Первое экспериментальное подтверждение периодической деятельности гейзера с питающей системой камерного типа

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.

First experimental confirmation of periodic eruptions of a geyser with bubble trap-type feeding system

Belousov A.B., Belousova M.G.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: belousov@mail.ru

В ИВиС ДВО РАН создана крупномасштабная экспериментальная установка для физического моделирования действия гейзера с подводящей системой камерного типа (*bubble trap*). Проведена первая серия экспериментов, которая подтвердила, что этот тип питающей системы обеспечивает и объясняет периодический режим действия природных гейзеров.

Введение

Гейзер – это гидротермальный источник, периодически выбрасывающий на поверхность пароводяную смесь [2]. Неотъемлемой чертой гейзера является прерывистость деятельности: выброс воды и пара прерывается стадиями покоя, когда на поверхность земли ничего не поступает, а происходит постепенное заполнение подводящей системы гейзера, опустошенной в ходе предшествующего извержения. По соотношению вода/пар и по интенсивности процесса извержение гейзера подразделяется на стадии излива (спокойное истечение воды), фонтанирования (бурный выброс воды и пара) и парения (выброс пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью). Эта последовательность стадий извержения и покоя циклически повторяется с определенным временным интервалом. Интервал между начальными моментами двух одинаковых, последовательно повторяющихся стадий называется периодом извержений или периодом гейзерного цикла. Если деятельность гейзера включает все описанные выше стадии, то такая последовательность называется классической, а гейзерный цикл – полным. Показательно, что при имеющемся большом разбросе в размерах существующих природных гейзеров, динамика их деятельности (циклический и многостадийный процесс) даже в деталях проявляет удивительное подобие, что указывает на единый физический механизм, лежащий в основе этого природного феномена.

Механизмы периодического действия гейзеров

Поиск причин периодического действия гейзеров ведется с момента первого описания европейскими учеными Большого гейзера Исландии, когда Маккензи в 1811 г. [10] интуитивно предположил наличие в его питающей системе полости, частично заполненной водой и паром и соединенной с земной поверхностью сильно изогнутым каналом в форме сифона (рис. 1). Главной проблемой механизма Маккензи являлась постулированная, чисто умозрительная сложная геометрия подводящей системы гейзера, формирование которой на тот момент не имело геологического обоснования.

Альтернативное объяснение периодических извержений Большого гейзера Исландии было предложено Бунсеном в 1847 г. [7]. Оно опиралось на выполненные им измерения распределения температур в канале гейзера. Бунсен предположил, что подводящая система гейзера – это прямой вертикальный канал, который полностью заполнен водой. В нижней части канала вода перегрета, и ее кипению препятствует гидростатическое давление. При появлении в канале первых пузырьков пара вытесненная ими вода сливается из верхней части канала, уменьшая гидростатическое давление в системе гейзера. При этом перегретая вода резко вскипает, и происходит фонтанирование гейзера.

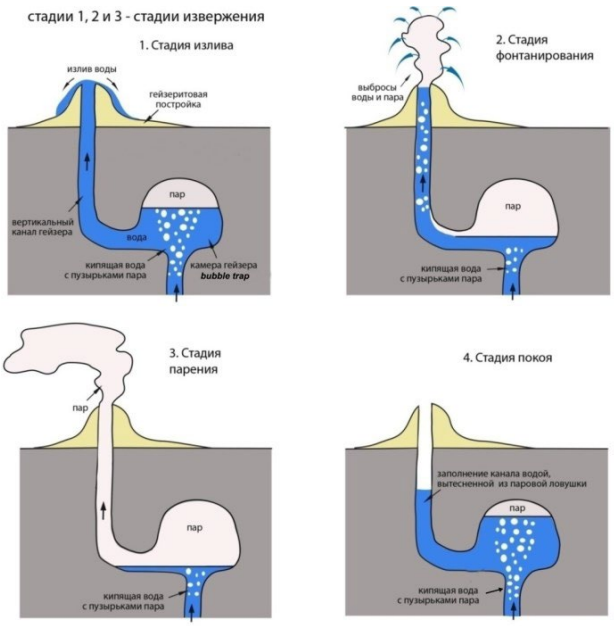


Рис. 1. Механизм действия гейзера с подводящей системой камерного типа (*bubble trap*) [6, 10], воспроизведенный методом физического моделирования.

Механизм Бунсена, как более простой и, на тот момент, более физически обоснованный, постепенно вытеснил модель Маккензи. Он принимался большинством отечественных исследователей для объяснения деятельности гейзеров Камчатки [4, 5]. Популярности механизма Бунсена также способствовала относительная легкость его воспроизведения в лаборатории [1], в то время как механизм Маккензи редко изучался методами физического моделирования из-за сложности работы с большими объемами кипящей воды и пара [9].

Интерес к механизму Маккензи возродился после публикации работы Белоусова [6], в которой на основе прямых наблюдений в каналах камчатских гейзеров было показано соответствие их строения модели Маккензи и было дано 1-ое геологическое объяснение формированию подводящих каналов и полостей необходимой сложной геометрии, которые получили специальный термин *ловушка для пузырей* или *bubble trap*, который сейчас широко используется. Вскоре после этого существование ловушек *bubble trap* было подтверждено геофизическими методами у питающих систем многих гейзеров мира: например, в США [11] и Исландии [8].

Физическое моделирование механизма Маккензи

В 2023-2024 гг. в рамках проекта РНФ № 23-27-00318 в Институте вулканологии и сейсмологии была создана крупномасштабная экспериментальная установка для физического моделирования работы гейзера с подводящей системой, предложенной Маккензи. Установка схематично воспроизводит структуру и принцип действия *ловушки для пузырей* (рис. 2). Она состоит из герметичного бака высотой 90 см, диаметром 75 см и объемом 380 л, в который по трубе поступает механическая смесь воды и воздуха, моделирующая пароводяную смесь, питающую природный гейзер. Возможность замены пара любым газом при моделировании показана Нечаевым [3]. Конструкция установки позволяет в процессе эксперимента измерять и менять объемные соотношения воды и воздуха в модельной двухфазной жидкости, которая поступает в бак. Максимальные притоки воды и воздуха в установку во время экспериментов составляли по 15 л/мин. Выводное отверстие из бака только одно – через патрубок диаметром 5 см, который заходит вертикально в верхнюю крышку бака и опускается вниз, не доходя 10 см до дна бака. Этот патрубок, высотой 90 см над крышкой бака, соединяет внутреннее пространство бака с атмосферой и соответствует выводному каналу природного гейзера.

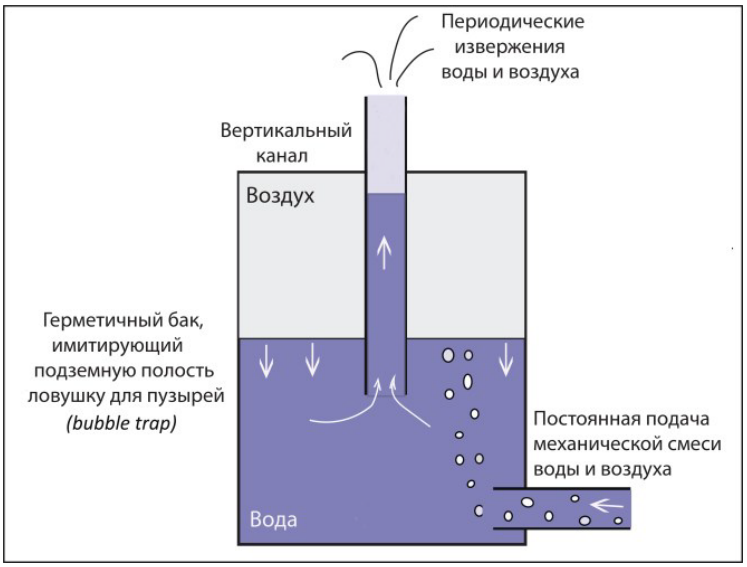


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки для физического моделирования деятельности гейзера с подводящей системой камерного типа *bubble trap*, предложенной Маккензи

В баке 2-фазная модельная смесь под действием силы гравитации естественным образом расслаивается: воздух занимает верхнюю часть бака, вода – нижнюю. Воздух, накапливающийся в верхней части бака, постепенно вытесняет накапливающуюся в его нижней части воду через вертикальный выводящий патрубок. Вытесняемая вода сначала поднимается вверх по выводящему патрубку (этот период времени соответствует стадии покоя гейзера; давление в баке растет), а потом начинает свободно выливаться наружу через его верхний конец (это соответствует стадии излива гейзера; давление в баке стабилизируется). По мере излива, граница раздела вода/воздух в баке опускается вниз, по направлению к нижней части выводного патрубка (при этом воздух в баке находится под гидростатическим давлением столба воды, которая заполняет выводящий патрубок). В определенный момент, когда поверхность раздела вода/воздух опускается до уровня входа в нижнюю часть выводящего патрубка, воздух из бака прорывается в патрубок и выбрасывает заполняющую его воду (этот момент соответствует стадии фонтанирования гейзера; давление в баке резко падает). В ходе экспериментов высота фонтанирования составляла около 1 м. В процессе фонтанирования выводящий патрубок освобождается от воды, а давление воздуха в баке падает до атмосферного. После этого начинается новый этап заполнения водой выводящего патрубка, который соответствует новой стадии покоя гейзера.

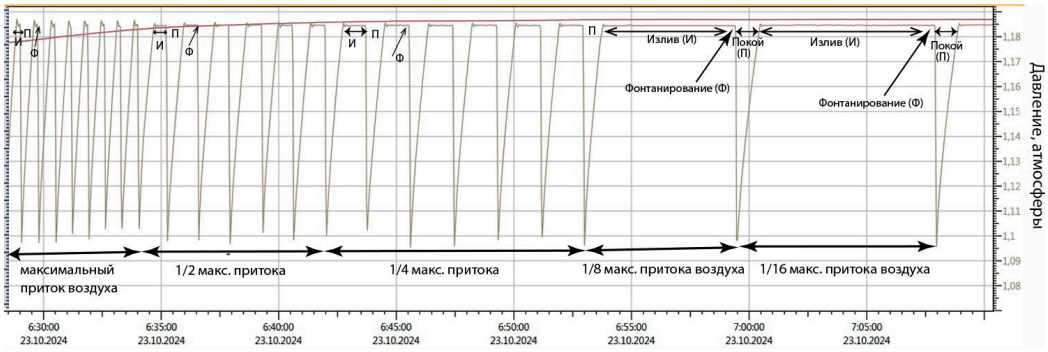
При постоянном поступлении модельной жидкости в установку, описанный выше процесс циклически повторяется, воспроизводя в деталях периодические извержения гейзера с закономерным чередованием всех стадий деятельности классического полного цикла природного гейзера. При этом логгер давления, помещенный в бак, записывает колебания давления (рис. 3а), по форме аналогичные колебаниям давления в канале природного гейзера (рис. 3б).

Эксперименты проводились с разными объемными соотношениями воздуха и воды в питающей модельной 2-фазной смеси. Эксперименты показали, что изменение объемного соотношения газ/жидкость приводит к изменениям продолжительности отдельных стадий извержений экспериментального гейзера: например, снижение объемной доли воздуха приводит к увеличению продолжительности стадий излива и покоя.

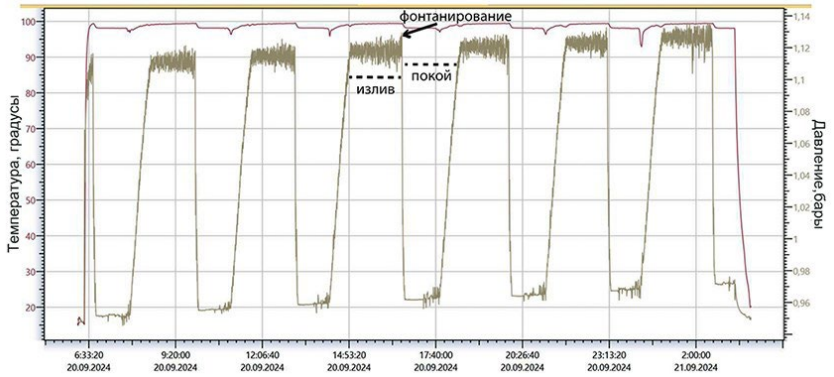
Заключение

Проведенная серия экспериментов по физическому моделированию гейзерного процесса подтвердила, что камерный тип подводящей системы, предложенный Маккензи в 1811 г. (*bubble trap* по современной терминологии), совместно с механизмом газо-жидкостной неустойчивости, предложенным А.М. Нечаевым, успешно объясняют периодический режим действия гейзеров. В будущих

экспериментах предполагается выяснить, как изменения геометрических параметров установки (объема бака, высоты и диаметра выводящего вертикального патрубка, имитирующего канал гейзера) будут влиять на динамику извержений модельного гейзера. Результаты экспериментов позволят понять, какие изменения в питающих системах природных гейзеров вызывают наблюдаемые изменения режима их деятельности.



а



б

Рис. 3. Записи логгером колебаний давления в подводящей системе камерного типа *bubble trap,* соответствующие разным стадиям извержения и покоя гейзера: а) экспериментальная установка; б) гейзер Жемчужный, Долина Гейзеров, 2024 г.

Список литературы

1. *Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С.* К теории гейзерного процесса // Доклады Академии наук СССР. 1970. № 194. Вып. 2. С. 318-321.
2. *Нехорошев А.С.* К вопросу о теории действия гейзеров // Доклады Академии наук СССР. 1959. Т. 127(5). С. 1096-1098.
3. *Нечаев А.М.* О механизме извержения гейзера // Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. 2012. Вып. 2. С. 135-143.
4. *Сугробов В.М., Сугробова Н.Г., Дрознин В.А. и др.* Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
5. *Устинова Т.И.* Гейзеры Камчатки // М.: Госиздат, 1955. 120 с.
6. *Belousov A., Belousova M., Nechayev A.* Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: implications for the geyser mechanism // Geology. 2013. V. 41. P. 387-390.
7. *Bunsen R.W.* Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands // Annalen der Physik und Chemie. 1847. V. 83. P. 159-170.
8. *Eibl E.P., Müller D., Walter T.R. et al.* Eruptive cycle and bubble trap of Strokkur geyser, Iceland // Journal of geophysical research: Solid Earth. 2021. V. 126. Art. e2020JB02076.
9. *Hurwitz S., Manga M.* The fascinating and complex dynamics of geyser eruptions // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. V. 45. P. 31-59.
10. *Mackenzie G.S.* Travels in the Island of Iceland // Edinburgh, Allam and Company. 1811. 27 p.
11. *Vandemeulebrouck J., Roux P., Cros E.* The plumbing of Old Faithful Geyser revealed by hydrothermal tremor // Geophysical Research Letters. 2013. V. 40(10). P. 1989-1993.