [Кугаенко и др., 2010], согласно которым в районе восточного борта Узон-Гейзерной депрессии имеет место внедрение магматического тела типа силла, приведшее к поднятию поверхности на 15 см в период 2001–2004 гг. В зону воздымания, вероятно, были вовлечены и тектонически-активные участки Восточного термального поля в кальдере Узон. В пользу этого предположения свидетельствуют новообразования в кальдере, возникшие именно в 2007 г. Здесь наблюдалось повышение температуры в оз. Банное до 47°C на поверхности. На Втором участке Восточного термального поля возник крупный грязевой вулкан, а на Первом участке этого поля (недалеко от новообразованного гейзера) осушился большой участок в районе источника Термофильный, где ранее устойчиво существовал крупный плац (т.н. маты) термофильных микроорганизмов. В 2008 г. появились провалы и новые парящие площадки в районе источника “Пульсирующий”, на месте которого осенью 2008 г. и появился гейзер.

Таким образом, мы склоняемся к предположению о том, что возникновение гейзера в кальдере Узон обусловлено вулканотектонической активизацией региона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты измерения температуры с помощью термохрон, максимальная температура в канале гейзера Шаман перед выбросом пароводяной смеси достигала 100.13°C, что гораздо выше температуры кипения воды на высоте проявления гейзера (650 м над уровнем моря) и что свидетельствует о достижении резкого перегрева и вскипания термального раствора в локальном объеме. По нашим данным температурный режим работы гейзера Шаман слабо зависит от вариаций поверхностной температуры воздуха на термальном поле и связан с активностью гидротермальной системы, питающейся теплом и веществом от глубинного теплового потока. Данные второго цикла наблюдений позволили уточнить режим работы гейзера. Для него характерна довольно четкая периодизация деятельности, с некоторыми вариациями минимальной температуры. За один год деятельности сильно изменилась продолжительность стадий в циклах и продолжительность полного цикла работы гейзера, что обусловлено, по-видимому, незавершенностью формирования геометрии канала и резервуара. Это приводит и к нарушению стационарности процесса извержения, и к изменению режима его деятельности со временем.

Об участии в питании гейзера глубинных растворов свидетельствуют высокие содержания бора и кремнекислоты в составе изверженной воды. Исходя из сравнительно малого дебита гейзера,

можно предположить, что подземный резервуар, откуда осуществляется питание гейзера, имеет небольшой объем.

Характерно, что во все периоды наблюдений химический состав изверженной воды остается практически постоянным и одинаковым с составом местных термальных источников, что вместе с высоким градиентом температуры на термальных полях кальдеры Узон может свидетельствовать о том, что резервуар (камера) гейзера находится на небольшой глубине.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00572.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бескровный Н.С., Набоко С.И., Главатских С.Ф. и др.* О нефтеносности гидротермальных систем, связанных с вулканизмом // Геология и геофизика. 1971. № 2. С. 3–14.
- Васильев О.Ф., Овсянникова Т.Э., Прокопьев С.И.* Методы расчета термодинамических свойств воды с повышенной минерализацией / <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/161.pdf>.
- Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканонология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24–37.
- Дроздин В.А.* Новый гейзер в кальдере вулкана Узон // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. Вып. 14. № 2. С. 10–12.
- Карпов Г.А.* Физико-химические условия современного рудоотложения на термальном поле Узона // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 223–231.
- Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. М.: Наука, 1988. 183 с.
- Карпов Г.А., Павлов А.Л.* Узон-Гейзерная гидротермальная рудообразующая система Камчатки. Новосибирск: Наука, 1976. 99 с.
- Кирюхин А.В., Рычкова Т.В.* Условия формирования и состояния гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 238–253.
- Кондрашов А.П.* Справочник необходимых знаний: от альфы до омеги. М.: Рипол-Классик, 2001. 767 с.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю.* Глубинная структура района Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии по данным микросейсмического зондирования // ДАН. 2010. Т. 435. № 1. С. 96–101.
- Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С.* К теории гейзерного процесса // ДАН. 1970. Т. 194. № 2. С. 318–321.
- Набоко С.И.* Гейзеры Камчатки // Труды Лаб. вулканологии и Камчатской вулкан. станции. 1954. Вып. 8. С. 126–209.
- Набоко С.И.* Металлоносность кальдеры Узон // Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. С. 162–195.
- Никитина Л.П., Меняйлов И.А., Шапарь В.Н.* Модификационные методы отбора и анализа вулканических газов // Вулканонология и сейсмология. 1989. № 4. С. 3–15.
- Сугробов В.М.* Характеристика пароводяных разведочных скважин // Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. С. 168–175.
- Устинова Т.И.* Камчатские гейзеры. М.: Государственное издательство географической литературы, 1955. 120 с.

The Evolution of the Behavior and Physico-Chemical Characteristics of Solutions in the New Geyser in Uzon Caldera, Kamchatka

G. A. Karpov^a, A. G. Nikolaeva^a, V. N. Akimov^b, and V. F. Gal'chenko^c

^a Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: karpovga@ksnet.ru

^b Skryabin Institute of Biochemistry and Physiology of Microorganisms, Russian Academy of Sciences, prosp. Nauki 5, Pushchino, Moskovskaya Oblast', 142290 Russia

^c Vinogradskii Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences, prosp. 60-letiya Oktyabrya 7/2, Moscow 117312 Russia

Abstract—This paper is a study of variations in the behavior and physico-chemical characteristics of solutions in the geyser that formed in 2008 in the place of a pulsating spring in Uzon Caldera. We describe the features of this geyser's activity in 2009 and 2010. Overheating of water is for the first time described, rising to reach 100.13°C at the mouth of a geyser during an eruption. We discuss the compositions of the solutions and free gases in the geyser, the possible source depths of the solutions, and the causes of geyser generation.