

Гейзеры – геотермальные источники, по которым можно сверять часы

А. Б. Белоусов, М. Г. Белоусова

Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН (Петропавловск-Камчатский, Россия)

В статье описывается редко встречающийся природный гидрогеологический и геотермальный феномен – гейзер. Приводится информация о распространении гейзеров на Земле и о динамике их деятельности. Особое внимание уделено повторяемости (цикличности) извержений гейзеров. Рассмотрен уникальный 80-летний ряд наблюдений за их деятельностью в Долине гейзеров на Камчатке, полученный разными авторами с применением как традиционных визуальных наблюдений, так и автоматизированных систем. Показано, что извержения гейзеров происходят с удивительно точной повторяемостью во времени, которая сохраняется на коротких промежутках времени (сутки–месяцы), а на длительных временных интервалах (годы–десятилетия) наблюдаются изменения, вызванные как внешними метеорологическими и геологическими воздействиями, так и изменением притока термальной воды и пара в питающую систему гейзера.

Ключевые слова: гейзер, гейзерит, периодические извержения, Камчатка, Долина гейзеров.

В сознании обычного человека и даже ученого, который не является специалистом-гидрогеологом или вулканологом, гейзер – это струя кипятка и пара, бьющая из отверстия в земле. Поэтому любые кипящие источники или просто выбросы жидкости и газа, от прорывов городской канализации до выбросов на других планетах, часто называют гейзерами. Например, гейзерами планетологи назвали газовые струи, обнаруженные на некоторых ледяных спутниках планет-гигантов: Европе (Юпитер), Тритоне (Нептун) и Энцеладе (Сатурн), и требуется приложить усилие, чтобы понять, что это условное название инопланетного феномена неизвестной природы, не имеющего отношения к гейзерам.

Что такое гейзер, сколько их и где они расположены

Термин «гейзер» происходит от названия Большого Гейзера Исландии (geysir – от исландского слова «geysa» – хлынуть), который в начале XIX в. стал первым гейзером, известным европейским ученым [1]. В то время Большой Гейзер каждые полчаса выбрасывал струю кипящей воды на высоту около 60 м (рис. 1). В 1916 г. Большой Гейзер перестал действовать.



Александр Борисович Белоусов, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории активного вулканизма и динамики извержений Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Область научных интересов – физическая вулканология, пирокластическая стратиграфия, нестабильность вулканических построек, мониторинг вулканической активности.
e-mail: belousov@mail.ru



Марина Геннадьевна Белоусова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории активного вулканизма и динамики извержений Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Область научных интересов – физическая вулканология, пирокластическая стратиграфия, нестабильность вулканических построек, мониторинг вулканической активности.
e-mail: harimkotan@gmail.com

На заре развития науки геологии этому гейзеру уделялось большое внимание – описание его морфологии, режима и возможного механизма деятельности приводилось во всех учебниках, включая самый первый [2], и даже вошло в детскую энциклопедию [3]. Большой Гейзер Исландии

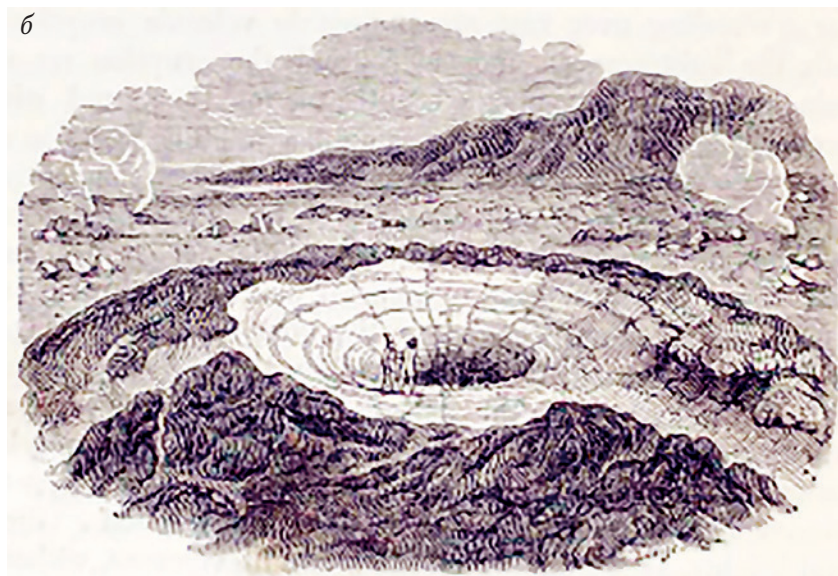


Рис. 1. Большой Гейзер Исландии: а – во время извержения (фонтанирования). Рисунок шотландского натуралиста Георга Стюарта Маккензи, 1811 г. [1]; б – грифон (ванна) Большого Гейзера между извержениями в 1830 г. [2]. В центре виден вход в вертикальный канал подводящей системы гейзера.

и его активность в момент первого научного описания закономерно служат эталоном для определения понятия «гейзер».

Позднее гейзеры были обнаружены и в других странах. Однако в целом это редко встречающийся природный гидрогеологический и геотермальный феномен.

Очевидно, что к гейзерам следует относить только естественные образования, однако не всегда естественные и искусственные примеры можно четко разграничить. Например, канал всемирно известного природного исландского гейзера Строккур в 1960-е гг. был несколько раз разрушен с целью активизации его затухающей деятельности. С этой же целью несколько раз искусственно понижали уровень воды в грифоне (ванне) эталонного Большого Гейзера Исландии. Природный гейзер Похуту в Новой Зеландии перестал извергаться из-за добычи по соседству подземного пара для выработки электроэнергии и в настоящее время он начинает действовать только при сокращении добычи пара. Деятельность этих изначально природных гейзеров сейчас управляется не только естественными факторами.

Считается, что всего на Земле около 1000 природных гейзеров, причем большинство из них сконцентрировано в трех небольших по площади районах – так называемых «гейзерных полях»: Йеллоустоне в штате Вайоминг (США) (около 500 гейзеров), Долине гейзеров на Камчатке 200 гейзеров), Эль-Татио на Альтиплано в Чили (85 гейзеров) [4] (рис. 2).

Кроме того, еще существуют одиночные гейзеры, которые хаотично разбросаны по многим вулканическим районам мира. Приводимые данные о количестве гейзеров имеют оценочный характер, так как они, как и все природные образования, очень разнообразны, и нет их общепринятого определения: например, многие заброшенные фонтанирующие буровые скважины даже в научной литературе описываются как гейзеры (Шикабе и Оникабе в Японии, Флай в штате Невада, а также «гейзеры» Калифорнии, Германии и др.). Кроме того, они недолговечны и часто прекращают активность как по



Рис. 2. Фонтанирование наиболее известных гейзеров мира:
 а – Олд-Фейтфул в Йеллоустоне, высота до 30 м, 2013 г.;
 б – Великан в Долине гейзеров, высота 20–30 м, 2009 г.;
 в – Строккур в Исландии, высота 15–20 м, 2017 г.

Здесь и далее фото А.Б. Белоусова

естественным причинам, так и в результате деятельности человека при эксплуатации геотермальной энергии района, или, наоборот, образуются новые. В Долине гейзеров на Камчатке после 2007 г. начали действовать десять новых гейзеров, но три из них к 2023 г. уже перестали извергаться [5].

Методы подсчета/учета активных гейзеров также не согласованы. Например, в Йеллоустонском национальном парке любой источник, который когда-либо в прошлом (за всю историю наблюдений с 1807 г.) действовал в гейзерном режиме, до настоящего времени продолжает считаться активным гейзером. Поэтому иногда на месте гейзера, указанного в путеводителе, обнаруживается застойное болотце с зеленой водой. Усугубляет проблему подсчета гейзеров и то, что они – привлекательный для туристов объект, поэтому природные парки, где есть гейзеры, имеют склонность завышать их количество.



Долина гейзеров – затерянный мир Камчатки

Долина гейзеров (ДГ) была обнаружена в центральной части Камчатки только в 1941 г. – это гейзерное поле стало третьим и последним крупным гейзерным полем, открытым на Земле, а также единственным известным в Евразии (рис. 3). В настоящее время в России, кроме гейзеров ДГ, известно еще два активных гейзера, также на Камчатке: по одному в кальдере Узон и на берегу Карымского озера. Кроме того, есть свидетельства существования в прошлом одиночных гейзеров в других районах Камчатки – на Узоне, Карымском озере, Паужетке, а также на Курильских островах (остров Шиадокотан).

Позднее открытие ДГ связано с тем, что она расположена далеко от населенных пунктов, в сильно пересеченной местности, практически непроходимой для лошадей и собачьих упряжек – традиционного транспорта Камчатки до появления вертолетов во второй половине XX в.

Вероятно, сказалось и то, что коренное население Камчатки считало любые горячие источники местом обитания злых духов, и не только сторонилось их, но и старалось скрыть от казаков и других пришлых людей. Первые топографические карты этой части Камчатки появились только во время Второй мировой войны (как часть подготовки доставки грузов с Аляски по ленд-лизу).

Несмотря на труднодоступность, в район ДГ с середины XVIII в. начали изредка проникать научные экспедиции и отдельные исследователи. Первыми были участники Камчатской экспедиции Беринга Георг Стеллер и Степан Крашенинников, которые в 1737–1741 гг. проехали на собачьих упряжках по берегу Тихого океана в районе вулкана Семячик. В 1854 г. немецкий натуралист-путешественник Карл Фон Дитмар посетил кальдеру Узон, находящуюся на расстоянии дневного перехода (15 км) от ДГ. В 1909 г. в районе верховьев ДГ работал отряд Камчатской экспедиции Русского императорского географического общества, финансируемой меценатом Рябушинским. Коллектор отряда студент В.П. Савич (в будущем президент Всероссийского географического общества) наблюдал в глубоком каньоне у подножья вулкана Кихпиныч мощный выход пара. Он назвал это место Ущельем Большой Фумаролы. Весьма вероятно, что это была долина р. Гейзерной, и он мог издали видеть облако извержения гейзера Великан. В 1933 г. кальдеру Узон изучал будущий организатор и первый директор Института вулканологии Б.И. Пийп. Однако его конный отряд также обошел стороной сплетение непроходимых

каньонов в истоках реки Шумной, где через восемь лет была открыта одна из крупнейших гидротермальных систем Камчатки с многочисленными кипящими источниками, среди которых оказалось много гейзеров.

Честь открытия гейзеров выпала сотруднице Кроноцкого заповедника Татьяне Устиновой и Анисифору Крупенину, которые ранней весной 1941 г. на лыжах и собачьих упряжках проникли в неизвестную долину, выясняя вопрос об истоке малоприметной реки Шумной, впадающей в Тихий океан. Само открытие имело характер выигрыша в лотерею, но безусловная заслуга Устиновой в том, что она сумела правильно интерпретировать обнаруженные проявления гидротермальной деятельности, осознать их важность и донести полученные сведения до научного сообщества в условиях военного времени. Устинова опубликовала первое описание гейзеров ДГ, дала названия 22 самым крупным из них и измерила периодичность их извержений [6].

Разные авторы приводят разные данные о количестве гейзеров в ДГ: Т.И. Устинова описывает 25 гейзеров [6], А.А. Райк – 22 гейзера [7], В.М. Сугробов и др. – более 30 [8], в каталоге А.В. Леонова [9] упоминаются 40 активных гейзеров и еще 49 погибших (в основном, во время крупных горных обвалов 2007 и 2014 гг.). Наибольшее количество – 200 гейзеров указано в отчете Американской Ассоциации наблюдения и изучения гейзеров (The Geysir Observation and Study Association, GOSA), которая посетила ДГ в сентябре 1991 г. [10].

Динамика деятельности гейзеров

Один из первых отечественных физиков, исследовавших гейзеры, А.С. Нехорошев [11] определил их как «источники, периодически выбрасывающие на поверхность паро-водяную смесь». Из этого определения следует, что 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. Таким образом, постоянно действующий гидротермальный источник, как бы неистово он не извергался, не является гейзером. Например, в Долине гейзеров есть очень красивый кипящий источник Аверьевский, который непрерывно фонтанирует на высоту до 5 м. Соответственно, гейзером он не считается.



Рис. 3. Долина гейзеров: *а* – общий вид с притоками р. Шумной, вытекающей из кальдеры Узон и впадающей в Тихий океан. 2017 г.; *б* – Витраж, бронированный слой разноцветного гейзерита, участок левого борта р. Гейзерной усыпан гейзерами и кипящими источниками. Самый левый выход пара – гейзер Великан. 2012 г.



Рис. 4. Котлы – один из самых необычных гейзеров Долины гейзеров: *а* – на стадии покоя его грифон (два отверстия в средней части кадра) медленно наполняется водой; *б* – после короткого излива вода мгновенно с шумом проваливается вниз, внутрь подводящей системы. Фонтанирование у этого гейзера практически отсутствует. Интервал времени между стадиями *а* и *б* около 2 сек. 2012 г.

В промежуток времени между двумя последовательными стадиями покоя гейзер находится в состоянии извержения, в ходе которого на поверхность земли поступает кипящая, или почти кипящая, вода и пар в разных пропорциях. Необходимо отметить, что подавляющее большинство природных гейзеров извергают воду с температурой близкой к температуре кипения. Но ответ на вопрос: все ли гейзеры приводятся в действие выбросами пара – неоднозначен. Анализ имеющихся в литературе описаний, так называемых «хо-

лодных гейзеров», приводимых в действие выделением растворенного углекислого газа CO_2 , показал, что все они являются заброшенными буровыми скважинами. Вместе с тем, одна из имеющихся теорий гейзерного процесса [12, 13] указывает на принципиальную возможность существования природных гейзеров, приводимых в действие не только паром (т.е., кипящих), но и любыми другими выделяющимися из воды спонтанными газами (т.е., холодных). Однако, достоверные находки таких природных гейзеров авторам не известны.

По соотношению вода/пар и по интенсивности процесса извержение гейзера, в свою очередь, подразделяется на стадии излива (спокойное истечение воды), фонтанирования (бурный выброс воды и пара) и парения (выброс пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью), которые последовательно сменяют друг друга. Отметим, что в русскоязычной литературе только стадия фонтанирования называется извержением, в то время, как в англоязычной литературе, в понятие извержения включаются стадии излива, фонтанирования и парения.

Извержения не всех гейзеров проявляют полный набор перечисленных стадий. У некоторых гейзеров отсутствует стадия излива и/или стадия парения, а у некоторых гейзеров стадия фонтанирования может быть настолько слабой, что имеет вид отдельного всплеска небольшой высоты и мало отличается от стадии излива (в последнем случае гейзер часто классифицируют как кипящий пульсирующий источник).

Некоторые гейзеры в дополнение к вышеперечисленным «классическим» стадиям демонстрируют и другие типы активности. Например, через некоторое время после стадии фонтанирования (если в грифоне осталась вода) может наблюдаться резкое, значительное понижение ее уровня – гейзер как бы всасывает оставшуюся в грифоне и канале воду вниз в подводную систему. Наиболее эффектно это проявляется у весьма своеобразного камчатского гейзера Котлы (рис. 4).

У некоторых гейзеров стадия излива перед стадией фонтанирования приобретает пульсирующий характер, как, например, было у камчатского гейзера Великан до 2014 г., а у гейзера Олд-Фейтфул (Old Faithful) в Йеллоустоне она даже выделена в качестве отдельной стадии – предвестника фонтанирования (preplay).

Высота фонтанирования разных гейзеров сильно различается: от первых десятков сантиметров до многих десятков метров. Чемпионы по высоте фонтанирования: в Йеллоустоне – Steamboat до 100–110 м, Giant до 80 м, в Долине гейзеров – Грот до 65 м (рис. 5) и Великан (до 2014 г.) 30–40 м (рис. 2). Часто упоминаемый в литературе гейзер Ваймангу в Новой Зеландии, высота фонтанирования которого в 1900–1904 гг. якобы достигала 400 м, судя по всему, представлял собой не гейзер, а серию гидротермальных взрывов, так как у этого явления не было необходимой периодичности и стадийности процесса извержений, а вместе с водой и паром выбрасывалось много обломочного материала вмещающих пород, т.е., не было устойчивой подводной системы, характерной для гейзеров.



Рис. 5. Грот – самый крупный, но нерегулярный и редко фонтанирующий гейзер Долины гейзеров. Расположен в верхней правой части Витража. Первое известное фото извержения, 1991 г. [10].

Стоит отметить, что приводимые данные о высотах фонтанирования гейзеров неоднозначны. Предполагается, что измерена высота выброса достаточно крупных водяных капель: однако, размер этих капель никак не оговаривается. Так как выбрасываемая гейзером струя воды с высотой дробится на все более мелкие капли и плавно переходит в конвективно поднимающееся (на значительно большую высоту) облако пара, то здесь имеется лазейка для завышения высоты фонтанирования (иногда с целью впечатлить туристов).

Объем воды, выбрасываемый гейзерами во время фонтанирования, также очень различен: от первых литров у самых маленьких, до нескольких десятков и даже сотен кубических метров у крупных гейзеров. Продолжительность стадии фонтанирования многих, даже крупных гейзеров, как правило, короткая, редко более нескольких минут. Например, до 2014 г. самый крупный, регулярно действующий гейзер ДГ Великан «выстреливал» 20–30 м³ воды за 1 мин. Однако есть и исключения: например, фонтанирование относительно небольшого гейзера Пийп продолжается 15 мин, а гейзер Парящий непрерывно фонтанирует около четырех часов. Стадия парения, если она есть, также короткая, поэтому большая часть продолжительности извержений многих гейзеров приходится на стадию излива.

Имеющаяся у гейзера 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. Он является простой, наглядной,

легко измеряемой характеристикой деятельности любого гейзера. Этот интервал строго индивидуален, и у разных гейзеров может составлять от нескольких минут до нескольких суток, и даже месяцев. Длительность периода извержений гейзеров имеет некоторую корреляцию с их размером (объемом извергаемой воды): период действия наиболее крупных гейзеров, как правило, продолжительный, и у некоторых (Steamboat в Йеллоустоне, Грот в Долине гейзеров) может превышать

год. При этом, деятельность крупных гейзеров часто носит нерегулярный характер, поэтому их извержения редко удается наблюдать. Так фонтанирование Грота впервые удалось сфотографировать только в 1991 г., а до этого возможность его фонтанирования считалась гипотетической (гейзер находился в состоянии непрерывного излива). Предание гласит, что в 1991 г. фонтанирование Грота было искусственно стимулировано инспектором заповедника В.А. Николаенко, чтобы впечатлить членов экспедиции GOSA: для этого он целенаправленно понизил уровень воды в грифоне гейзера, временно убрав несколько камней в истоке вытекающего из него ручья. Впоследствии, например в 2022–2024 гг., Грот стал фонтанировать относительно часто (1–2 раза в месяц), и инспекторам заповедника удалось несколько раз сфотографировать его естественное (не стимулированное) фонтанирование.

Регулярность извержений гейзеров известна с момента первых описаний Большого Гейзера Исландии и в дальнейшем подтверждена наблюдениями на многих других гейзерах мира. Поэтому измерения периода извержений рутинно производятся практически всеми исследователями. Показательно, что при имеющемся большом разбросе в размерах гейзеров и масштабах их извержений, 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.

Продолжительность гейзерного цикла и продолжительность отдельных его стадий традиционно измеряют вручную, визуально наблюдая деятельность гейзера с часами/секундомером. Простота таких измерений позволяет уверенно сравнивать результаты измере-

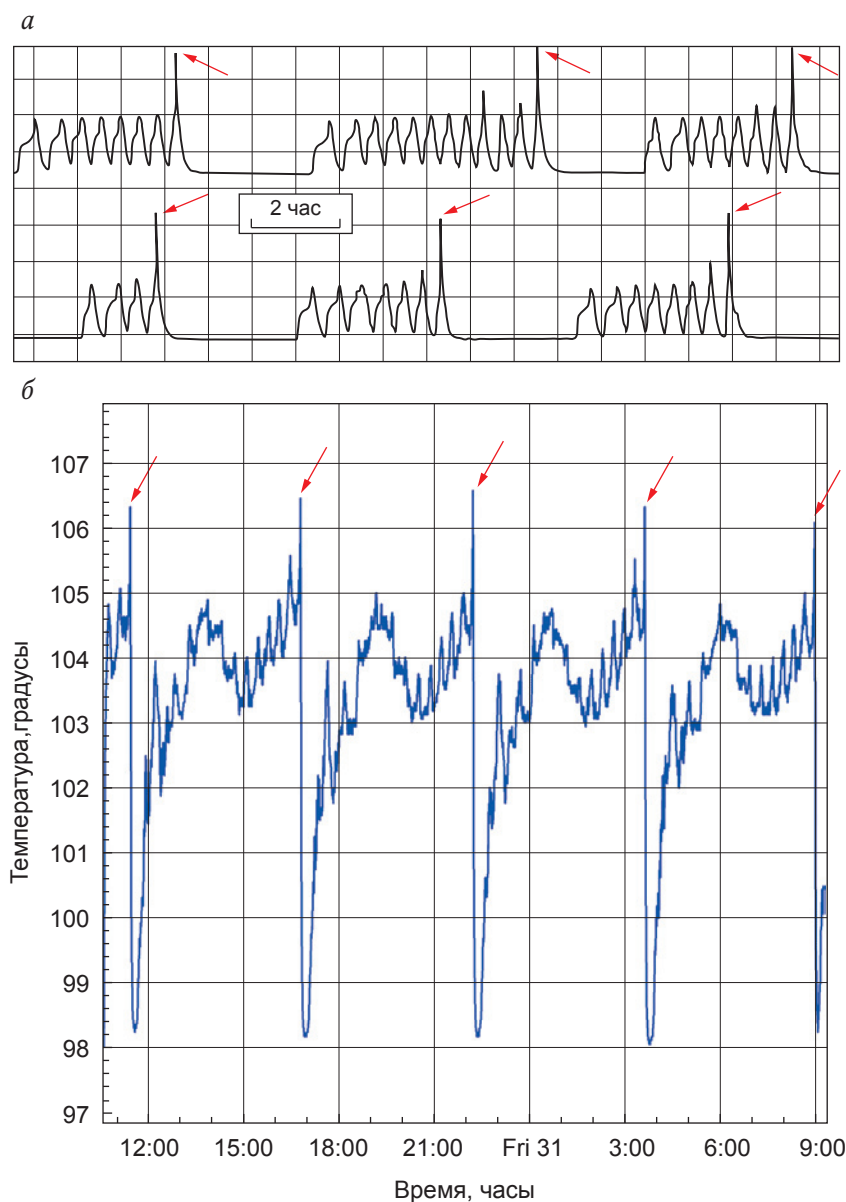


Рис. 6. Записи режима гейзера Великан: а – с использованием механического самописца уровня воды «Валдай» в 1975 г.; по вертикали – уровень воды, по горизонтали – время, запись идет слева направо; маленькие пики – пульсации стадии излива, большие пики (указаны красными стрелками) – стадии фонтанирования; б – запись на термоллоггер изменения температуры воды в канале гейзера 30 августа 2012 г. Хорошо видно четыре цикла активности.

ний разных исследователей, выполненные в разные годы. В последние десятилетия появилась возможность проводить измерения автоматически, регистрируя ряд параметров, которые закономерно и циклически меняются в процессе гейзерного цикла: в основном, это положение уровня воды в грифоне, ее расход и температура (рис. 6).

Применение автоматических, особенно электронных средств регистрации, выявило удивительную регулярность гейзерного цикла, особенно для коротких (несколько десятков циклов) последовательностей извержений, при которых с высокой точностью выдерживается как общая продолжительность циклов, так и продолжительности его отдельных стадий. Цикличность действия многих гейзеров выдерживается настолько точно, что даже существует метафора «по гейзеру можно сверять часы». Устойчивая во времени цикличность и связанная с ней предсказуемость деятельности гейзеров, не менее чем собственно их бурное фонтанирование, привлекательны для туристов и исследователей, которые пытаются понять механизм этого природного явления. Однако большинству туристов, посещающих Долину Гейзеров, не удастся увидеть завораживающую повторяемость действия гейзеров. Из-за ограниченного времени организованной экскурсии, им обычно показывают только одну стадию фонтанирования одного-двух гейзеров.

Продолжительности цикла гейзеров

В Долине гейзеров визуальные измерения циклов извержений гейзеров начали проводиться с момента ее открытия в 1941 г., и к настоящему времени накопился уникальный ряд наблюдений продолжительностью более 80 лет, полученных как при визуальных наблюдениях, так и с применением автоматических средств регистрации (табл. 1). Полнота собранных данных во многом связана с тем, что в 1962 г. в Петропавловске-Камчатском

был создан Институт вулканологии АН СССР, который с тех пор выполняет систематическое изучение Долины гейзеров. В базе данных «Гейзеры Камчатки», которая сейчас создается в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (<http://geoportal.kscnet.ru/geyser/>) нами собраны и проанализированы все имеющиеся (опубликованные и неопубликованные) данные о режиме гейзеров ДГ, а также данные наших собственных измерений в 1998–2024 гг.

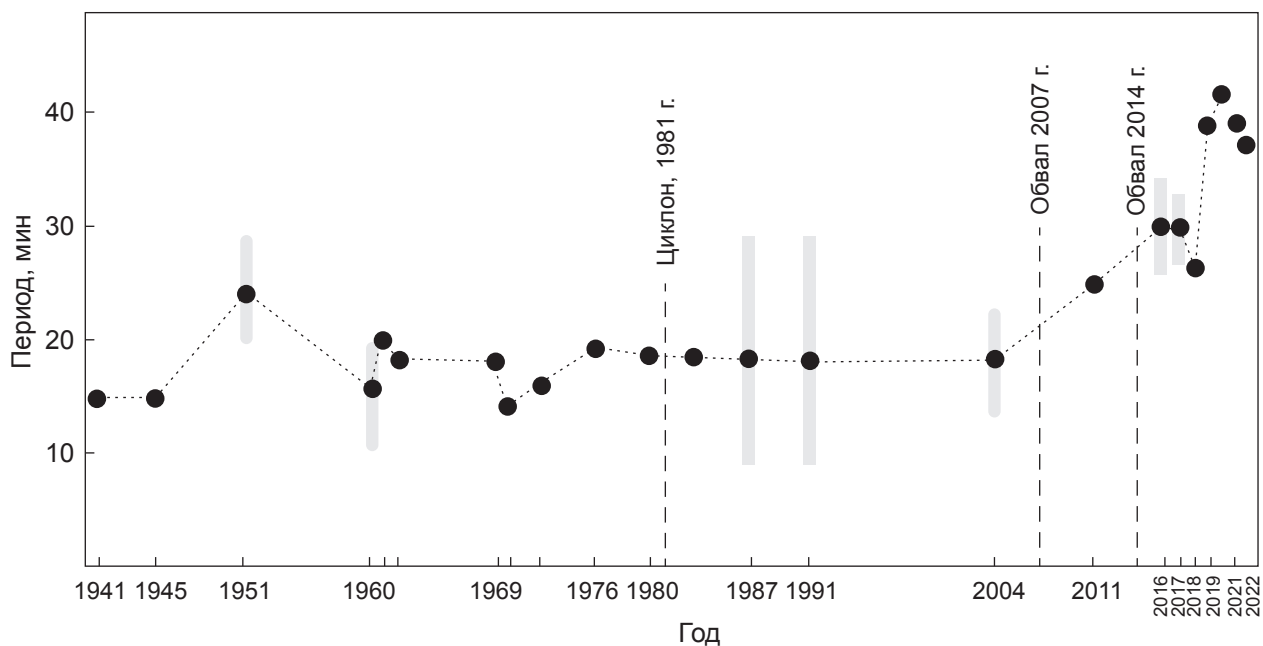
Анализ данных восьмидесятилетнего изучения гейзеров ДГ показал, что продолжительность цикла – уникальная и достаточно устойчивая во времени характеристика каждого гейзера. Особенно точно цикл выдерживается на коротких отрезках времени: на протяжении нескольких десятков последовательных циклов, а на более продолжительных отрезках времени начинает наблюдаться все больший разброс значений, который может быть разным у разных гейзеров. Эти изменения могут быть как резкими, так и постепенными, а также преходящими или постоянными, в зависимости от причин, которые их вызвали. Так резкие преходящие изменения вызываются, в основном, колебаниями погодных и/или гидрологических условий в районе расположения гейзера. Резкие долговременные изменения могут быть вызваны разнообразными внешними геологическими воздействиями на гейзер (например, оползнями, которые повреждают грифон гейзера или приводят к попаданию камней в его канал). Постепенные, долговременные изменения связаны с переменами в глубинном питании гейзера. Далее рассмотрено несколько примеров эволюции периодов извержений гейзеров ДГ во времени.

Гейзер Фонтан. На протяжении значительной части наблюдений (1941–2004 гг.) демонстрировал относительно стабильный период извержений продолжительностью около 20 мин. Однако с 2011 г. и особенно с 2016 г. начался устойчивый рост пе-

Таблица 1. Основные методы измерений периода деятельности гейзеров Долины гейзеров

1941–1972 гг.	1972–1991 гг.	1991–2007 гг.	2007–2021 гг.
Эпизодические визуальные наблюдения за деятельностью гейзеров. По источникам [7, 8] и др.	Автоматическая длительная регистрация с использованием механических самописцев уровня воды («Валдай» и ГР-38). По источникам [8, 14] и др.	Автоматическая система длительной регистрации, основанная на замыкании электрической цепи водой при извержении. По источникам [8, 9] и др.	Автоматическая периодическая регистрация с использованием time-lapse камер и электронных логов температуры и давления, погружаемых в канал гейзеров. По источникам [5, 15] и др.

а



б

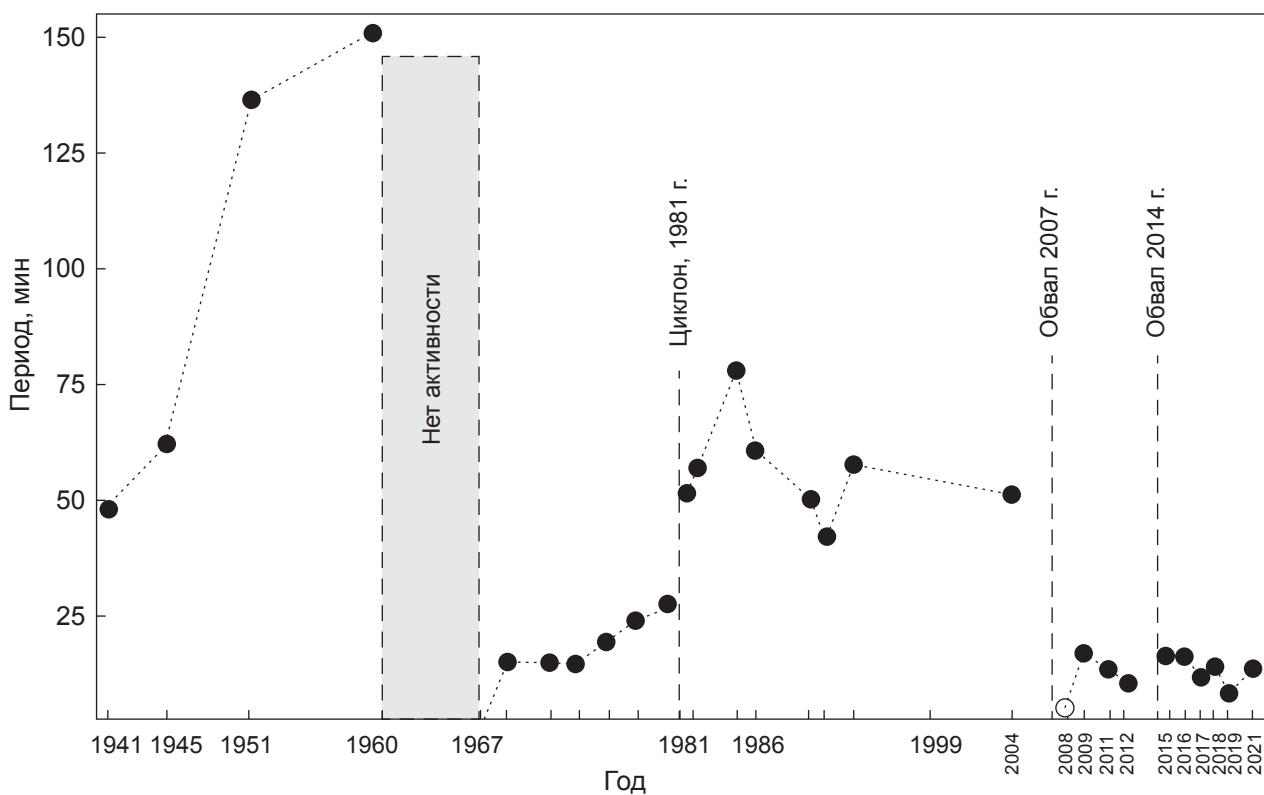


Рис. 7. Изменения периода извержений гейзеров в 1941–2022 гг.: а – Фонтан; б – Первенец. Точки – средние значения; светло-серые столбики (на рис. а) – диапазон разброса значений (если известен). Пунктиром отмечены наиболее значительные метеорологические и геологические события в Долине гейзеров.

риода извержений гейзера, который к 2021 г. увеличился до 35–40 мин, чего ранее не наблюдалось (рис. 7а).

Относительная стабильность периода извержений гейзера Фонтан связана, по-видимому, с особенностями его расположения и морфологией: гейзер имеет глубокий грифон, у него нет стадии излива, и он находится в защищенной от ветра нише речной террасы, достаточно далеко от подножий склонов, русел водотоков и от других гейзеров. Поэтому ветер, атмосферные осадки и другие холодные поверхностные воды не могут попадать в грифон и эффективно охлаждать заполняющую его воду, т.е. влияние метеоусловий на этот гейзер незначительно. Гейзер образовался относительно давно (до 1941 г.), поэтому изменение геометрии его подводящих каналов является маловероятным и не может служить причиной изменений его периодичности. Фонтан не пострадал от прямого воздействия обвалов и оползней 2007 и 2014 гг. и зафиксированное с 2011 г. плавное увеличение его периода может быть результатом уменьшения притока питающей паро-водяной смеси, поднимающейся из глубин гидротермальной системы. Возможной причиной этого может быть изменение общей геологической и гидрогеологической обстановки в ДГ после крупных оползней 2007 и 2014 гг.

Гейзер Первенец. Гейзер Первенец на протяжении всех восьмидесяти лет наблюдений демонстрировал как резкие, так и постепенные изменения периода в диапазоне от 7 до 150 мин, и даже без видимых причин полностью прекращал деятельность в 1960–1967 гг. (рис. 7б). Гейзер расположен на низком берегу, в непосредственной близости от русла полноводной реки Шумная. До 2007 г. грифон Первенца находился глубоко между камней, поэтому ветер и атмосферные осадки не могли его эффективно охлаждать. Резкое увеличение периода деятельности гейзера было зарегистрировано после мощного циклона 1981 г. [14], следовательно и другие изменения в его деятельности до 2007 г. могут быть связаны с изменениями водного стока реки Шумной. В 2007 г. гейзер Первенец был полностью перекрыт слоем грубообломочных отложений оползня толщиной около 6 м, но это не привело к полному прекращению его деятельности. К апрелю 2008 г. над его погребенным грифоном образовалась воронка глубиной около 4 м, на дне которой действовал пульсирующий кипящий источник. Таким образом, гейзер оказался способен постепенно перемалывать и вымывать перекрывающий его обломочный материал. К 2015 г. воронка расширилась и углуби-

лась до 6 м (при этом одна ее сторона была срезана эрозией р. Шумная), и находившийся в ней пульсирующий источник частично восстановил гейзерный режим деятельности с периодом около 15 мин и высотой фонтанирования до 3–5 м.

Постройки гейзеров и продолжительность их жизни

В результате частых, повторяющихся извержений местность вокруг грифона гейзера периодически орошается выброшенной горячей водой. При остывании и обсыхании из этой воды осаждаются растворенные вещества (в основном, это кремнезем SiO_2). Даже после одного извержения отлагается пленка кремнезема микроскопической толщины, но если гейзер действует достаточно продолжительное время, вокруг его грифона постепенно нарастает корка тонкослойной кремнистой породы, называемой гейзеритом, который по составу и происхождению близок к накипи, образующейся в чайнике (рис. 8).

В формировании гейзерита активное участие принимают живущие вокруг гейзеров особые термофильные водоросли и бактерии. Эти организмы, а также примеси различных веществ, осаждающихся из воды совместно с кремнеземом, часто придают гейзериту разнообразную яркую окраску. Красота гейзеритовых построек привлекает не только туристов, но и вандалов, которые не знают, что без периодического орошения горячей водой термофилы погибают, гейзерит высыхает, и отбитый разноцветный сувенир превращается в кусок тусклого серого камня.

Чем дольше действует гейзер, тем толще корка его гейзерита, и в результате вокруг гейзерного грифона формируется гейзеритовая постройка, которая может иметь разнообразную форму и размеры, определяемые спецификой активности каждого гейзера и широким набором внешних факторов (рельеф и состав подстилающей поверхности, локальные метеоусловия и т.д.). Измерения в Долине Гейзеров позволили установить, что слой гейзерита толщиной 1.5 мм нарастает в среднем за 5–15 лет. Эти данные позволяют оценивать время существования отдельных гейзеров. Так, самые старые гейзеры ДГ окружены слоем гейзерита не более 5 см и поэтому имеют возраст не более 150–500 лет [15].

Проблемы исследования гейзеров

Активные гейзеры – природные образования, которые по многим причинам очень трудно изучать. Питающие каналы гейзеров расположены под

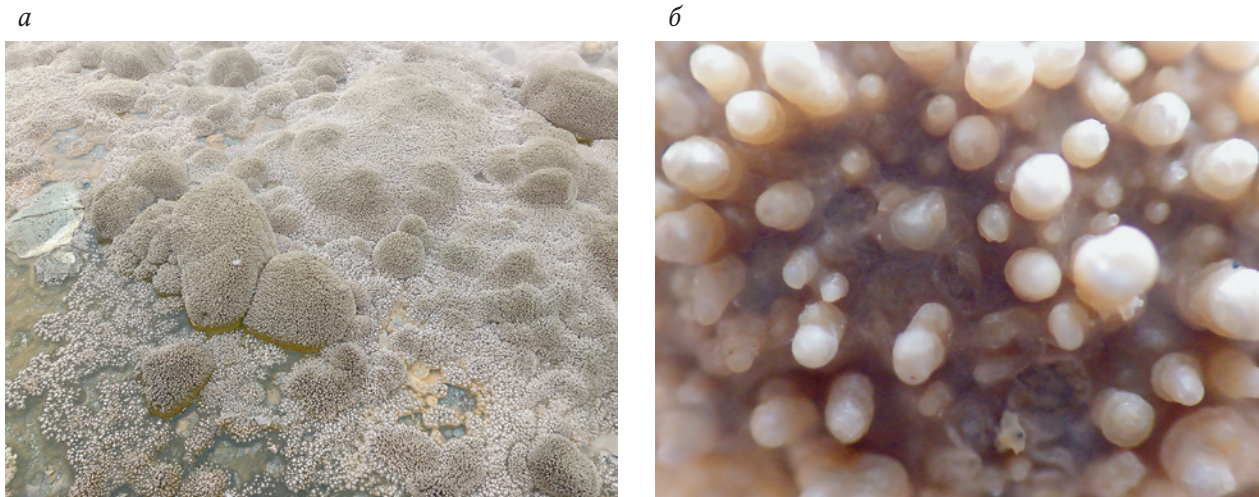


Рис. 8. Гейзерит вокруг грифона гейзера Фонтан: *а* – общий вид, поперечник кадра около 1 м; *б* – макрофотография, диаметр гейзерных наростов 3–5 мм.

землей: они узкие, извилистые, заполнены горячей водой и паром и практически недоступны для прямых наблюдений, а большая сложность геологического строения окружающих пород и сильная обводненность затрудняют применение геофизических методов просвечивания. Имеющиеся жесткие природоохранные ограничения не позволяют применять такие инвазивные геологические методы исследования, как бурение, а практически полное отсутствие вскрытых эрозией каналов потухших гейзеров не дает возможности проводить палеорекострукции. В этой ситуации мониторинг динамики гейзерных извержений с измерением продолжительности их цикла является одним из немногих доступных методов исследования гейзеров.

Понимание механизма действия гейзеров, помимо интереса фундаментальной науки, важно и с прикладной точки зрения – для выяснения закономерностей функционирования гидротермальных систем, которые представляют практический интерес, например, как источник безуглеродной зеленой энергии. Периодические «гейзероподобные» флуктуации расхода газожидкостных смесей иногда спонтанно и неконтролируемо возникают при эксплуатации различных искусственных гидродинамических установок (буровых скважин, химических заводов или систем охлаждения), что может приводить к техногенным авариям. Кроме того, слежение за изменениями режима активности природных гейзеров рассматривается как один из методов поиска предвестников тектонических землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-27-00318 «Механизм периодического действия гейзеров, эволюция динамики их извержений при изменениях окружающей среды и геологической обстановки»).

Литература / References

1. Mackenzie G.S. Travels in the Island of Iceland. Edinburgh, 1811.
2. Lyell C. Principles of geology. 1830.
3. The popular science monthly. 1878–1879; 12: 407–417.
4. Bryan T.S. The geysers of Yellowstone. Colorado, 1995.
5. Белоусов А., Белоусова М. Образование гейзеров после обвала 2014 г. в Долине Гейзеров. Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 2020: 147–150. [Belousov A., Belousova M. New geysers of Geyser Valley in 2015–2019. Volcanism and related processes. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2020: 147–150. (In Russ.)]
6. Устинова Т.И. Гейзеры Камчатки. М., 1955. [Ustinova T.I. Geysers of Kamchatka. Moscow, 1955. (In Russ.)]
7. Райк А.А. О режиме гейзеров Камчатки. Исследование природы Дальнего Востока. Таллин, 1963. [Raik A.A. On the regime of Kamchatka geysers. Study of the nature of the Far East. Tallinn, 1963. (In Russ.)]

8. *Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А. и др.* Жемчужина Камчатки – Долина гейзеров. Петропавловск-Камчатский, 2009. [Sugrobov V.M., Sugrobova N.G., Droznin V.A. et al. The Pearl of Kamchatka – the Valley of Geysers. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009. (In Russ.).]
9. *Леонов А.В.* Каталог гейзеров Кроноцкого заповедника. Долина гейзеров и кальдера вулкана Узон: история и современность. М., 2017. [Leonov A.V. Catalog of geysers of Kronotsky Reserve. Valley of geysers and caldera of Uzon volcano: History and modernity. Moscow, 2017. (In Russ.).]
10. *Bryan T.S., Hobart J., Warnock B. et al.* The geysers of «The Valley of Geysers». A special report of GOSA Transactions USA. California, 1991.
11. *Нехорошев А.С.* К вопросу о теории действия гейзеров. Доклады АН СССР. 1959; 127(5): 1096–1098. [Nekhoroshev A.S. On the theory of geyser action. Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. 1959; 127(5): 1096–1098. (In Russ.).]
12. *Belousov A., Belousova M., Nechaev A.* Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: Implications for the geyser mechanism. *Geology*. 2013; 41: 387–390.
13. *Белусов А.Б., Белусова М.Г.* Новый подход к физическому моделированию периодического действия гейзеров. Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 2023: 108–110. [Belousov A.B., Belousova M.G. New approach to physical modeling of periodic action of geysers. Volcanism and related processes. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2023: 108–110. (In Russ.).]
14. *Сугрובה Н.Г., Сугробов В.М.* Изменение режима термопроявлений Долины гейзеров под влиянием циклона «Эльза». Вопросы географии Камчатки. 1985; 9: 88–94. [Sugrobova N.G., Sugrobov V.M. Changes in the regime of thermal manifestations of the Valley of Geysers under the influence of cyclone «Elsa». Questions of the geography of Kamchatka. 1985; 9: 88–94. (In Russ.).]
15. *Белусов А.Б., Белусова М.* Роль оползней в формировании гейзеров Долины гейзеров, Камчатка. Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, 2017: 155–157. [Belousov A.B., Belousova M. The role of landslides in the formation of geysers in the Valley of Geysers, Kamchatka. Volcanism and related processes. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2017: 155–157. (In Russ.).]

Geysers are geothermal springs that can be used to set your watch

A.B. Belousov, M.G. Belousova

Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia)

The article describes a rare natural hydrogeological and geothermal phenomenon – a geyser. Information is provided on the distribution of geysers on Earth and on the dynamics of their activity. Particular attention is paid to the recurrence (cyclicality) of geyser eruptions. A unique 80-year series of observations of their activity in the Valley of Geysers in Kamchatka, obtained by different authors using both traditional visual observations and automated systems records, is considered. It is shown that geyser eruptions occur with surprisingly precise repeatability in time, which is maintained over short time intervals (days-months). Over long time intervals (years-decades) the changes in periodicity observed which are caused by both external meteorological and geological impacts on geysers and changes in the inflow of thermal water and steam into the geyser's feeding system.

Keywords: geyser, geysersite, periodic eruptions, Kamchatka, Valley of Geysers.