

УДК 551.234

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВАННЕ ГЕЙЗЕРА ВЕЛИКАН (ДОЛИНА ГЕЙЗЕРОВ, КАМЧАТКА)

© 1999 г. В. А. Дрознин, В. Ф. Бахтияров, В. Е. Левин

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 15.12.97 г.

На основе измерения температур, выполненных с большой дискретностью регистратором, изготовленным в Институте вулканологии ДВО РАН, рассмотрены особенности гейзерного процесса на гейзере Великан, объясняющие нерегулярность его режима. Показано, что механизм реализации гейзерного процесса соответствует “скважинной” модели.

Причины периодической деятельности и особенностей режима каждого конкретного природного гейзера пока остаются открытыми. Имеющиеся теоретические подходы до настоящего времени экспериментально не подтверждены ни на одном природном гейзере [24–27].

Теоретические и лабораторные модели гейзерного процесса основываются на возможных особенностях питания или строения подземной системы, которые и обеспечивают периодичность действия либо за счет несоответствия пропускной способности пласта и выводного канала (скважинная модель [1, 5, 6]), либо за счет сепарации пара (камерная модель [23]), либо за счет смешения вод, различающихся по теплосодержанию и расходу (модель смешения [9, 10, 18, 21]). Качественно каждая из моделей обеспечивает наблюдаемую в природе последовательность фаз активности (излив, извержение, парение, покой), характерных для гейзеров с регулярным режимом [8], но не объясняет механизм работы гейзеров с нерегулярным режимом.

В настоящей работе рассмотрены некоторые особенности гейзерного процесса на примере гейзера Великан, одного из самых крупных гейзеров Долины Гейзеров на Камчатке, на основе температурных измерений, выполненных в августе 1994 г. Температурные измерения выполнены с большей частотой, чем описанные ранее [20].

Динамические характеристики гейзера Великан. Режим гейзера Великан описан в работах [2–4, 11, 13–16], данные о его расходных характеристиках приведены в работах [19, 20].

Извержение начинается с бурного вскипания в ванне гейзера, когда высота бурления достигает 0.5–1 м, и после особо сильного резкого одиночного выплеска вода из ванны выталкивается, как поршнем, и начинает формироваться пароводяная струя.

Вода, выброшенная во время извержения, падает на площадку и мощным потоком устремляется вниз по водотoku. Объем продуцируемой за одно извержение воды оценен с помощью прямого водослива в 20 м³.

Во время кратковременного, но мощного извержения формируется струя высотой 20–30 м. Начальная скорость струи достигает 20 м/с [12].

В результате извержения ванна гейзера полностью опорожняется. Свободный объем гейзера, определенный методом налива холодной воды сразу после извержения, сравним с объемом изверженной воды и также оценен в 20 м³ [14].

Следует отметить, что во время извержения часть извергнутой воды, падающей на площадку гейзера, не попадает в водоток, а сливается обратно в ванну гейзера. Именно охлаждающим влиянием этой воды объясняется резкое прекращение извержения гейзера, продолжительность которого всего 1 мин.

После извержения гейзер интенсивно парит. Парение после извержения связано с тем, что вода, заполняющая ванну, поступает кипящим ключом. Лишь только вблизи поверхности (на последних 0.5 м) кипение прекращается и гейзер фактически перестает парить. Заполнение ванны происходит толчками, свидетельствующими о том, что в системе гейзера по-прежнему имеется пар, но теперь он конденсируется в толще воды, не достигая поверхности.

Когда ванна гейзера наполнится, начинается излив. Фаза излива завершается, когда кипение и выбросы воды перерастают в мощное извержение, в результате которого ванна гейзера опорожняется.

Существенная особенность фазы излива гейзера Великан – наличие периодических промежуточных вскипаний. С достаточно выдержанной дискретностью (~0.5 ч) картина излива повторяется: ванна гейзера заполняется до края водой с

температурой, близкой к температуре кипения, начинается излив с постепенно увеличивающимся расходом. В объеме ванны появляются всплывающие пузырьки пара, и постепенно слегка волнистая поверхность воды приобретает вид "кипящей" поверхности. Площадь "кипящей" поверхности существенно меньше зеркала воды, но постепенно увеличивается. Расход воды и интенсивность кипения возрастают; пузырьковое кипение переходит в бурление, и начинают отмечаться всплески, выбросы воды из ванны. После мощного выброса (высотой 0.5–0.7 м) кипение прекращается, уровень в ванне опускается ниже края, как правило на 0.05–0.07 м, и картина излива вновь повторяется несколько раз. Чтобы подчеркнуть неопределенность продолжительности излива и, соответственно, периода гейзера, оператор В.Н. Нечаев предложил характеризовать период Великана как "плавающий", в отличие от общеизвестных распределений типа "нормальное", "бимодальное" и т.п.

Температура в ванне гейзера Великан. Температуру измеряли с помощью термокосы и накопителя, изготовленного в Институте вулканологии ДВО РАН. Датчики располагали через 1 м (нумерация датчиков от самого глубокого).

Термокосу крепили на основу, которую подбирали в процессе эксперимента. Использовали три варианта: полую дюралюминиевую трубу (радиомачту) длиной 12 м; щуп – нержавеющую трубку диаметром 12 мм, длиной 12 м; буровую штангу. При диаметре 12 мм удавалось погрузить щуп на глубину до 7 м, но во время извержения трубка изгибалась и щуп выбрасывался. Радиомачта не выкидывалась полностью, но приподнималась извержением, и глубина погружения (максимальная в этом варианте 6 м) уменьшалась до 5.5 м. Буровая штанга, хотя и стояла жестко, сама имела длину всего 6 м.

Изготовленный накопитель информации имеет объем памяти 4096 байт и выполнен на основе памяти 537РУ10 и микросхем серии 561. Малое энергопотребление обеспечивает длительную автономность такого накопителя, а герметичный корпус дает возможность использовать его в экстремальных полевых условиях. В качестве термочувствительных элементов использовали термисторы типа ММТ-3. Чувствительность системы определяется динамическим диапазоном одного байта (выбран так, что соответствует 25°C), т.е. $25/256 \approx 0.1^{\circ}\text{C}$. Абсолютная точность системы и долговременная стабильность $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$. Термистор управляет частотой импульсного генератора на микросхеме КР1006ВИ1, которая записывает в память накопителя через задаваемый (от 8 с до нескольких часов) промежуток времени. Потеря старших разрядов при записи в один байт восстанавливается программно при обработке результатов по непрерывности сигнала.

Использованы два четырехканальных накопителя (с общим количеством шесть рабочих каналов) и два контрольных. Сквозная характеристика накопителя с достаточной точностью описывается полиномом второй степени. Калибровку проводили в терминальных ваннах с мало меняющейся температурой ($45, 80$ и 95°C), по результатам которой вычисляли коэффициенты полинома. При калибровке отсутствовала температура 115°C (возможная температура на глубине 7 м), поэтому в этой области абсолютная точность меньше, чем в калибровочном диапазоне, но не хуже 1°C .

Измерения проводили с различной дискретностью: 8 мин при определении общей тенденции изменения температур; 30 с при выявлении амплитуды пульсаций.

Измерения температур в ванне гейзера проводили в августе 1994 г.: с 5 по 7 августа (щуп-радиомачта), 7–9 (щуп-трубка), 10–16 (щуп-штанга). Основные результаты представлены на рис. 1 и в таблице. Контрольный замер с помощью медного термосопротивления выполнен в августе 1995 г. (рис. 2).

На графике изменения температуры в слое на любой глубине в период, предшествующий извержению, фиксируются два экстремума, что позволяет выделить три участка (рис. 1).

Вначале, после извержения, температура повышается и достигает максимума незадолго до начала излива (в среднем за 55 мин), когда уровень воды находится на глубине ~ 20 – 25 см; именно с этого уровня площадь зеркала воды в ванне начинает резко увеличиваться из-за расширения горловины ванны.

Второй участок – понижение температуры до минимума, который достигается через 1 ч после максимума. Разница максимальных и минимальных температур 1 – 2°C .

Затем температура снова начинает возрастать и в большинстве случаев стабилизируется. Существенно, что температура стабилизированного участка фактически не превышает температуру первого экстремума и температурные распределения всегда ниже линии насыщения.

На выявленный общий характер изменения температур накладываются мелкие пульсации с амплитудой 0.5°C , по-видимому, связанные с изменением соотношения количеств пара и воды в объеме ванны, и пульсации, связанные с моментами промежуточных вскипаний (см. далее). На различных глубинах или в слоях изменения температуры после прохождения минимума происходят фактически синхронно. При измерении с дискретностью 30 с каждое вскипание можно сопоставить с пиком повышения температур. При большей скважности измерений пики фиксируются неотчетливо. Пикообразное повышение температуры в слое составляет несколько градусов, а на глубине 2–2.5 м – до 5°C , и только на дан-

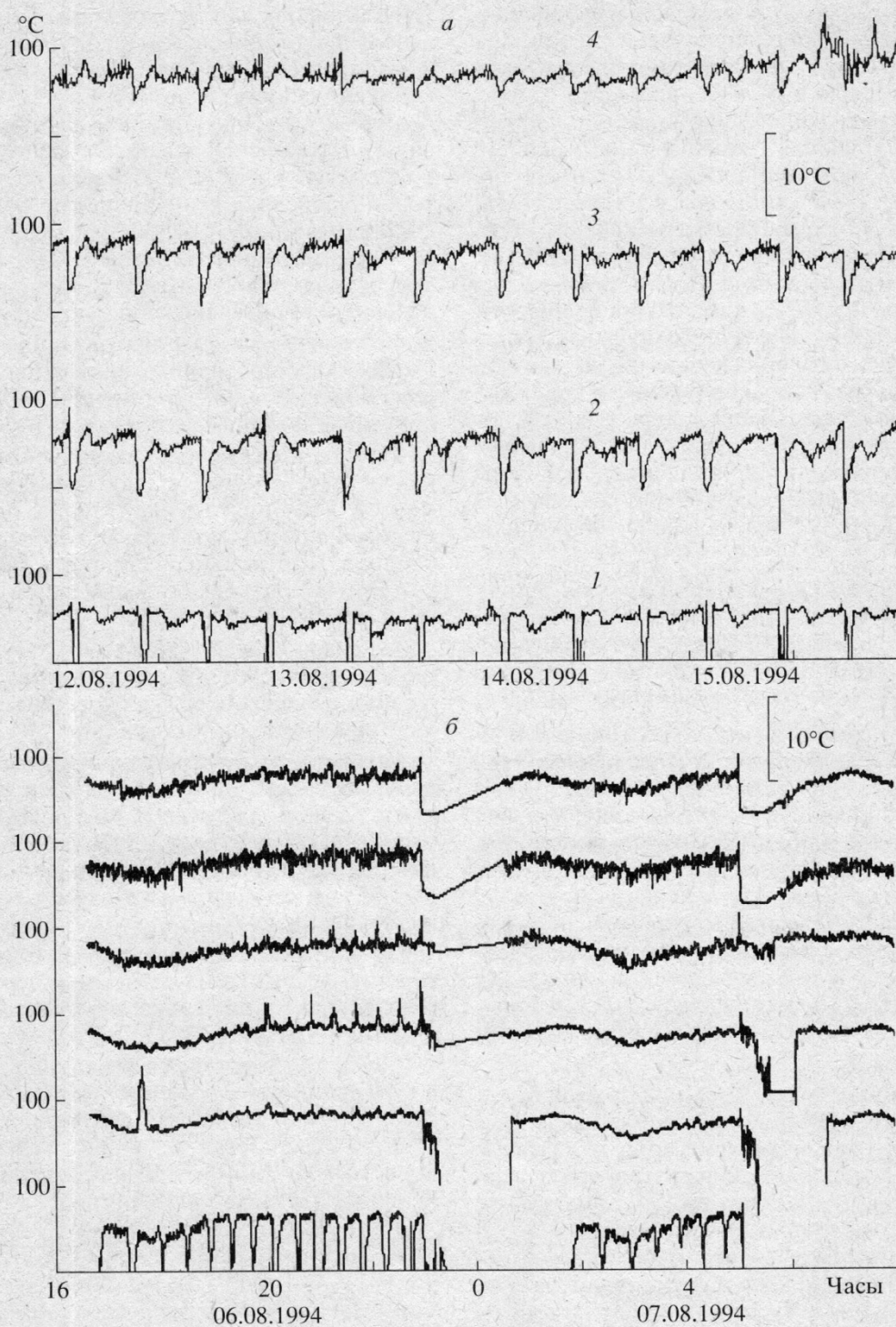


Рис. 1. Циклические изменения температуры в ванне гейзера Великан 12–15.08.1994 г. на глубинах 0, 2, 3 и 5 м (1–4 соответственно) при дискретности изменений 8 мин (а) и 6–7.08.1994 г. на глубинах 0–5 м (1–6 соответственно) при дискретности измерений 30 с (б).

ной глубине температура при этом достигает линии кипения.

Повышение температуры с глубиной не плавное, особенно перед извержением. Наблюдается экстремум на глубине 2–2.5 м.

Анализ данных. Существенная особенность фазы излива гейзера Великан – наличие периодических промежуточных вскипаний (рис. 2). Количество промежуточных вскипаний в среднем было 9–10 при колебании во время измерения от 6 до 17.

Времена достижения максимумов и минимумов температур в ванне гейзера Великан, 1994г.

Дата (число, месяц)	Время (ч. мин/номер датчика)			Продолжитель- ность продукции	Интервал (ч. мин) между		
	максимума	начала излива	минимума		начала извержения	максимумом и минимумом	максимумом и изливом
5.08	18.00/1, 18.17/5	-	18.50, 19.06	21.54	0.50	-	-
6.08	00.06/1, 00.26/5	-	1.32	5.46	1.26, 1.06	-	-
	08.00/1, 08.22/5	-	10.00	13.56	2.00, 2.22	-	-
7.08	-	-	17.50	22.58	-	-	-
	01.08/1, 01.38/5	01.58	02.58	05.04	1.58, 1.20	0.50, 0.20	1.00
	07.10/1, 07.40/5	08.01	08.30	11.28	1.20, 0.50	0.51, 0.20	0.30
	13.20/1, 14.05/5	14.23	-	-	1.03, 0.18	-	-
8.08	-	20.38	21.04	24.03	-	-	0.26
	02.10	02.57	03.40	06.53	1.30	0.47	0.43
	-	09.47	10.06	13.43	-	-	0.19
9.08	22.00	22.52	23.09	27.35	1.09	0.52	0.17
	05.47	06.33	06.50	11.17	1.03	0.36	0.17
11.08	-	-	-	03.06	-	-	-
	05.22	06.23	07.06	10.58	1.44	0.59	0.43
	12.58	-	14.34	19.38	1.36	-	-
12.08	21.50/1, 22.18/5	-	23.00	01.46	1.10, 0.42	-	-
	03.54, 04.26	04.53	05.20	09.22	1.26, 0.57	0.59	0.27
	11.30, 12.10	-	12.56	16.34	1.26, 0.46	-	-
	18.40	-	19.46	23.46	1.06	-	-
13.08	01.54, 02.20	03.00	03.15	08.42	1.21, 0.55	1.00, 0.40	0.15
	11.05, 11.22	12.07	12.34	17.06	1.29, 1.12	1.02, 0.45	0.27
	19.06	20.08	20.50	26.26	1.46	1.02	0.42
14.08	04.40, 05.05	05.34	06.20	10.34	1.40, 1.15	0.54, 0.29	0.21
	12.50, 13.20	13.49	14.10	18.10	1.20, 0.50	0.59, 0.29	0.21
15.08	20.18, 21.00	21.17	22.00	25.30	1.42, 1.00	0.59	0.43
16.08	03.38, 04.10	04.39	05.05	-	1.27, 0.55	1.01, 0.49	0.26
	12.26, 12.42	13.14	13.50	17.30	1.24, 1.08	0.48, 0.32	0.36
	19.30, 19.54	20.26	20.42, 21.30	25.38	1.12, 1.34	0.56, 0.32	0.16, 1.04
17.08	03.54, 04.18	04.42	05.14	09.30	1.20, 0.36	0.48, 0.34	0.32

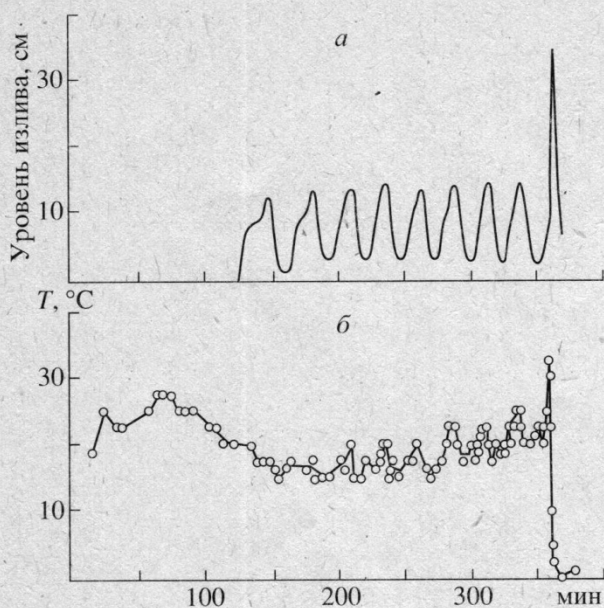


Рис. 2. Изменения уровня воды в ванне гейзера Великан (а) и температуры на глубине 5 м (б) 18.08.1995 г. Излив представляет собой набор малых циклов, оканчивающихся "промежуточными" вскипаниями.

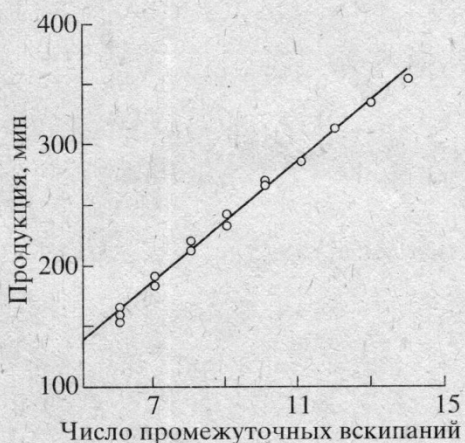


Рис. 3. Зависимость времени продукции гейзера Великан от числа "промежуточных" вскипаний, август 1994 г.

Максимальное зарегистрированное количество малых циклов – 28.

Характерно, что длительность малых циклов не зависит от их количества (рис. 3). Казалось бы естественным, что если в гейзере происходит накопление (аккумуляция) тепла [17, 18], то по мере приближения к моменту извержения длительность малых циклов должна сокращаться. По существу, активность фазы излива можно рассматривать как совокупность малых гейзерных циклов, как и положено, состоящих из излива, извержения (промежуточных вскипаний-выплес-

ков) и покоя, поэтому представляет интерес анализ теплового состояния гейзера в период излива.

Площадь зеркала вод при изливе составляет 12 м^2 [20]. Такая большая площадь выходного сечения оказывает существенное влияние на тепловой режим источника.

В работе [22] приведены расчетные формулы, опробованные при геотермических исследованиях: для расчета интенсивности испарения со спокойной водной поверхности и для расчета дополнительно теряемого тепла с энергично кипящей поверхности. Например, при температуре поверхности воды 100°C и скорости ветра $1\text{--}2 \text{ м/с}$ теплоотдача составит $23\text{--}30 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а дополнительно теряемое тепло при высоте кипения 0.2 м – $146 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, т.е. в сумме $170 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Это значит, что при температуре питающих вод 140°C , которые на поверхность должны были появиться в виде пароводяной смеси, они (при расходе 1 кг/с) будут изливаться в виде горячего ручья при площади выходного сечения $6\text{--}7 \text{ м}^2$ или проявляться в виде кипящего источника (с высотой кипения 0.2 м) при площади всего 1 м^2 .

Расход на изливе, определяемый по скорости заполнения приповерхностного участка ванны – 0.001 м/с (рис. 2), в 1994 г. составлял 1.14 кг/с .

Объем изверженного пара, исходя из диаметра струи, равного 1.4 м [12], скорости выноса и длительности (рис. 4), составляет 1500 м^3 , т.е. масса изверженного пара $\sim 1000 \text{ кг}$. Так как объем извергнутой воды оценивается в 20 м^3 , получим весовое паросодержание 5% или теплосодержание смеси 532 кДж/кг .

Во время извержения паросодержание, как правило, для гейзеров с изливом должно быть выше среднего за период. Но даже при значении теплосодержания 532 кДж/кг и расходе 2 кг/с из-за большой поверхности ванны гейзер Великан (в соответствии с примером расчета, приведенным выше) должен бы работать в режиме кипящего источника.

Как отмечено, первый экстремум, соответствующий максимуму температуры, достигается при заполнении ванны до уровня 0.25 м , когда площадь зеркала вод оценивается в 6 м^2 . Это позволяет по значению теплоотдачи, составляющей 126 кДж/с , оценить энтальпию питающих вод в 525 кДж/кг .

Полезно напомнить график распределения температур (рис. 5), полученный на скважине Р-1, работавшей в гейзерном режиме, и вывод о том, что температурное распределение в канале после извержения близко к линии насыщения, а затем, по мере подъема, несколько выполаживается, растягивается. По аналогии, для гейзера Великан можно полагать, что температура (теплосодержание) вод, поступающих в ванну, должна постепенно повышаться от 98°C до температуры глу-

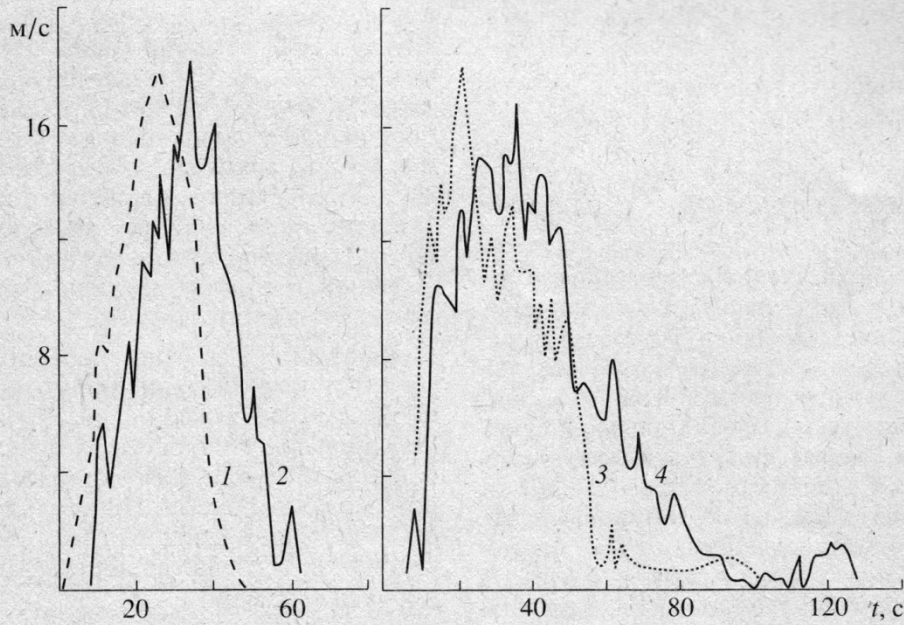


Рис. 4. Начальная скорость пароводяного потока при извержении гейзера Великан (измерение гидрометрической вертушкой, 1986 г.). Начало извержения: 1 – 23 ч 11 мин; 2 – 24 ч 11 мин; 3 – 01 ч 10 мин; 4 – 03 ч 10 мин.

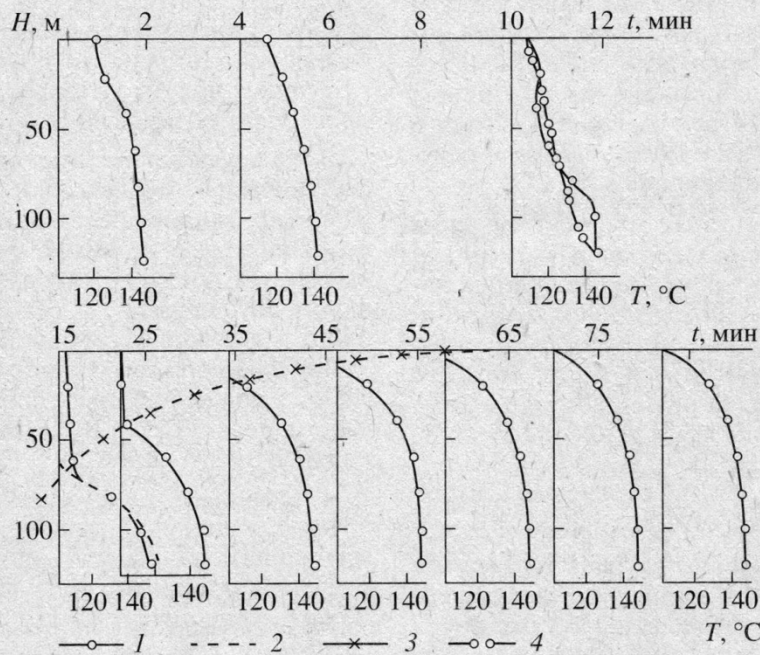


Рис. 5. Распределение температур в Паужетском геотермальном месторождении с момента начала извержения в скв. Р-1, работающей в гейзерном режиме: 1 – температура в стволе скважины; 2 – температурное распределение в столбе воды, соответствующее линии насыщения; 3 – уровень воды в стволе скважины; 4 – расчетное распределение температур при оптимальном расходе.

бинных питающих вод. Именно поэтому температуры вод при заполнении ванны растут. Однако при дальнейшем заполнении площадь зеркала вод, а с ней и теплоотдача увеличиваются быстрее, чем температура вод, поступающих в ванну, поэтому происходит падение температур вод в

ванне. После начала разлива (в среднем через 30 мин), когда площадь зеркала вод постоянна, снова отмечается повышение температур в ванне. Но теперь уже теплосодержание питающих вод, оцениваемое по теплоотдаче, приближается к 625 кДж/с (несколько меньше, так как не вся

площадь имеет температуру, близкую к кипению).

Минимум температур наблюдается в среднем через 30 мин после начала излива. Следовательно, объем воды, поступившей в ванну и имеющей температуру ниже температуры питающих вод, на 2 м^3 больше объема ванны (ранее оцененного в 20 м^3).

Этот факт можно объяснить следующим образом. Исходя из того, что максимальные значения температуры в ванне даже на глубине 7 м не превышают 108°C , перед извержением в объеме выброшенной воды средняя температура 106°C , и из нее может образоваться лишь 200 кг пара. Среднее теплосодержание во время извержения оценено в 532 кДж/кг, количество пара – в 1000 кг, поэтому следует полагать, что большая часть пара образуется из более глубинных вод, остающихся в канале после извержения. Если далее полагать, что значение теплосодержания глубинных вод 625 кДж/кг, то для образования соответствующего количества пара при снижении теплосодержания до 525–545 кДж/кг необходим объем глубинных вод, сравнимый с объемом выброшенных. Очевидно, при этом понижается и температура стенок канала. Перед следующим извержением [7] они должны быть снова прогреты, естественно, за счет питающих глубинных вод, что увеличивает объем вод, остающихся в канале после извержения и имеющих температуру ниже температуры питающих вод.

Несмотря на то что характер распределения температур для различных периодов однотипен, конкретные значения различны. Можно полагать, что это обусловлено различием конвекционных ячеек в объеме ванны. Все измерения температур проводили фактически в одном месте (наибольшего погружения щупа). Именно в этом месте также отмечается зарождение выплесков. Более представительные данные могут быть получены в дальнейшем при пространственном измерении температур в объеме ванны.

По этой же причине не могут быть достаточно точно охарактеризованы условия начала извержения. Можно лишь утверждать, что уже через 1–1.5 ч после начала излива температура в объеме ванны фактически не увеличивается. Из-за большой площади зеркала вод любые возможные флюктуации в расходе питающих вод, в том числе и связанные с регулярно происходящими малыми циклами, не приводят к повышению температур, просто увеличивается теплоотдача с кипящей поверхности. Малый цикл, по существу являющийся внутренним извержением, провоцирует и основное извержение, когда накладывается на такое конвекционное распределение температур, что небольшого кратковременного повышения температур оказывается достаточным, что-

бы на глубине 2–2.5 м произошло вскипание, причем по всему сечению ванны. С таким резким и мощным выносом тепла поверхность уже не справляется. Сброс давления из-за частичного опорожнения ванны выводит на линию насыщения и воды, находящиеся глубже. В этот момент, предшествующий извержению, гейзер особенно чувствителен к внешним воздействиям. Небольшого усиления ветра достаточно, чтобы из-за увеличения теплоотдачи основное извержение не могло быть спровоцировано.

Выводы. 1. Основная особенность режима гейзера Великан – наличие ритмично происходящих промежуточных вскипаний, служащих проявлением гейзерного процесса с периодом чуть менее 0.5 ч, реализующегося по механизму “скважинной” модели процесса. Нерегулярность (“плавающий” период) основного извержения обусловлен строением гейзера: наличием ванны с большой площадью сечения.

2. Объем продуцируемой в основное извержение пароводяной смеси сравним с объемом ванны гейзера, но теплосодержание смеси существенно выше теплосодержания воды в объеме ванны, что свидетельствует об образовании пара в более глубокой части подводящего канала. Данные по измерению температур показывают, что объем глубинных вод, из которых этот пар образуется, превышает объем ванны более чем на 2 м^3 .

3. Распределение температур в ванне гейзера фактически не меняется через 1–1.5 ч после начала излива в течение нескольких часов до момента основного извержения. Несмотря на то что в ванну гейзера поступает вода, ранее не затронутая парообразованием, т.е. с теплосодержанием глубинных вод (ориентировочно 625 кДж/кг), из-за значительной теплоотдачи с большой площади зеркала вод не наблюдается образования пароводяной смеси. Гейзер Великан работает в режиме кипящего источника.

4. Основное извержение (образование пара в объеме ванны) инициируется промежуточным вскипанием или собственно гейзерным процессом (малым циклом), присущим гейзеру Великан. Для этого необходимо, чтобы интенсивность образования пара при извержении в малом цикле была достаточной для образования паровой полости, действующей как поршень, резко выталкивающий верхний слой воды из ванны, тем самым (из-за понижения давления) выводя более глубокие слои на линию насыщения. Это условие достигается по мере прогрева поднимающейся водой стенок канала гейзера, охлажденных во время основного извержения.

5. Уточнение количественных оценок требует более подробного определения распределения температур в ванне и более точной оценки количества изверженного пара. Экспериментальное

определение температур в объеме ванны представляет также интерес для изучения механизма теплообмена в источниках с большой поверхностью места выхода.

Авторы выражают благодарность Г.А. Карпову за содействие в проведении работ.

Работы выполнены при поддержке дирекции Кроноцкого государственного биосферного заповедника и Камчатского областного экологического фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьев В.В.* Особенности динамики пароводяных скважин // Тр. Лаб. вулканологии. 1960. Вып. 18. С. 113–122.
2. *Виноградов В.Н.* Камчатские гейзеры // Материалы II Науч. совещ. географов Сибири и Дальнего Востока. 1962. Вып. 1. С. 50–56.
3. *Виноградов В.Н.* О режиме Камчатских гейзеров // Вопросы географии Камчатки. 1964. Вып. 2. С. 70–81.
4. *Виноградов В.Н.* Долина Гейзеров // Вопросы географии Камчатки. 1965. Вып. 3. С. 37–50.
5. *Дрознин В.А.* Гидродинамика пароводяных скважин // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 262–265.
6. *Дрознин В.А.* Физика вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
7. *Дрознин В.А.* К теории действия гейзеров // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5. С. 49–60.
8. *Дрознин В.А., Разина А.А.* О природе гейзерного режима // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1977. С. 96–103.
9. *Мержанов А.Г., Разина А.А., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С.* Лабораторная модель гейзера // Докл. АН СССР. Сер. геофиз. 1973. Т. 211. № 3. С. 584–587.
10. *Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С.* К теории гейзерного процесса // Докл. АН СССР. Сер. геофиз. 1970. Т. 149. № 2. С. 318–321.
11. *Набоко С.И.* Гейзеры Камчатки // Тр. Лаб. вулканологии. 1954. Вып. 8. С. 126–210.
12. *Руленко О.П., Ким К.П.* Измерение акустического шума и высоты выброса воды при извержении гейзеров Великан, Большой и Малый // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 88–92.
13. *Сугрובה Н.Г.* Режим гейзера Великан // Вопросы географии Камчатки. 1982. Вып. 8. С. 66–68.
14. *Сугрובה Н.Г.* Некоторые закономерности режима гейзеров Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 35–48.
15. *Устинова Т.И.* Камчатские гейзеры. М.: География, 1955. 120 с.
16. *Хаткевич Ю.М.* Режим Камчатских гейзеров и суммарная разгрузка термальных вод долины реки Гейзерной // Вопросы географии Камчатки. 1970. Вып. 6. С. 93–95.
17. *Штейнберг Г.С.* Об энтальпии теплоносителя и энергии извержения гейзера Великан // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250. № 5. С. 1215–1221.
18. *Штейнберг Г.С.* Вулканические взрывы и гейзеры: физический механизм процессов и их соотношение: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 1988. 49 с.
19. *Штейнберг Г.С., Мержанов А.Г.* Исследование массовых и динамических параметров гейзера Великан методом химического зондирования // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 4. С. 943–948.
20. *Штейнберг Г.С., Мержанов А.Г.* Гейзер Великан: динамика расхода в естественном и экспериментальном режимах // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295. № 1. С. 180–184.
21. *Allen E.T., Day A.L.* Hot Springs of the Yellowstone National Park. Publ. 466 Carnegie Inst. Washington, 1935. 525 p.
22. *Dawson G.S.* The nature and assessment of Heat from Hydrothermal Areas. N.Z.J. // Geod. Geophys. 1954. V. 7. P. 105–155.
23. *Iwasaki I.* Geochemical investigation of Geysers in Japan // Bull. Tokyo Inst. Technol. 1962. № 46. 60 p.
24. *Lloyd E.F.* Geology of Whakarewarewa Hot Springs. N.Z. Geological Survey, DSIR, Rotorua, 1975. 24 p.
25. *Rinehart J.S.* Geysers and Geothermal Energy. N.Y.; Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 1980. 223 p.
26. *White D.* Some principles of geyser activity, mainly from Steamboat Springs, Nevada, Amer. // J. Sci. 1967. V. 265. P. 641–684.
27. *White D.E.* Hydrology, activity and heat flow of the Steamboat Springs thermal system, Washoe County, Nevada, US. Gtjl. Surv. Prof. Paper, 1968. № 458-C. 109 p.