

УДК 550

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ИЗВЕРЖЕНИЙ ГЕЙЗЕРА

© 1999 г. А. С. Штейнберг

Представлено академиком В.Е. Захаровым 05.01.99 г.

Поступило 18.01.99 г.

Около тридцати лет автор с сотрудниками исследует тепловой и массовый баланс природных гейзеров и их лабораторных моделей [1–8]. Одной из главных целей этой работы являлось изучение механизма подготовки извержения, определение зависимости периода гейзера от геометрических характеристик системы, а также расходных и термодинамических параметров процесса. Периодичность процесса является основной особенностью, отличающей гейзеры от других гидротерм. После продолжительной стадии покоя происходит извержение, длительность которого на 1–1.5 порядка короче стадии покоя. Анализируя физику гейзерного процесса, мы, как и другие исследователи, основное внимание уделяли стадии покоя. Процесс собственно извержения и его связь со стадией покоя оставались практически неизученными. Между тем при рассмотрении закономерностей развития этих основных стадий наиболее интересным является вопрос: какая из них является “главной”, а какая “зависимой”? Поскольку при извержении происходит интенсивное выделение энергии, накопленной в стадии покоя, можно предположить один вариант причинно-следственной связи, в котором характеристики извержения обусловлены параметрами предшествовавшей ему стадии покоя.

С другой стороны, вполне оправданной является и противоположная точка зрения. Ведь указанная аккумуляция энергии осуществляется в процессе заполнения горячей водой пустот, образовавшихся после извержения. Кроме того, в рассматриваемой стадии покоя значительная часть поступающего тепла тратится на нагрев воды, охладившейся в результате сброса давления и вскипания в процессе извержения и оставшейся после него внутри гейзера. Иными словами, стадия покоя наследует обстановку, возникшую в процессе извержения, т.е. ее параметры могут зависеть от параметров извержения. Задачей настоящей ра-

боты являлось решение этой проблемы путем постановки целенаправленных экспериментов и анализа их результатов.

Были обработаны данные по непрерывному мониторингу натурального гейзера Старый Служака (Old Faithful, Calistoga, California, USA). Кроме того, осуществлялся мониторинг извержений в лабораторной модели гейзера, описанной в [2, 5].

В качестве параметров, количественно характеризующих особенности процессов в обеих стадиях, использовались величины их длительности. В циклическом ряду ...–извержение–покой–извержение–покой–... регистрировались величины продолжительности каждой отдельной стадии: ... $t_{1,n-1}$, $t_{2,n-1}$; $t_{1,n}$, $t_{2,n}$; $t_{1,n+1}$, $t_{2,n+1}$; ... Здесь индекс 1 относится к стадии извержения, а индекс 2 – к стадии покоя, следующей за данным извержением; индексы ... $n-1$, n , $n+1$... обозначают порядковые номера циклов. Полный n -й период гейзера, $T_n = t_{1,n} + t_{2,n}$.

Рассмотрим вначале данные по мониторингу натурального гейзера. Режим работы гейзера Старый Служака в Калистоге длительное время с успехом изучается инициативной группой с участием хранителя гейзера Ольги Кольбек и доктора Пол Силвер [9, 10]. В указанных работах получены, в частности, данные, подтверждающие вывод [11] о вариации полных периодов некоторых гейзеров с изменением сейсмической обстановки в регионе. Анализ роли стадий извержения в циклическости гейзера в этих работах не проводился.

Ольга Кольбек, первой начавшая и продолжающая в настоящее время мониторинг гейзера Старый Служака, по просьбе автора любезно предоставила ему данные, включающие наряду с полными периодами T_n также записи начала и конца извержений. В связи с задачей нашего исследования из этих данных в дальнейшем были отдельно рассчитаны ряды длительностей соответствующих стадий извержения $t_{1,n}$ и покоя $t_{2,n}$.

Обработка типичного ряда данных по мониторингу в период 5–6 июля 1997 г., включающая 340 циклов, показала, что для длительностей и извержений $t_{1,n}$ и стадий покоя $t_{2,n}$ характерны

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской Академии наук, Черноголовка Московской обл.

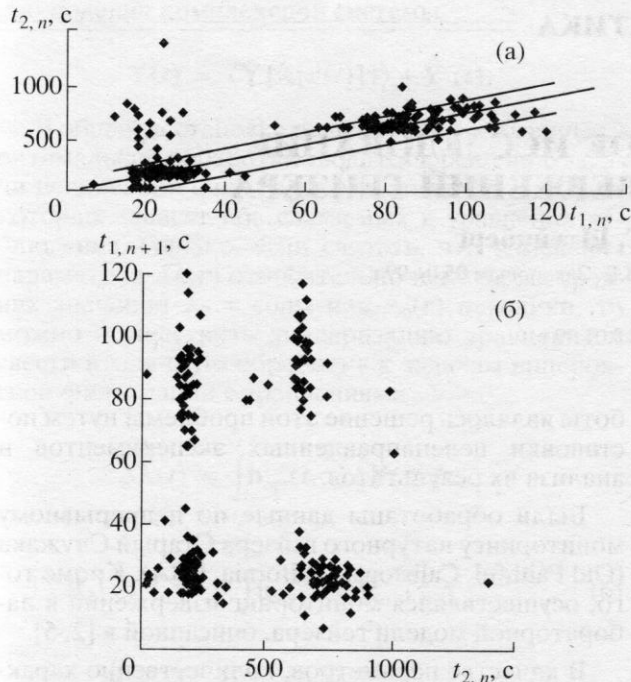


Рис. 1. Мониторинг гейзера Старый Служака (Old Faithful, Calistoga) 5–6 июля 1997 г. а – зависимость продолжительности стадии покоя $t_{2,n}$ от длительности предшествовавшего извержения $t_{1,n}$; б – отсутствие зависимости продолжительности стадии извержения $t_{1,n+1}$ от длительности предшествовавшей стадии покоя $t_{2,n}$.

бимодальные распределения. Наиболее частыми величинами, которым соответствуют максимумы на кривых распределения, являются $t_{1,n} = 22$ с и $t_{1,n} = 85$ с, а также $t_{2,n} = 170$ с и $t_{2,n} = 630$ с. В пределах каждой первой моды распределения близки к пуассоновскому.

На рис. 1а приведена зависимость продолжительности стадии покоя $t_{2,n}$ от длительности предшествовавшего извержения $t_{1,n}$. Несмотря на заметный разброс точек, можно сделать однозначный вывод, что искомая зависимость существует и для данного гейзера она близка к линейной. Отсутствие обратной зависимости – связи длительности извержения с продолжительностью предшествовавшей ему стадии покоя – наглядно подтверждается данными, представленными на рис. 1б. Более того, расположение скоплений точек в углах характерного “квадрата” соответствует наличию двух несвязанных между собой случайных процессов, имеющих бимодальное распределение вероятностей [12].

Приведенные результаты дают ответ на вопрос, сформулированный в начале сообщения. Очевидно, что собственно извержение является сугубо стохастическим процессом. Его длительность определяется особенностями самого извержения и не связана с характеристиками (в частности, с продолжительностью) предшествовавшей

стадии покоя. Напротив, стадия покоя, несмотря на кажущуюся стохастичность, на самом деле является детерминированной. Ее длительность определяется продолжительностью предшествовавшего извержения.

Приведенные выводы, сделанные на основе мониторинга натурального гейзера, полностью согласуются с данными по физическому моделированию гейзерного процесса в лаборатории. Эксперименты проводили на прозрачной стеклянной модели гейзера, использующей в качестве рабочей жидкости фреон 113. Результаты 350 циклов извержений в модели, обработанные по той же схеме, которая использовалась для данных по мониторингу натурального гейзера (рис. 1), приведены на рис. 2*. Отметим практически полное сходство между рис. 2а и 1а и между рис. 2б и 1б. В лабораторной модели, как и в натурном гейзере, длительность извержения не зависит от продолжительности стадии покоя, в то время как последняя пропорциональна длительности предшествовавшего ей извержения.

Использование стеклянной модели, снабженной термомпарами, позволило дать объяснение качественному различию в развитии двух стадий гейзерного процесса – стохастичности извержения и детерминированности покоя. Это различие обусловлено макрокинетическими факторами. На основании лабораторных опытов, подтвержденных калориметрическими измерениями на натуральных гейзерах Камчатки [4], нами было показано, что извержение начинается после накопления внутри системы определенного количества тепла $Q_2 = m_2 J_2$, где m_2 и J_2 – масса и средняя энтальпия воды перед извержением в зоне, охваченной развитой свободной конвекцией. Конвективный нагрев воды во внутренних объемах системы сопровождается периодически возникающими пространственными температурными неоднородностями. Численные оценки, согласующиеся с данными по температурному каротажу гейзеров, свидетельствуют о том, что характерные времена релаксации этих неоднородностей (секунды в модели, десятки секунд в натуральных гейзерах) малы по сравнению с длительностью $t_{2,n}$ стадии покоя. В результате на протяжении почти всей этой стадии случайно возникающие температурные неоднородности успевают быстро срелаксировать и на пространственно-временных закономерностях прогрева системы их наличие практически не отражается. Вот почему величина Q_2 (тепло, накопленное в системе к концу стадии покоя – началу

* Данные, приведенные на рис. 2а и 2б вместе с заключением о стохастичности стадии извержения и детерминированности стадии покоя гейзера, были доложены летом 1995 г. на конференции Международного союза вуканологов в рамках XXI Генеральной ассамблеи МГГС (г. Болдер, Колорадо, США) и включены в сборник тезисов Ассамблеи [13]. Однако в то время еще не была проведена проверка этих выводов на натурном гейзере.

извержения) и в натуральных гейзерах, и в их лабораторных моделях воспроизводится от начала одного извержения к началу следующего с очень высокой степенью точности.

По мере развития стадии извержения зона спонтанного вскипания метастабильно перегретой воды непрерывно углубляется. В результате все большее количество депарированной, т.е. остывшей воды попадает на стенки канала и, стекая по ним, возвращается внутрь системы. Таким образом, по своему эффекту этот процесс аналогичен непрерывно возрастающему подводу низкоэнтальпийной (т.е. относительно холодной) воды внутрь гейзера. Перемешивание ее с поступающей снизу горячей водой снижает температуру последней. Кроме того, нарастающая в верхней части двухфазной колонны на значительном расстоянии от дневной поверхности “шапка” остывшей воды способствует конденсации поднимающихся из глубины пузырей пара. Это снижает мощность парового потока и также приводит к снижению выноса воды из гейзера. Но без достаточно интенсивного выноса воды из канала, происходящего в форме так называемых спазматических пульсаций, не может происходить быстрый спад давления. Это приводит к нарушению главной положительной обратной связи, необходимой для обеспечения самоподдерживающегося процесса извержения, реализации его в режиме низкочастотных автоколебаний выброса пароводяной смеси. Очевидно, что уменьшение массы воды и ее средней энтальпии в области, охваченной интенсивным перемешиванием, может продолжаться вплоть до достижения некоторой критической величины общего теплосодержания $Q_{1,n} = m_{1,n}J_{1,n}$, где $m_{1,n}$ и $J_{1,n}$ – величины, соответствующие концу стадии извержения. Калориметрические исследования, выполненные методом гидрозондирования на натурном камчатском гейзере Котегей [4], так же, как термометрические измерения процесса извержения в лабораторной модели, показали, что в отличие от Q_2 величина $Q_{1,n}$ не только не является постоянной, но варьируется от цикла к циклу в достаточно широких пределах. Этот факт связан с тем, что собственно извержение сопровождается специфическим так называемым “снарядным” режимом течения, когда все сечение гейзерного канала заполнено чередой отдельных пузырей (“снарядов”), длина которых много больше диаметра канала (лабораторная модель) или его ширины (натурный гейзер). Наличие этих крупных пузырей так же, как реализация во время извержения объемных паровых взрывов метастабильно перегретой воды, приводит к появлению больших пространственных фазовых и температурных неоднородностей. Видеосъемка процесса в прозрачной модели, а также его термометрия, выполненная и на модели, и на натуральных гейзерах, свидетельствуют о том, что

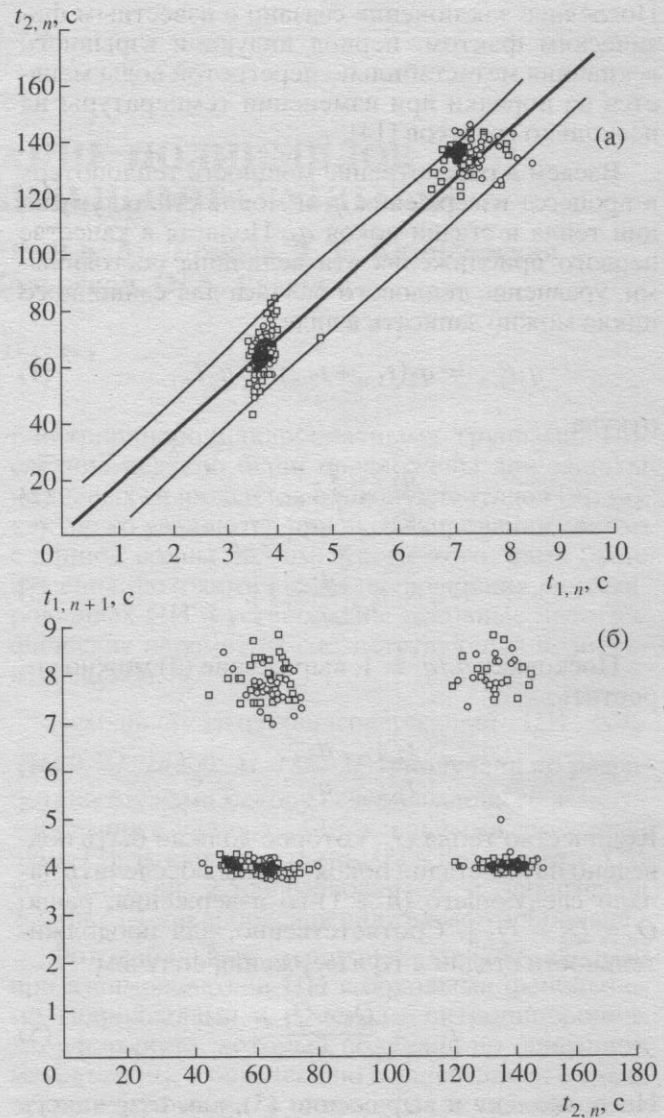


Рис. 2. Мониторинг извержений в лабораторной модели гейзера (рабочая жидкость – фреон 113). а – зависимость продолжительности стадии покоя $t_{2,n}$ от длительности предшествовавшего извержения $t_{1,n}$; б – отсутствие зависимости продолжительности стадии извержения $t_{1,n+1}$ от длительности предшествовавшей стадии покоя $t_{2,n}$.

характерные времена существования неоднородностей (по крайней мере, температурных) соизмеримы или даже превышают длительность самого извержения. Этот вывод согласуется и с оценочными теплофизическими расчетами. В результате от извержения к извержению заметно варьируются конечные величины m_1 и J_1 и, соответственно, $Q_1 = m_1J_1$.

Очевидно, что элемент случайности в остановке извержения в немалой степени связан с особенностями образования, расширения и движения паровых “снарядов” – крупногабаритных продуктов взрыва метастабильно перегретой воды.

Последнее заключение связано с известным физическим фактом: период индукции взрывного вскипания метастабильно перегретой воды меняется на порядки при изменении температуры на несколько градусов [14].

Введем в рассмотрение мощность теплотерь в процессе извержения q_1 и мощность аккумуляции тепла в стадии покоя q_2 . Полагая в качестве первого приближения эти величины постоянными, уравнение теплового баланса для единичного цикла можно записать в виде

$$q_1 t_{1,n} = q_2(t_{1,n} + t_{2,n}) = q_2 T_n, \quad (1)$$

откуда

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{T_n}{t_{1,n}}, \quad (2)$$

$$t_{2,n} = t_{1,n} \left[\frac{q_1}{q_2} - 1 \right]. \quad (3)$$

Поскольку $q_1/q_2 \gg 1$, выражение (3) можно упростить:

$$\frac{t_{2,n}}{t_{1,n}} = \frac{q_1}{q_2}. \quad (4)$$

Количество тепла Q_n , которое должно быть подведено на n -й стадии покоя, чтобы обеспечить начало следующего ($n + 1$)-го извержения, равно $Q_n = Q_2 - Q_{1,n}$. Соответственно, для продолжительности стадии n -го извержения получим

$$t_{1,n} = \frac{Q_2 - Q_{1,n}}{q_1}. \quad (5)$$

Но поскольку в выражении (5), как отмечалось выше, $Q_2 = \text{const}$, а величина $Q_{1,n}$ стохастическая, стохастической является и величина $t_{1,n}$.

Соотношение (4) показывает, что угол наклона прямых на рис. 1а и 2а равен отношению средней мощности энерговыделения при извержении к средней мощности накопления энергии в стадии покоя. Эта безразмерная величина может быть использована для сравнительного анализа различных физических моделей, описывающих, в частности, изменение гейзерного режима при вариации внешних (в том числе сейсмических) условий. Так, согласно модели [14], учитывающей уменьшение водопроницаемости грунтов под действием роста сжимающих напряжений, уровень q_2 должен также уменьшаться. Поскольку $q_1 = \text{const}$, угол наклона прямой на графике $t_{2,n} = t_{2,n}(t_{1,n})$ (аналогичном рис. 1а), равный отношению q_1/q_2 , должен возрастать по мере роста напряжений и приближения землетрясения в данном регионе. В модели [2, 5, 7], учитывающей уменьшение $t_{2,n}$ вследствие снижения затухания микросейсм в бо-

лее сжатом грунте, рассматриваемый угол должен уменьшаться.

Рассмотренный механизм автоколебаний, в одиночном цикле которых характеристики стохастической стадии разгрузки обуславливают параметры следующей за ней стадии накопления, по видимому, является достаточно распространенным в природных объектах. Его использование представляется плодотворным для исследования периодичности извержений вулканов, а также при анализе некоторых нелинейных явлений, рассматриваемых в общей теории катастроф.

Автор выражает глубокую признательность О. Кольбек и А. Ефимовой за предоставление данных по мониторингу природного гейзера и помощь в их обработке, президенту ГТЕ (Калифорния) Н. Гузику за предоставление возможности провести компьютерный мониторинг на лабораторной модели гейзера, акад. А.Г. Мержанову, акад. В.Е. Захарову и акад. В.Е. Фортову за внимание к работе и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С. // ДАН. 1970. Т. 194. № 2. С. 318–321.
2. Steinberg G.S., Merzhanov A.G., Steinberg A.S. // Modern Geology. 1981. V. 8. P. 67–86.
3. Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С., Мержанов А.Г., Фундаментский В.С. // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 105–111.
4. Steinberg G.S., Merzhanov A.G., Steinberg A.S. // J. Volcanol. and Geotherm. Res. 1978. V. 3. P. 99–119.
5. Штейнберг А.С., Мержанов А.Г., Штейнберг Г.С. // Геохимия. 1974. № 2. С. 277–290.
6. Штейнберг Г.С., Штейнберг А.С., Боровинская И.П., Мержанов А.Г. // ДАН. 1981. Т. 258. № 3. С. 727–731.
7. Shteinberg A.S., Merzhanov A.G., Shteinberg G.S. In: Heat Transfer 1990 – Proc. IX Intern Heat Transfer Conf. Jerusalem, Israel, 1990. V. 16-TR-7. P. 323–328.
8. Штейнберг Г.С., Штейнберг А.С., Мержанов А.Г. // Природа. 1984. № 4. С. 32–47.
9. Silver P.G., Valette-Silver J.N., Linde A.T., Kolbek O. // EOS. 1989. V. 71. № 43. P. 1461.
10. Silver P.G., Wakita H. // Science. 1996. V. 273. P. 77–78.
11. Rinehart J.S., Murphy A. // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. № 2. P. 574–575.
12. Гнеденко Б.В. Теория вероятности. М.: Наука, 1980.
13. Steinberg A.S., Taratorin A.M., Khitrov M.L. Proc. XXI General Assembly of the IUGC. Boulder (Color), 1995. Abstr. WB. P. B-412.
14. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972.
15. Ingebritsen S.E., Rojstaczer S.A. // J. Geophys. Res. B. 1996. V. 101. № 10. P. 21,891–21,905.