

## Эволюция гейзера Шаман как отражение приповерхностных процессов гидротермальной системы кальдеры Узон

*Карпов Г.А., Калачева Е.Г.*

### Shaman geyser evolution as a response to the near-surface processes of the Uzon caldera hydrothermal system

*Karpov G.A., Kalacheva E.G.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: karpovga@kscnet.ru; keg@kscnet.ru*

Представлен ретроспективный анализ результатов 16-тилетних наблюдений за деятельностью гейзера Шаман, показана эволюция химического состава, изменение морфоструктуры и режима деятельности источника.

Кальдера Узон – уникальный пример территории с разнообразными проявлениями современных гидротермальных процессов, включая наличие источников, работающих в гейзерном режиме. Несмотря на то, что в настоящее время гейзер – скорее редкость, чем обычное явление в кальдере, многие факторы указывают на наличие здесь крупных гейзеров в прошлом. Отложения гейзерита, встречающиеся в виде как небольших корок вокруг выходов гидротерм, так и крупных пластов, распространены на площадках Восточного термального поля (ВТП). В южном борту залива Пийпа оз. Фумарольное под водой на глубине 0.5 м обнаружены отложения крупной гейзеритовой постройки, почти отвесно уходящей на глубину до 16 м. Небольшой гейзер Светлана в течение нескольких лет функционировал на южной окраине Участка I (Серные бугры) ВТП. Новый гейзер Шаман появился на противоположной стороне этой площадки в сентябре 2008 г. (рис. 1).

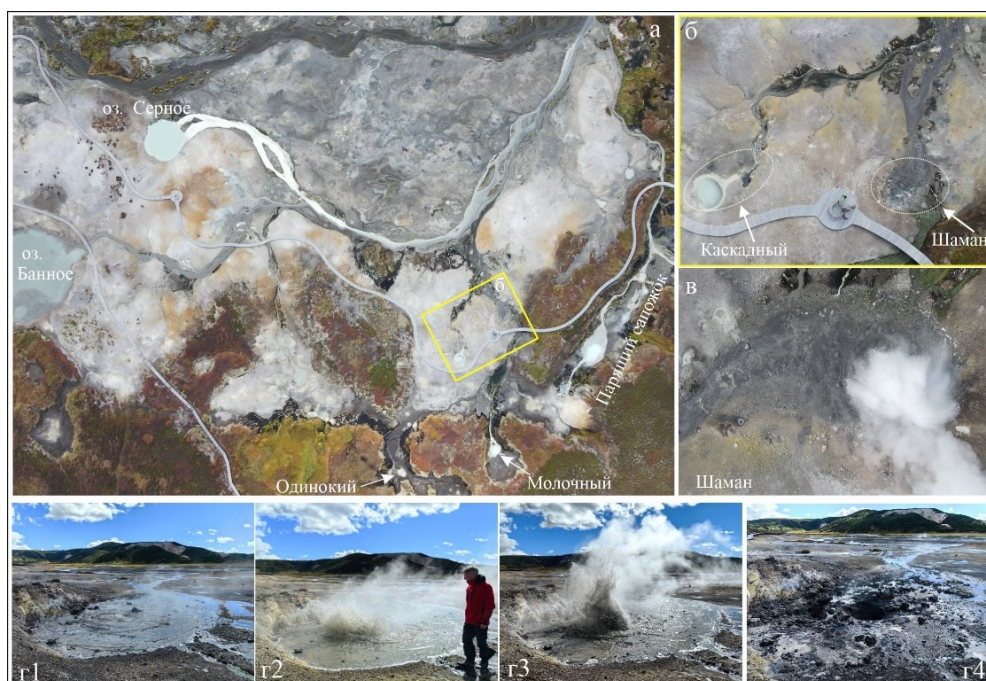


Рис. 1 Участок I (Серные бугры) Восточного термального поля кальдеры Узон (а) с детализацией местоположения (б) и фрагментом извержения (в) гейзера Шаман. Съемка с дрона – Л. Пташинский. Стадии извержения гейзера Шаман: заполненная ванна (г1), первые всплески (г2), извержение (г3), опустошенная ванна (г4). Автор фотографий – Е. Калачева.

### Результаты исследования

*История возникновения и режим гейзера Шаман.* Гейзер Шаман образовался на месте небольшого пульсирующего источника у подножия невысокого бугра, сложенного измененными алевро-псаммитовыми и псефитовыми туфами. С запада грифон гейзера

огибает термальный ручей, питаемый источниками Молочный и Одинокый, а с востока – ручей от источника Каскадный. Последний состоит из двух выходов, контрастных по своим физико-химическим параметрам и внешнему виду. Несколько лет назад сотрудниками Кроноцкого заповедника по территории Участка I была проложена тропа, а на бугре рядом с гейзером оборудована смотровая площадка (см. рис. 1).

Первые извержения длились всего несколько секунд, но регулярно повторялись в течение суток с интервалом 20-30 минут. Были зафиксированы единичные пароводяные выбросы высотой до 2 м [5]. Летом 2009 г. был впервые зафиксирован полный цикл извержения [2]. Первые детальные наблюдения за гейзером были проведены в период с 17 июля по 10 августа 2009 г., а затем в сентябре 2010 г. [3]. В первые годы после возникновения происходило, в среднем, от 11 до 14 полных циклов работы гейзера в сутки с интервалом между извержениями от полутора до двух часов. Струи воды при этом поднимались практически вертикально на высоту 0.8-1 м. В научной литературе за гейзером закрепилось название «Шаман» [3]. Режим его деятельности сохранялся и в период с 2012 по 2017 гг., однако высота фонтана увеличилась до 4 м [6].

Грифон гейзера в начале своего существования имел округлую форму диаметром порядка 1.5 м, но уже к июлю 2009 г. он приобрел изометрическое очертание размером 4.5×6 м, с крутым северным бортом и двумя кольцевыми террасами, фиксирующими уровни положения воды (полное заполнение и самый низкий после извержения). Канал гейзера был несколько смещен от центра к северу, его устье округлой формы имело размеры 25×30 см, максимальная измеренная глубина достигала 1.8 м при диаметре ~15 см; глубже канал сильно сужался.

Постепенно конфигурация ванны грифона менялась. В 2019 г. она заметно просела, в результате чего произошло перенаправление водного потока из соседнего ручья в канал гейзера [6]. Цикличный сброс воды продолжался, интервал между финальными фазами (уход воды обратно в канал) сократился до 80 мин., но уже начали появляться пропуски стадии извержения. Само извержение длилось в среднем 4.5 мин. Характерно, что фонтан бил уже не вертикально, а под углом около 70°, т.е., видимо, канал в верхней зоне стал наклонным. Устье канала расширилось до 0.5 м, и в нем плавала пена белого цвета, а поверхность северного крутого борта ванны покрылась возгонами квасцов желто-оранжевого цвета. Сформировалось единое русло ручья, по которому поток воды в ходе извержения стекал в общий ручей, дренирующий термальную площадку.

В летне-осенний период 2023-2025 гг. деятельность гейзера продолжалась, цикл работы составлял от 40 до 60 мин., кульминационная фаза (извержение) фиксировалась уже не так часто, преимущественно в дневное время и в теплые солнечные дни. Высота отдельных выбросов достигала 1.5 м, длительность извержения сократилась до 1.5 мин., за это время происходило от 4 до 6 выбросов. Грифон гейзера имеет практически плоскую овальную ванну диаметром порядка 4×5 м, с севера и северо-востока окруженную отложениями бугра (рис. 1, г4). Сброс воды во время переполнения грифона/извержения происходил по ранее образованному руслу. Сток из близлежащего ручья продолжает постоянно заливать грифон гейзера и его канал, как во время опустошения канала, так и в период наполнения; только при полной воде поток горячей воды вытесняет более холодную, и ручей обтекает гейзер. Появились признаки загрязнения извергаемой воды – она стала мутной (рис. 1, г1-г3). В ванне появились проколы с выходами газов, хорошо заметные при высоком уровне воды.

*Эволюция химического состава.* Гейзер образовался на месте горячего (80 °С) пульсирующего источника с кислой (pH=5.15) водой хлоридно-натриевого состава с минерализацией 3.1 г/л (без учета SiO<sub>2</sub>) (рис. 2). Для этого источника было характерно высокое содержание H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (366 мг/л) и NH<sub>4</sub> (80 мг/л). В катионном составе отсутствовал Mg<sup>2+</sup>, а концентрация Ca<sup>2+</sup> не превышала 45 мг/л. В анионной части количество HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> составляло всего 6.1 мг/л, а SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> – 365 мг/л [3]. После перехода источника в гейзерный

режим/возникновение гейзера, состав воды мало изменился (рис. 2), содержание  $\text{HCO}_3^-$  возросло до 68 мг/л, количество  $\text{SO}_4^{2-}$  упало до 230 мг/л. В период извержения резко увеличивался pH (до 6.9) и возрастала температура (до 94 °С). По сути, состав воды в гейзере в 2009 г. отвечал наиболее минерализованным водам хлоридно-натриевого состава, разгружающимся в центральной части Восточного термального поля.

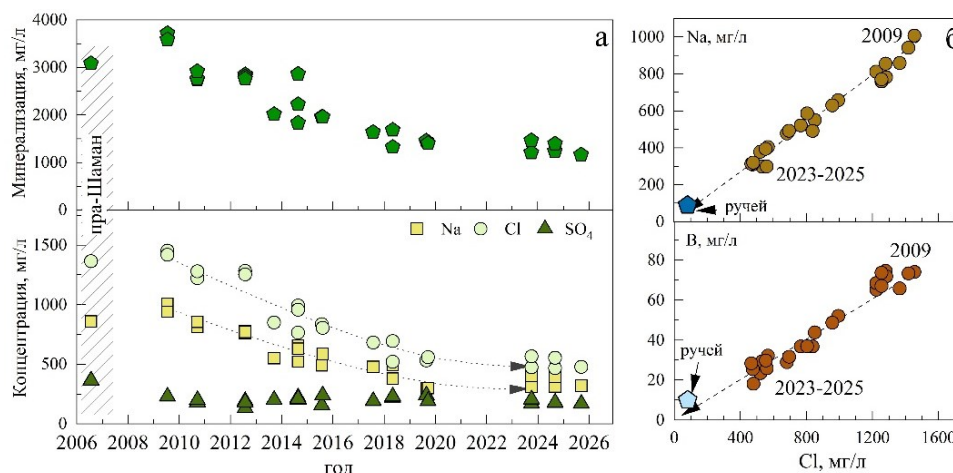


Рис. 2. Эволюция химического состава (а) и отношение основных макрокомпонентов Cl/Na и Cl/B (б) в водах гейзера Шамаман.

В последующие годы, вплоть до 2025 г. отмечается постепенное снижение содержаний макрокомпонентов ( $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ ), что хорошо проиллюстрировано на рис. 2а, тогда как концентрация сульфат-иона сохраняется примерно на одном уровне (200-250 мг/л). Соответственно, в 3 раза снизилась и общая минерализация. Учитывая тот факт, что значения, отражающие отношение Cl/Na и Cl/B, вне зависимости от года опробования ложатся на линию смешения с грунтовыми водами, можно сделать предположение, что происходит снижение доли хлоридно-натриевых вод, увеличение притока метеорных вод, то есть структура питающего гейзер канала перестала быть герметичной. Частично это может быть связано также с поступлением через открытый канал вод ручья, в составе которого нами выявлены относительно низкие содержания Cl, Na и B.

### Обсуждение результатов

Произошедшие морфологические и гидрохимические изменения гейзера Шамаман являются следствием высокодинамичных процессов, постоянно происходящих в приповерхностной зоне крупной уникальной гидротермальной системы кальдеры Узон. Предпосылкой для образования гейзера стала его структурно-тектоническая позиция и особенности строения термальной площадки. В работе [1] отмечается сильная раздробленность района термальных полей кальдеры Узон. Разрывные нарушения рассекают всю площадь термальных полей, включая и Участок I ВТП. Грифон гейзера Шамаман находится на продолжении трещинной линии субмеридионального направления, которую четко фиксирует серия мелких проколов и небольших парящих провальных воронок [3]. Все эти нарушения имеют приповерхностное происхождение, они вызваны сменой условий в системе газ-вода-порода. Изменение в объемах поступления метеорных вод (например, сухое и жаркое лето) может вызвать изменение температурного режима, установление благоприятных условий для вскипания раствора в порово-трещинном пространстве на небольшой глубине, скопление газа под толщами непроницаемых отложений, гидротермальные взрывы и просадки, формирование бугров с внутренними полостями, заполненными кипящей водой и парогазовой смесью.

Учитывая тот факт, что гейзер возник рядом с одним из таких бугров, и основываясь на данных проведенного электроразведывания [4], можно предположить, что камера гейзера находится под куполом (где-то в районе смотровой площадки). Если

гипотетически рассмотреть возможность выполнения разведочных работ на территории заповедника, то, проведя бурение (ручным буром) до глубин не более 5-6 м, можно было бы вскрыть паровую камеру, что позволило бы практически обосновать представления Бунзена и других исследователей о подземной морфологии гейзерных структур.

### **Заключение**

На всех стадиях развития гидротермальной системы в кальдере Узон ее деятельность на поверхности фиксировалась горячими источниками с гейзерным режимом. В настоящее время наблюдаются уже лишь отголоски некогда масштабных явлений. Появление и достаточно короткий период функционирования современных гейзеров в кальдере указывают на завершающий этап существования гейзерного режима в ней. Постепенное затухание деятельности Шамана – этому очередное свидетельство. Нарушения режима деятельности этого гейзера – следствие флуктуаций структурно-литологических и физико-химических характеристик зоны питания и изменения морфологии очага разгрузки гидротерм.

В заключение выскажем ряд предположений об условиях, необходимых для формирования кальдерной гидротермальной системы с источниками в гейзерном режиме, включая как крупные геологические события, так и локальные особенности: 1) контрастный вулканизм на завершающем этапе формирования кальдерной структуры; 2) толща туфов преимущественно кислого состава, вмещающая гидротермальную систему; 3) гидротермальная проработка толщи туфов до образования аргиллизитов как экранов и водоупоров для напорных гидротерм; 4) новейшая трещинная тектоника; 5) неглубокий уровень вскипания гидротерм; 6) возможность для образования структурных «ловушек» – пароводяных камер в толще аргиллизитов; 7) достаточно постоянный приток перегретых вод к камере и наличие выводного канала сложной конфигурации (типа аппендикса), связывающего камеру с поверхностью термального поля.

В кальдере Узон соблюдены все условия для формирования подобной системы, что дает право рассматривать Узонскую гидротермальную систему не только как уникальную рудообразующую, но и как систему гейзерного типа на завершающей стадии развития. Более детальное рассмотрение данного вопроса – предмет наших дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВиС ДВО РАН по теме «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минерало-рудогенеза» (№ FWME-2024-0006).

### **Список литературы**

1. Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. и др. Геологические, гидрогеохимические и микробиологические особенности нефтяной площадки кальдеры Узон (Камчатка) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1/2. С. 56-88.
2. Дроздин В.А. Новый гейзер в кальдере вулкана Узон // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 10-12.
3. Карпов Г.А., Николаева А.Г., Акимов В.Г., Гальченко В.Ф. Эволюция режима и физико-химических характеристик растворов новообразованного гейзера в кальдере Узон (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 3-13.
4. Модин И.И., Скобелев А.Д., Валулина А.М., Степанченков В.С. Электротомографические исследования в кальдере Узон на гейзере Шаман (полуостров Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 4. Вып. 60. С. 22-34.
5. Никаноров А.П., Власов Е.С. О режиме гейзера в кальдере вулкана Узон (Кроноцкий заповедник) // Вопросы географии Камчатки. 2011. Вып. 13. С. 117-120.
6. Kiryukhin A.V., Karpov G.A. CO<sub>2</sub>-driven gas lift mechanism in geysers cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) // Geosciences. 2020. V. 10. Art. 180.