

Гейзеры

Г. С. Штейнберг, А. С. Штейнберг, А. Г. Мержанов



Природу часто делят на живую и неживую. При таком подходе гейзеры попадают во вторую половину, но тем, кто их видел, с этим согласиться трудно. Гейзер — это непрерывное движение и изменение. Не случайно в английском языке применительно к ним используются термины «behaviour» — поведение, «play» — игра. Гейзер чутко реагирует на внешние раздражители. Дождь, ветер, атмосферное давление, температура воздуха, уровень грунтовых вод, сейсмичность — все сказывается на режиме гейзера. Применительно к реакции гейзера на такие изменения хочется сказать «приспосабливается», словно о живом существе, тем более что гейзеры появляются, развиваются, достигают зрелости, а затем угасают и прекращают свое существование, становясь горячими источниками, теплыми водоемами или просто системой пустых каналов, камер и зияющих грифонов, заваленных обломками гейзерита и измененных пород.

Что же такое гейзер? Как он устроен и чем отличается от обычных источников, которых так много? Если исходить только из внешних, очевидных, признаков, можно сразу сказать, что гейзеры отличаются от прочих теплых и горячих источников периодичностью действия. Основная характеристика любого термального источника — температура, гейзер же характеризуется продолжительностью цикла, т. е. промежутком времени между извержениями. Полный гейзерный цикл состоит из четырех стадий: заполнения, излива, извержения и паровой стадии. Период — индивидуальная характеристика, и его продолжительность составляет у разных гейзеров от нескольких минут до многих часов. То же можно сказать и о продолжительности отдельных стадий, за исключением стадии извержения, которая у подавляющего большинства гейзеров длится всего несколько минут.

Впрочем, эти и многие другие све-

дения о гейзерах можно почерпнуть из статей, посвященных этому природному феномену, и даже учебников. Но чего не было до недавнего времени — это строгого решения задачи о физическом механизме гейзера и причинах периодичности его действия.

Почти все геологические задачи являются обратными: даны результаты процесса и требуется их расшифровать и определить физику и химию процесса, его динамику, начальные и граничные условия и т. д. Но, как известно, решения обратных задач многозначны даже при корректной их постановке, чего исходные геологические данные обычно не обеспечивают. Поэтому геологические задачи сложны в постановке и неоднозначны в решении. Однако задача о физическом механизме гейзера представляет собой редкое исключение: здесь мы имеем дело с результатами процесса, а главное — с самим процессом. Каждое извержение гейзера и любую его стадию можно рассматривать как многократно повторяемый и хорошо воспроизводимый естественный физический эксперимент. Если найти способ направленно изменять скорость развития процесса, то решение задачи существенно упростится. Кроме того, «рабочее тело» процесса — вода — изучено детально и всесторонне. Все это вместе взятое благоприятствовало решению авторов статьи разобраться в природе гейзерного процесса.

ИЗ ИСТОРИИ ИЗУЧЕНИЯ ГЕЙЗЕРОВ

Люди заметили гейзеры относительно недавно. Если сравнить в этом плане гейзеры с вулканами (ведь почти все гейзеры находятся в районах активного вулканизма), то окажется, что первые упоминания о вулканах и их извержениях относятся еще к X—XVIII вв. до н. э. (Библия), гейзеры же впервые упоминаются только в XIII в. н. э. (скандинавские хроники). Пер-



Генрих Семенович Штейнберг, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотермии Института морской геологии и геофизики ДВНЦ АН СССР, член редколлегии международного журнала "Modern Geology". Область научных интересов — вулканология и геотермия.



Александр Семенович Штейнберг, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физического стимулирования процессов горения Института химической физики АН СССР. Специализируется на изучении процессов тепломассопереноса в системах с химическими и фазовыми превращениями.



Александр Григорьевич Мержанов, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий сектором макрокинетики и газодинамики того же института, председатель Научного совета по проблемам самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, редактор международного журнала "Archivum Combustionis". Область научных интересов — химическая физика.

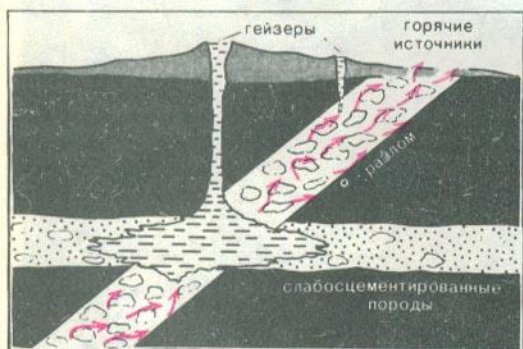
вое описание извержения вулкана — это был Везувий — сделано Плинием Младшим в 79 г. Режим знаменитого исландского Гейзера, по имени которого все подобные источники пара и называются гейзерами, описан фон Тойлем в 1772 г.

Первые соображения о причинах извержения исландских гейзеров высказал в 1811 г. шотландский путешественник Г. Маккензи, полагавший, что они вызываются прорывом к поверхности больших объемов пара, который накапливается в подземных камерах. Позже, в 1846 г., известный немецкий физик Р. Бунзен качественно объяснил извержения Гейзера вскипанием подземных вод, так как их температура, по его представлениям, непре-

равно возрастала с глубиной. Однако он не сумел объяснить периодичности действия этого гейзера и того факта, что температура после извержения опускалась существенно ниже 100 °С.

В 1880 г. соотечественник Бунзена Х. Ланг дополнил его модель действием внешнего источника холодной грунтовой воды, поступающей в гейзер после начала извержения. Согласно Лангу, в тот момент, когда вода выбрасывается из гейзера, гидростатическое давление в канале падает и увеличивается приток холодной воды; он-то и прекращает извержение. После заполнения канала приток холодной воды уменьшается, начинается прогрев, и цикл повторяется. Вывод Ланга, ввиду его на-

глядности и простоты, был поддержан многими исследователями, тем более что поступление в гейзеры холодной грунтовой воды в ряде случаев было подтверждено прямыми измерениями. В монографии, написанной уже в нашем веке и посвященной Йеллоустонским гейзерам (США), Е. Аллен и А. Дэй отмечали, что «приток холодной воды совершенно необходим для объяснения периодичности действия гейзеров»¹. Сходных взглядов придерживалась и первооткрывательница камчатской Долины гейзеров Т. И. Устинова, полагавшая, что периодичность извержений объясняется «...наличием более прохладной воды, имеющей доступ в канал гейзера и прерывающей кипение в нем глубинной воды»². С. И. Набоко, изучавшая гейзеры Камчатки, писала: «Периодичность извержений осуществляется только при наличии



Схематическое изображение гейзера. В месте пересечения разлома, по которому поднимаются горячие воды, и слоя слабосцементированных пород возникает подземная камера. Ее образование — не причина, а результат деятельности гейзера: большие динамические нагрузки, периодически возникающие в канале при извержении, разрушают слабосцементированные породы. У небольших гейзеров камеры может и не быть.

притока в гейзерные системы менее нагретых вод»³.

Но с началом разведочных работ на месторождениях термальных вод было замечено, что гейзерный режим (т. е. периодическое объемное вскипание с выбросом пароводяной смеси) иногда возникает и в

тех обсаженных трубами скважинах, в которые не поступала холодная вода из верхних горизонтов. В результате возродились представления о том, что для периодичности действия гейзеров нет необходимости в смешении горячей и холодной воды. Этот, на первый взгляд, логичный вывод не столь бесспорен, как кажется, и к нему мы еще вернемся.

В то время когда мы только начинали свои работы по изучению гейзерного процесса, появилась обобщающая статья Д. Уайта, в которой он с сожалением отмечал, что «ни одна из общих теорий не объясняет того, как гейзеры функционируют, как начинается извержение или как заканчивается, как поступает энергия, почему гейзеры так сильно отличаются друг от друга»⁴. В основе это заключение было справедливым, хотя слово «теория», пожалуй, неточно, поскольку под ним понимались многочисленные предположения о природе гейзерного процесса. Физически же строгой теории, вскрывающей механизм извержений и показывающей, какие именно параметры определяют гейзерный процесс и при каком их соотношении он реализуется, в ту пору не было.

ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

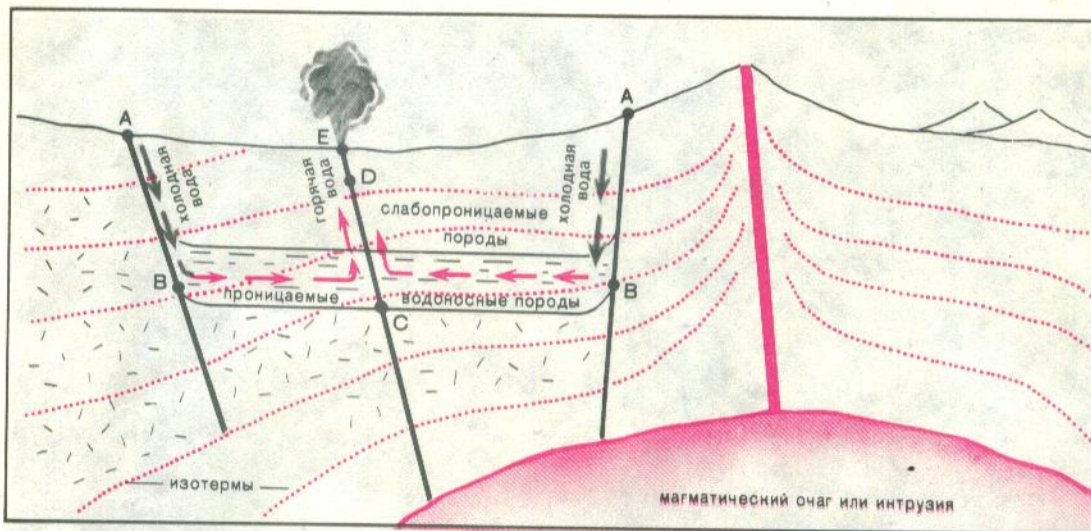
Существуют разные подходы к изучению природных процессов. Наиболее традиционный: наблюдение — анализ — построение теории. Однако для исследования гейзеров этот подход малоэффективен, так как процесс развивается на глубине, а на поверхности мы видим только некоторые его следствия. Поэтому наши исследования были построены по схеме: наблюдение — приближенная теория (математическая модель) — лабораторное моделирование — уточнение теории — полевые (натурные) эксперименты на гейзерах — теория процесса. По существу мы начали с теории и моделирования, так как прямых наблюдений за гейзерами было много, а задача о физическом механизме гейзера оставалась нерешенной. Общие предположения типа: «гейзер извергается в результате вскипания» или же «он извергается вследствие несоответствия между возможностями питания гейзера и несоизмерно большим диаметром выводящего канала» нельзя признать решением. Разработанная нами математическая

¹ Allen E., Day A. Geysers and Hot Springs. Yellowstone National Park, 1935, v. 2, p. 2116.

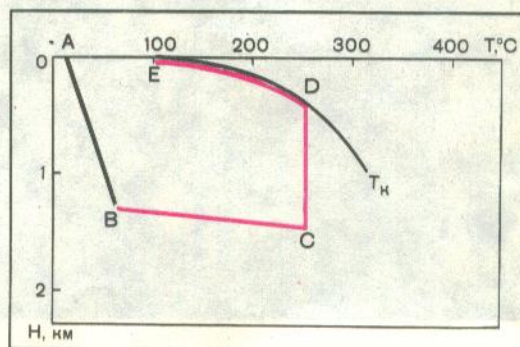
² Устинова Т. И. Камчатские гейзеры. М., 1955, с. 103.

³ Набоко С. И. Гейзеры Камчатки. — В сб.: Тр. Лабор. вулканол. АН СССР, 1954, вып. 8, с. 206.

⁴ White D. — Amer. J. Sci., 1967, v. 265, p. 641.



Картина образования и циркуляции термальных вод. По разломам и трещинным зонам (АВ) холодные поверхности воды опускаются на глубину, где нагреваются кондуктивным тепловым потоком от залегающих на небольшой глубине (3—6 км) вулканических очагов или остывающих интрузий и локализуются в проницаемых водоносных горизонтах (ВСВ). По другим разломам горячая вода поднимается к поверхности, на которую она выходит в виде теплых и горячих источников и гейзеров. Характерно, что, двигаясь к поверхности (участок CD), горячие воды не охлаждаются, поскольку окружающие породы прогрелись теми же водами на протяжении многих тысяч лет. На графике внизу показано изменение температуры воды на всем пути ее движения [ABCDE]. В верхней части системы [DE] изменение температуры ограничено кривой кипения; в зависимости от условий теплового баланса на этом участке и на выходе (Е) образуются горячие источники или гейзеры.

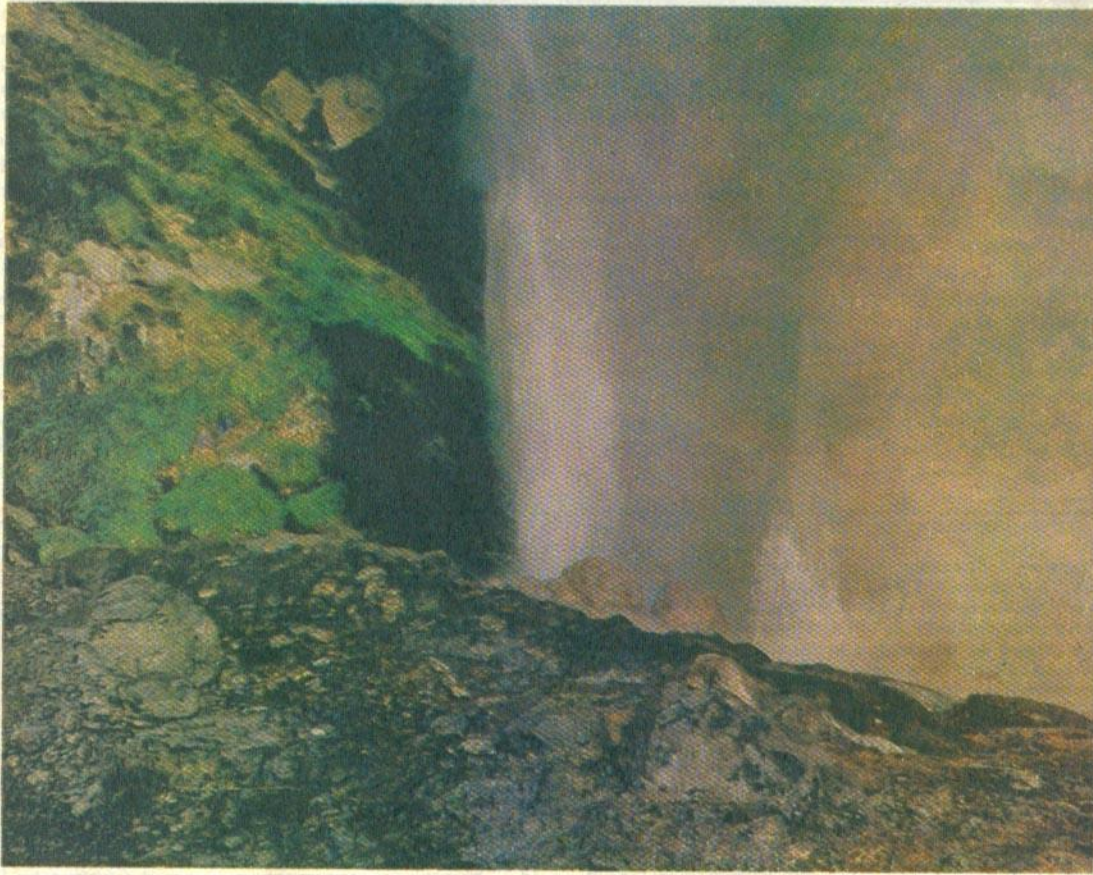


модель гейзерного процесса⁵, несмотря на определенную схематизацию строения гейзера, позволила достаточно строго определить параметры, контролируемые гейзерный процесс и положение гейзеров среди других геотермальных проявлений. Не приводя уравнений тепломассопереноса, ограничимся основными положениями, принятыми при выводе теории. Упрощенно они сводятся к следующему: гейзер состоит из подземной камеры и канала, соединяющего ее с поверхностью земли; извержение происходит вследствие вскипания воды в этой камере и носит характер взрыва, т. е. происходит в результате бы-

строго объемного выделения энергии. Источником взрыва является энергия перегрева воды (аккумулированное тепло). Вода в камере нагревается за счет притока воды из глубоких горизонтов; наряду с горячей в гейзер может поступать и холодная вода (вариант с поступлением только горячей воды представляет собой частный случай). Закономерности для бескамерного гейзера также могут быть выведены в рамках нашей теории, если учесть конвекцию в его канале. Исходя из того что существование камер доказано для ряда гейзеров, мы полагаем модель с камерой общим случаем, а бескамерную — частным.

Расчеты, выполненные нами на основании теоретической модели гейзерного процесса, показали, что поведение природного гейзера контролируется энтальпией

⁵ Мерджанов А. Г., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С.— Доклады АН СССР, 1970, т. 194, № 2, с. 318.



Извержение гейзеров Фонтан и Новый Фонтан.

теплоносителя (I); критической энергией, или энергией извержения ($Q_{кр}$); расходом в стадии заполнения (G_0) и в стадии излива (G); массой излитой воды ($M_{изл}$), массой воды и пара, выбрасываемой при извержении (M_0); массой воды в гейзере, охваченной свободной конвекцией (M); теплотерями в стадии излива ($Q_{из}$). Определив все эти параметры, можно уверенно прогнозировать период гейзера, а также найти, при каком их изменении гейзер превратится в горячий ключ, кипящий источник или паровую струю (фумаролу). Математическое моделирование показало, что гейзерный режим возможен только в очень узком интервале перечисленных параметров, — именно этим и объясняется редкость гейзеров.

Создание физической модели природного объекта является весьма эффективным методом исследования, так как упрощает объект и одновременно выделяет наиболее существенные его стороны. Наряду с этим лабораторное моделирование позволяет ускорять или замедлять процесс, а также отдельные важные его стадии. Следует отметить, что модели гейзеров создавались как до нас, так и после (Р. Бунзен, 1846; Н. Видеман, 1882; Дж. Грахем, 1893; Н. Андерсон и др., 1978). Однако они лишь иллюстрировали гейзерный процесс, поскольку небольшая высота этих моделей не позволяла получить перепад температур кипения, достаточный для надежных количественных измерений. Принципиальное методическое отличие наших моделей заключается в том, что эксперименты на них проводились при пониженном давлении, позволившем получить перегревы до 20° . А это более чем на порядок превышает перегревы в обычных, невакуумных моделях и близко к перегре-



Гейзер Сахарная голова в момент извержения. Хорошо видна самая верхняя часть гейзера — его грифон, сложенный гейзеритом.

вам в природных гейзерах⁶. Например, создав над поверхностью воды давление 0,05 атм, мы снижаем температуру кипения до 32 °С и при высоте модели 50 см обеспечиваем перегрев в 13°, что соответствует перегреву в гейзере, вода в котором вскипает на глубине 6 м. В некоторых моделях в качестве рабочей жидкости мы использовали фреон, имеющий низкую температуру кипения (48 °С при давлении 1 атм), большую, чем у воды, плотность и меньшую теплоту парообразования; его применение дало еще более высокие пере-

гревы. В результате мы получили контрастную тепловую модель и обеспечили измерение температуры на различных ее уровнях с точностью, сопоставимой с расчетными данными, полученными путем математического моделирования.

Лабораторные эксперименты на моделях показали, что после извержения температура воды близка к температуре кипения только вблизи поверхности, а на глубине она заметно ниже. Поступающая из глубоких горизонтов горячая вода интенсивно перемешивается с более холодной, оставшейся в грифоне гейзера после извержения. Благодаря этому температура воды в гейзере постепенно повышается, однако в течение стадии заполнения она остается ниже температуры кипения. По мере заполнения канала гидростатическое давление увеличивается, а расход воды уменьшается, достигая минимума к началу стадии излива. На этой стадии большая часть охлажденной воды изливается, вследствие чего темп роста температуры непре-

⁶ Мержанов А. Г., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С. Авторское свидетельство № 461700, 1974.

рывно увеличивается. В определенный момент на некоторой глубине H вода достигает температуры кипения и в канале появляются пузырьки пара. Поднимаясь, они охлаждаются, отдают свое тепло воде и, конденсируясь, исчезают. Появление пара уменьшает гидростатическое давление, соответственно увеличивается расход воды, поступающей в гейзер, и интенсифицируется кипение. С началом кипения теплоперенос заметно ускоряется, так как пузырьки пара поднимаются гораздо быстрее воды, и температурная кривая (T_n) приближается к кривой кипения (T_k). Поднимающиеся к поверхности пузырьки пара уже не конденсируются, а увеличиваются в объеме и занимают большую часть сечения канала. Режим течения становится снарядным: крупные пузырьки пара или их скопления, действуя как поршень, выталкивают воду из верхней части канала, вследствие чего уровень воды и гидростатическое давление в системе скачкообразно понижаются. Резкое снижение давления приводит к тому, что вода оказывается перегретой выше температуры кипения, происходит объемное вскипание, т. е. начинается извержение гейзера.

Воссозданная в лаборатории картина подготовки извержения дает ответ на вопрос, необходимо ли смешение горячей воды с холодной или «менее нагретой» для периодичности действия гейзера. Для начала извержения необходимости в смешении нет. Но, чтобы извержение повторилось, оно прежде всего должно закончиться. А это возможно лишь при условии, что температура воды в недрах гейзера будет меньше температуры кипения. Для снижения температуры в гейзере внешний источник холодной воды вовсе необязателен. Вода охлаждается в самом гейзере в результате вскипания: перед извержением ее температура достигает $120\text{--}170^\circ$, а в процессе извержения снижается до 100°C . Однако последующий постепенный нагрев, приводящий к извержению, происходит благодаря смешению оставшейся в гейзере воды, охлажденной в результате извержения (вскипания), с горячей водой, поступающей из области питания, т. е. смешение горячих и охлажденных вод является необходимым условием периодичности действия гейзера. Таким образом, в гейзере существует обратная связь: прекращение извержения обусловлено охлаждением воды в результате вскипания, а последующий постепенный нагрев происходит благодаря смешению горячей воды с водой, охлажденной в процессе извержения. Время

нагрева до температуры, необходимой для объемного вскипания (извержения) и является главной характеристикой гейзера — его периодом.

Итак, лабораторное моделирование существенно приблизило нас к пониманию механизма гейзерного процесса. Но это не все. Модельные эксперименты принесли еще один интереснейший результат: благодаря им было установлено, что перед извержением жидкость в некоторых гейзерах находится в метастабильном (перегретом) состоянии⁷. А как известно, вещества в таком состоянии весьма чувствительны к самым разным физическим воздействиям. Поэтому выявление метастабильного состояния воды в гейзерах перед их извержением позволяет по-новому подойти к объяснению корреляционных зависимостей между периодом гейзера и различными процессами в земной коре и атмосфере. Но это тема особого разговора. А пока подведем некоторые итоги.

Опыты на моделях и расчеты дали определенные представления о динамике гейзерного процесса, однако применительно к естественным гейзерам многое оставалось неясным. Что является необходимым условием для извержения природного гейзера? Каковы энтальпия теплоносителя, весовое соотношение воды и пара при извержении, температура и расход воды в стадии заполнения и излива? Какая масса воды участвует в гейзерном цикле и какая масса воды и пара извергается гейзером? Какова величина энергии, аккумулируемой в стадиях заполнения и излива и рассеиваемой в стадии извержения?

Ответы на все эти вопросы могли дать только прямые исследования на гейзерах. Однако применение обычных гидрогеологических методов (бурения, перекрытия выходов термальных источников на поверхность и т. д.) здесь недопустимо, поскольку они могут привести к необратимым изменениям в режиме гейзеров. Именно вследствие этих ограничений изучение гейзеров и у нас, и за рубежом носило пассивный характер и, по существу, сводилось к регистрации периода, температуры, продолжительности отдельных стадий и иногда расхода на стадии излива. Использование активных методов, ведущих к направленному и регулируемому изменению параметров процесса, существенно

⁷ Мержанов А. Г., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С. — Геохимия, 1974, № 2, с. 277.

расширяет возможности исследований. Но здесь имеется одно важное ограничение: эксперименты не должны нарушать режим гейзера или его строение. Нами были разработаны два экологически чистых активных метода: гидрозондирование и химическое зондирование. С их помощью велись все наши полевые исследования гейзеров.

НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ГЕЙЗЕРАХ

Идея метода гидрозондирования заключается в кратковременном изменении теплового баланса гейзера, что достигается вливанием в гейзер после извержения определенного количества воды (M_3) с заданной температурой (T_3). После чего мы имеем возможность измерить период гейзера, продолжительность отдельных его стадий, температуру и расход воды на изливе⁸.

На первый взгляд, идея заполнения водой частично опустошенного гейзера в расчете, что вода достигнет большой глубины, кажется сомнительной. Ведь канал гейзера имеет сложную форму, сифоны и далеко не всегда вертикален. Тем не менее затруднений с заполнением водой небольших гейзеров, с которыми мы имели дело, не возникало. Более того, при контакте с вливаемой водой пар, заполнявший пустующий объем гейзера, интенсивно конденсировался и вливаемая вода со свистом засасывалась в гейзер, как в вакуумированную полость.

Широкие возможности метода гидрозондирования определяются тем, что в зависимости от величины «теплового возмущения» меняется главная характеристика гейзера — его период. Измеряя зависимость периода гейзера от температуры и массы вливаемой воды, мы можем определить из простых уравнений теплового и массового баланса многие параметры, характеризующие внутреннее строение гейзерной системы и режим ее работы, в том числе и те, которые принципиально недоступны для прямого измерения.

Одна из основных задач метода гидрозондирования — определение энтальпии теплоносителя (теплосодержания вод, питающих гейзеры) и критического условия, т. е. условия, при котором начинается извержение. Критическое условие для каждого гейзера должно определяться с учетом его особенностей. Из теории следует, что

самым общим условием начала извержения является достижение температуры кипения. Однако моделирование показало, что это условие необходимо и достаточно только в том случае, если у гейзера имеется стадия излива и масса воды в камере много больше массы воды в канале. Если же эти массы сравнимы или камеры у гейзера нет, то следует учитывать конвективные потери тепла в канале и грифоне. В гейзере без излива необходимым условием начала извержения является кипение, которое вследствие метастабильного состояния воды часто начинается при температуре более высокой, чем температура кипения.

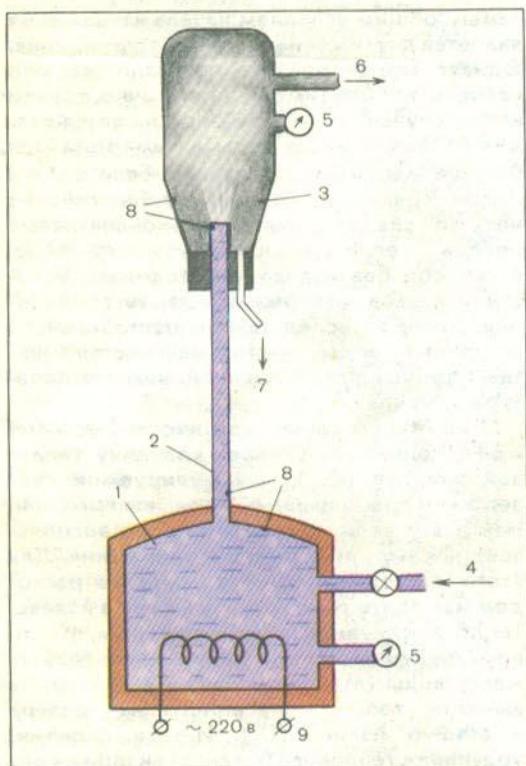
В общем случае критическое условие можно определить через величину тепловой энергии ($Q_{кр}$), аккумулируемой гейзером и рассеиваемой при извержении. Найти эту величину можно, если воспользоваться методом гидрозондирования. Для этого достаточно одновременно с расходом измерить температуру воды на изливе. Тепло, аккумулированное гейзером, равно произведению энтальпии теплоносителя на массу воды (M), поступившей в гейзер, за вычетом тепла, вынесенного из гейзера в стадию излива ($Q_в$). Иными словами, уравнение теплового баланса гейзера имеет простой вид:

$$Q_{кр} = MI - Q_в,$$

где $Q_{кр}$ и I — неизвестные. Чтобы их найти, достаточно иметь систему из двух уравнений. Метод гидрозондирования позволяет получить любое их число.

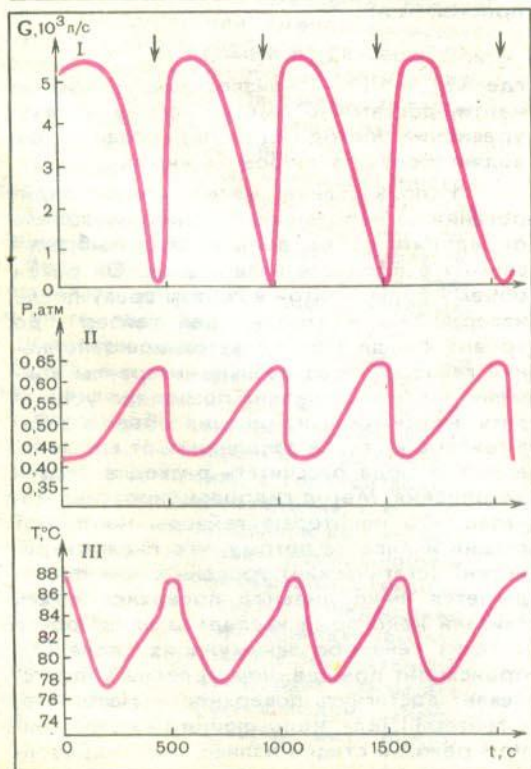
Использование метода гидрозондирования на небольших гейзерах позволило определить объем воды и пара, выбрасываемых в процессе извержения. Он равен объему воды, влитой в гейзер сразу после извержения, и заполнившей гейзер до уровня излива. Последовательное заполнение гейзера через разные интервалы времени после извержения позволило установить зависимость изменения объема воды в гейзере в стадии заполнения от времени, а уже отсюда рассчитать расход в стадии заполнения. Метод гидрозондирования показал, что некоторые гейзеры не имеют стадии излива не потому, что пьезометрический (статический) уровень у них располагается ниже дневной поверхности, как считали некоторые исследователи. Просто у таких гейзеров аккумуляция тепла $Q_{кр}$ происходит прежде, чем уровень воды успевает достигнуть поверхности. Например, у гейзера Щель, не имеющего в естественном режиме стадии излива, при гидрозон-

⁸ Steinberg G. S., Merzhanov A. G., Steinberg A. S. — J. Volcanol Geotherm. Res., 1978, v. 3, p. 99.



Лабораторная модель гейзера: 1 — гейзерная камера, 2 — канал гейзера, 3 — верхняя камера, имитирующая грифон гейзера, 4 — линия подвода воды, 5 — датчики давления, 6 — выход к вакуумному насосу, 7 — линия слива воды, 8 — термометры, 9 — нагреватель.

Диаграмма изменения параметров гейзерного процесса, полученная с помощью лабораторной модели гейзера [I — расход воды, поступающей в гейзер, II — давление в камере гейзера, III — температура в камере гейзера]. Стрелками отмечены моменты начала извержений. Перегрев нижней камеры относительно верхней в приведенном случае аналогичен перегреву в гейзере, вода в котором вскипает на глубине 4,5 м.



дировании излив продолжался около 10 мин, т. е. время аккумуляции тепла $Q_{кр}$ при изменении теплового баланса оказалось больше времени, необходимого для заполнения гейзера до уровня излива.

Таким образом, метод гидрозондирования позволил установить ряд зависимостей, характеризующих гейзерный процесс, и найти численные значения важнейших его параметров. Однако остались неопределенными масса воды в области свободной конвекции в гейзере, масса излитой воды, масса воды и пара, извергаемых гейзером, а также расходы в больших гейзерах в стадии заполнения. Определение этих параметров проводилось с помощью метода химического зондирования, разработанного И. П. Боровинской совместно с авторами⁹.

Суть этого метода заключается во введении в гейзер растворенного в воде реактива с последующим наблюдением за изменением его концентрации на различных стадиях гейзерного цикла. Вблизи зем-

⁹ Штейнберг Г. С., Боровинская И. Н., Мержанов А. Г., Штейнберг А. С.— Доклады АН СССР, 1981, т. 258, № 3, с. 727.

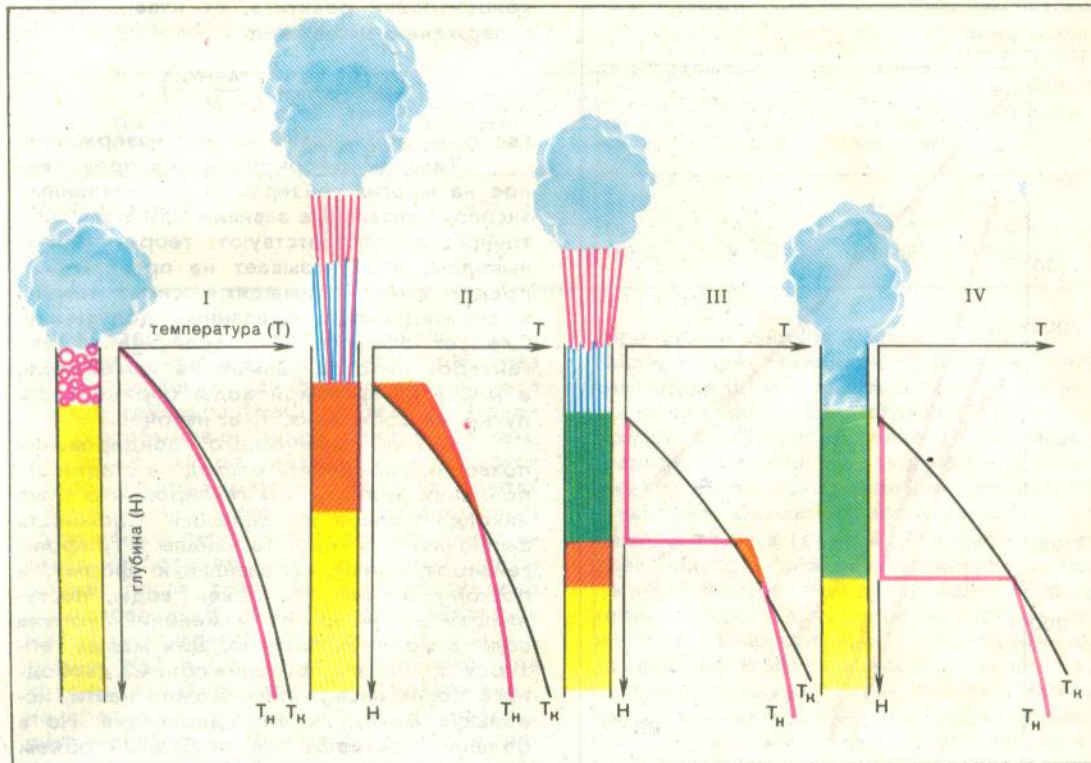


Схема развития извержения гейзера.

I — стадия подготовки. Вода в верхней части гейзера перегрета до температуры, близкой или равной температуре кипения [T_n]. Пузыри пара, поднимаясь, расширяются, занимают большую часть сечения канала и выталкивают воду из верхней его части.

II — стадия извержения. Вследствие резкого снижения уровня воды давление резко падает и вода оказывается перегретой [$T_n > T_k$]. Происходит объемное вскипание, т. е. начинается извержение.

III — паровая стадия. При извержении часть воды выбрасывается, давление уменьшается и фронт кипения смещается на глубину. Извержение продолжается, однако вода из гейзера уже не выбрасывается на поверхность. Идет напорное истечение пара.

IV — заключительная стадия. Поскольку вода из гейзера не извергается, давление в нем остается прежним и объемное кипение заканчивается. Вследствие этого прекращается напорное истечение пара и завершается весь цикл.

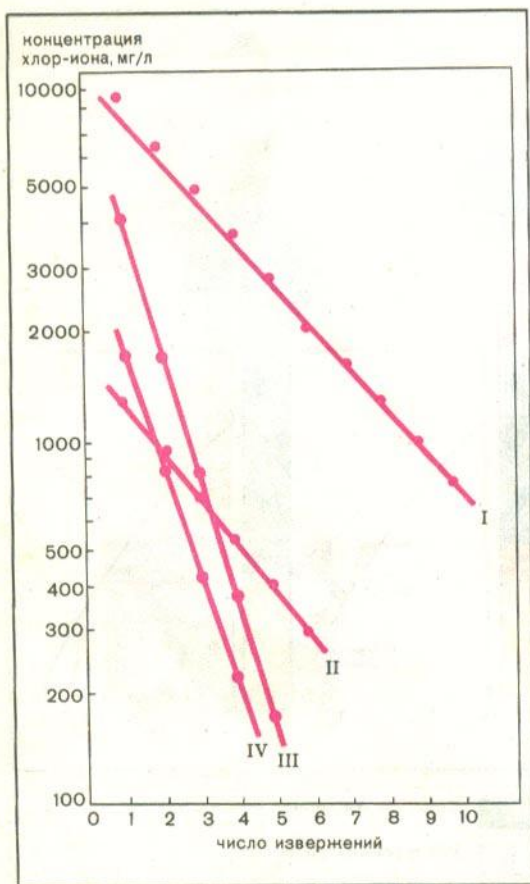
На схеме изменения температуры и уровня воды для наглядности показаны как ступенчатые, в действительности же они имеют более сглаженный характер. Однако основной факт, заключающийся в том, что в результате снижения давления кривая T_n пересекает кривую кипения и вода оказывается перегретой, строго соответствует результатам экспериментов.

Перегретая вода [$T_n > T_k$]
 Вода с температурой ниже точки кипения [$T_n < T_k$]

Вода, охлажденная при извержении
 Извергаемая вода
 Напорное истечение пара

ной поверхности каналы гейзеров достаточно широки и нередко образуют камеры. Здесь — область свободной конвекции. Но на больших глубинах вода идет по очень узким трещинам и свободная конвекция почти отсутствует. На этом и основан метод химического зондирования: реактив, введенный в гейзер, локализуется в области, охваченной свободной конвекцией. Дальнейшее его распространение в более глубокие части гейзера определяется уже диффузией, влиянием которой в масштабах времени эксперимента (минуты, часы) можно пренебречь.

Хотя химическое зондирование применимо к любым гейзерам, для простоты рассмотрим гейзер без стадии излива. Если после извержения в гейзер был введен реактив с массой m_0 и он равномерно распределялся в области свободной конвекции



Изменение концентрации хлор-иона от извержения к извержению на гейзерах без стадии излива. Экспериментальные значения точно соответствуют теоретически выведенной линейно-логарифмической зависимости. Гейзеры: I — Прилежный, II — Конус, III — Щель, IV — Фонтан.

с массой воды M , то к моменту извержения концентрация реактива составит:

$$C_0 = m_0 / M,$$

откуда $M = m_0 / C_0$.

После извержения в гейзере останется масса воды $(M - M_0)$, где M_0 — масса воды и пара, выбрасываемая при извержении гейзера, а концентрация реактива сохранится прежней. По мере поступления воды и заполнения объема, освободившегося в результате извержения, концентрация реактива будет уменьшаться. Основное соотношение, описывающее изменение

концентрации реактива, от извержения к извержению имеет вид:

$$C_n = \frac{m_0}{M - M_0} \left(\frac{M - M_0}{M} \right)^n,$$

где n — порядковый номер извержения.

Химическое зондирование, проведенное на многих гейзерах, и установленные экспериментальные зависимости с высокой точностью соответствуют теоретическим выводам, что указывает на правильность предположений, лежащих в основе метода, и справедливость сделанных допущений. Следует отметить, что величина M для гейзеров никогда раньше не измерялась, а масса извергаемой воды определялась путем ее собирания, т. е. неточно.

Метод химического зондирования позволил определить расход на стадии заполнения для крупных гейзеров, что тоже никогда раньше не делалось. Сложность заключается в том, что каналы и грифоны гейзеров имеют неправильную форму, и поэтому определить объем воды, поступившей в гейзер, по изменению уровня воды в нем невозможно. Для малых гейзеров скорость заполнения объема, свободного после извержения, можно найти, используя метод гидрозондирования. Но в больших гейзерах, где свободный объем составляет десятки кубических метров, выполнить это практически невозможно. И здесь нам помогает химическое зондирование. Оно позволяет определить изменение массы воды в области свободной конвекции в течение стадии заполнения по следующей формуле:

$$M(t) = \frac{m_0}{C(t)},$$

где $C(t)$ — текущая концентрация.

Дифференцируя эту зависимость, находим расход. Сходным образом по изменению концентрации реактива определяется расход воды в стадии излива и масса воды, изливаемая гейзером.

Метод химического зондирования позволил определить массу изливаемой воды, массу воды и массу пара, извергаемых гейзером, установить закономерности изменения расхода на всех стадиях процесса и, кроме того, найти массу воды, циркулирующей в области развитой свободной конвекции гейзерной системы, — параметр для гейзеров принципиально новый.

В заключение отметим, что хотя экологическая корректность использованных нами методов была заложена изначально, — в гейзеры вливались небольшие количества

Основные параметры гейзеров

Гейзер	Масса воды в обл. свободной конвекции, кг	Масса извергнутой воды, кг	Масса извергнутого пара, кг	Масса излитой воды, кг	Энергия извержения, ккал	Энтальпия теплоносителя, ккал/кг
Принц Буратино	600	~135	35	—	$4 \cdot 10^4$	187 ± 7
Щель	2400	1050	200	—	$2,4 \cdot 10^5$	190 ± 13
Великан	$3 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^6$	176 ± 8

воды, взятой из самих же гейзеров или из реки Гейзерной, а в качестве реактива использовались соединения, содержащиеся в воде гейзеров (NaCl), — тем не менее мы с особым вниманием следили за тем, насколько быстро гейзеры возвращаются к нормальному режиму. Во всех опытах с применением метода гидрозондирования собственный период гейзеров восстанавливался не позднее чем через одно извержение, после того как было проведено зондирование. В опытах, где использовался метод химического зондирования, концентрации Na^+ и Cl^- приходили в норму на крупных гейзерах через 1—2 извержения, на средних — через 4—5, а на небольших — через 6—10 извержений, т. е. через несколько часов.

КАК ОБРАЗУЮТСЯ ГЕЙЗЕРЫ И ПОЧЕМУ ОНИ РАБОТАЮТ?

Зная основные параметры гейзеров и представляя последовательность и характер протекающих в них процессов, можно определить, сочетание каких тепловых и гидродинамических процессов приводит к возникновению феномена гейзера.

Само по себе существование рядом, в пределах Долины гейзеров или Йеллоустонского парка, всего набора геотермальных проявлений — от паровых струй, горячих, кипящих и пульсирующих источников до гейзеров — вызывает естественный вопрос: почему, имея общий источник питания (это доказано химическими и изотопными анализами) и находясь в одинаковых геологических условиях, они так различно проявляют себя на поверхности? Существующее ранее предположение, что это обусловлено заметно меньшим расходом в гейзерах по сравнению с постоянными источниками, не подтвердилось. И среди гейзеров наблюдается самый широкий диапазон расхода: от 5—7 (гейзер Прилежный) до 600—1260 л/мин (гейзер Соумил). Проведенные нами исследования показали, что принципиальное отличие гейзеров от

горячих источников состоит в том, что в гейзерах нет стационарного баланса между теплоподводом и теплоотводом. В горячих источниках и паровых струях такой баланс всегда существует. В гейзерах же на всех стадиях процесса, за исключением извержения, теплоподвод больше теплоотвода и тепловой баланс поддерживается за счет нагрева воды в гейзере. А поскольку тепловая емкость гейзера ограничена, то после ее заполнения при дальнейшем подводе тепла баланс нарушается и система становится энергетически неустойчивой. Вследствие этого процесс теплоотвода качественно изменяется — происходит объемное вскипание, т. е. извержение гейзера.

Но почему в горячих источниках существует стационарный тепловой баланс, а в гейзерах его нет?

Модельные и натурные эксперименты показали, что в длительно существующих геотермальных источниках процессы теплообмена зависят, главным образом, от конвекции — свободной и вынужденной. Их соотношением и определяется характер геотермального проявления — горячий источник или гейзер. Вынужденная конвекция зависит от поступления горячей воды в гейзер и излива охлажденной воды из него; она ведет к перегреву, кипению и извержению. Свободная конвекция выравнивает температуру и препятствует перегреву, без которого кипение, а следовательно, и извержение невозможно. Если преобладает вынужденная конвекция, образуются кипящие источники, в случае преобладания свободной конвекции — остывающие источники, а при их балансе — источники с постоянной температурой. В промежуточных вариантах, когда вынужденная конвекция сбалансирована свободной конвекцией и кипением, образуются периодически кипящие или пульсирующие источники. И только в том случае, когда на ранних стадиях процесса вынужденная конвекция сбалансирована свободной конвекцией и нагревом воды в системе, на более поздних стадиях — свободной кон-

Грязевой котел. Подобные образования нередко возникают на месте горячих источников и гейзеров.

векцией, нагревом и кипением, а на заключительных стадиях вынужденная конвекция оказывается несбалансированной — возникают гейзеры.

Почему же свободная конвекция, нагрев и кипение с какого-то момента перестают обеспечивать тепловой баланс — ведь кипение может сбалансировать практически любой теплоподвод? Дело в том, что кроме теплового баланса на развитие процесса решающее влияние оказывает гидродинамический режим движения двухфазной смеси пар — вода. Если подводные каналы устроены так, что имеется возможность свободного выхода пара из системы, то парообразование сбалансирует теплоподвод. Но если пар занимает большую часть сечения канала, режим течения становится пульсирующим и в системе периодически скачкообразно понижается давление. При достаточном теплоподводе это ведет к объемному вскипанию и извержению.

Выяснив причины возникновения гейзерного режима, мы поняли, каким образом некоторые кипящие и горячие источники самопроизвольно превращаются в гейзеры. В первом случае для этого бывает достаточно незначительного расширения канала или образования на его выходе небольшого грифона. Оба этих фактора интенсифицируют свободную конвекцию, что ведет к смещению уровня начала вскипания на глубину, и источник, бывший до этого кипящим, начинает действовать как гейзер. Обратная процедура — сокращение объема и площади грифона — способствует превращению горячего источника в гейзер. При этом тепловые потери с поверхности уменьшаются, становится возможным кипение на глубине, и источник переходит в гейзерный режим. В обоих случаях изменяется соотношение между свободной и вынужденной конвекцией, т. е. структура теплового баланса.

При неизменном режиме теплоподвода гейзер может прекратить свою активность из-за увеличения объема или площади грифона. Другой причиной может стать уменьшение сечения канала вследствие отложения на стенках аморфного кремнезема, халцедона, цеолитов и других минералов.

Зная, почему возникают гейзеры, можно проследить, как они появляются. Известно немного случаев образования но-

вых гейзеров. Однако четко установлено, что возникают они «не сразу» — гейзеру всегда предшествует термальный источник, который, развиваясь, переходит в гейзерный режим. И связан такой переход с изменением геометрии канала или режима теплоотвода. Образование выходов горячих источников связано с процессами растворения и выщелачивания окружающих пород, а также с тектоническим режимом — новые трещины-каналы часто возникают вследствие землетрясений. При этом образованию гейзеров нередко предшествуют гидротермальные (паровые) взрывы, сопровождающиеся выбросом обломков пород. В результате гидротермальных взрывов могут расширяться уже существующие каналы и образовываться подземные камеры. Так, после сильного землетрясения в 1959 г. в Йеллоустонском парке произошла серия гидротермальных взрывов, которые привели к образованию кратеров с выходами паровых струй. На месте этих кратеров через некоторое время возникли горячие источники, перешедшие к 1963—1964 гг. в режим гейзеров.

Проведенные исследования позволили понять механизм гейзерного процесса, определить параметры, контролирующие его, и установить количественные соотношения между ними. На основе представлений о механизме процесса были созданы лабораторные модели — по образному выражению Я. К. Голованова «гейзеры на столе», — в которых использование вакуумного моделирования позволило воспроизвести и количественно исследовать основные режимы работы гейзеров. Но, пожалуй, наиболее существенным результатом явилось создание физически обоснованных и экологически чистых методов изучения гейзеров, с помощью которых были впервые определены массовые, тепловые, геометрические и динамические параметры таких непохожих друг на друга гейзеров Камчатки, как Великан, Жемчужный, Щель, Фонтан, Большой, Конус и ряда других. Наши исследования показали, что даже при благоприятном геологическом строении гейзерный режим возможен в очень ограниченном диапазоне энтальпии и расхода: при низких параметрах возникают теплые и горячие источники, при высоких — кипящие источники и напорные паровые струи, т. е. режимы стационарные. И только в узком интервале между ними оказывается возможным периодический режим — гейзерный. Поэтому гейзеры и встречаются так редко.