

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. (2014). Как устроены гейзеры и почему их много в Долине Гейзеров? Труды Кроноцкого Государственного природного биосферного заповедника, выпуск 3: 142-151.

## КАК УСТРОЕНЫ ГЕЙЗЕРЫ И ПОЧЕМУ ИХ МНОГО В ДОЛИНЕ ГЕЙЗЕРОВ?

*А.Б. Белоусов, М.Г. Белоусова*  
*Институт Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН*

**Ключевые слова:** гейзер, гидротермальная система, оползень, Долина Гейзеров, Камчатка, Кроноцкий заповедник

### **Введение**

Гейзеры – особый тип кипящих источников, характеризующихся квазипериодическими извержениями воды и пара, разделенными чётко выраженными периодами покоя. Классическая последовательность событий при извержении гейзера состоит из трёх фаз: медленного истечения воды из верхней части гейзерного канала (грифона) на дневную поверхность (фаза излива), бурного выброса воды с паром (фаза фонтанирования) и последующего выхода пара с постепенно уменьшающейся интенсивностью (фаза парения). Однако, есть много гейзеров с извержениями, отличающимися от классической схемы: иногда нет чёткой фазы излива, фаза фонтанирования может быть очень слабой и/или короткой, у многих гейзеров полностью отсутствует фаза парения.

Обычные, кипящие постоянно, термальные источники встречаются во многих районах Земного шара, а гейзеры очень редки. Всего известно около 1000 гейзеров, и большинство их сконцентрировано в пределах трёх крупных гейзерных полей: Йеллоустоун в штате Вайоминг (США), Долина Гейзеров на Камчатке (Россия) и Эль Татио в Альтиплано (Чили) (Bryan, 1995).

Для объяснения периодичности извержений гейзеров предложено несколько физических моделей (например, Allen and Day, 1935; Устинова, 1955; Iwasaki, 1962; Дроздин, 1982; Steinberg et al., 1982; Lu and Watson, 2005). Ключевой частью любой модели является используемое в ней строение питающей системы гейзера. Прямых полевых данных о строении питающих систем гейзеров крайне мало, и все существующие модели базируются на двух принципиально различных типах систем. Первый тип питающей системы, предложенный Г.С.Маккензи (1811), включает в себя большую подземную полость, соединенную с земной поверхностью сильно изогнутым каналом в форме перевернутого сифона (рис. 1а). Полость имеет непроницаемый свод и работает как «ловушка для пузырей» пара, поднимающихся с водой снизу, из более глубоких частей гидротермальной системы. В полости происходит сепарация и накопление пара, который постепенно вытесняет заполняющую её воду в сифон и ведущий к поверхности вертикальный канал. Накапливающийся под давлением пар периодически прорывается наружу (извергается) через заполненный водой сифон.

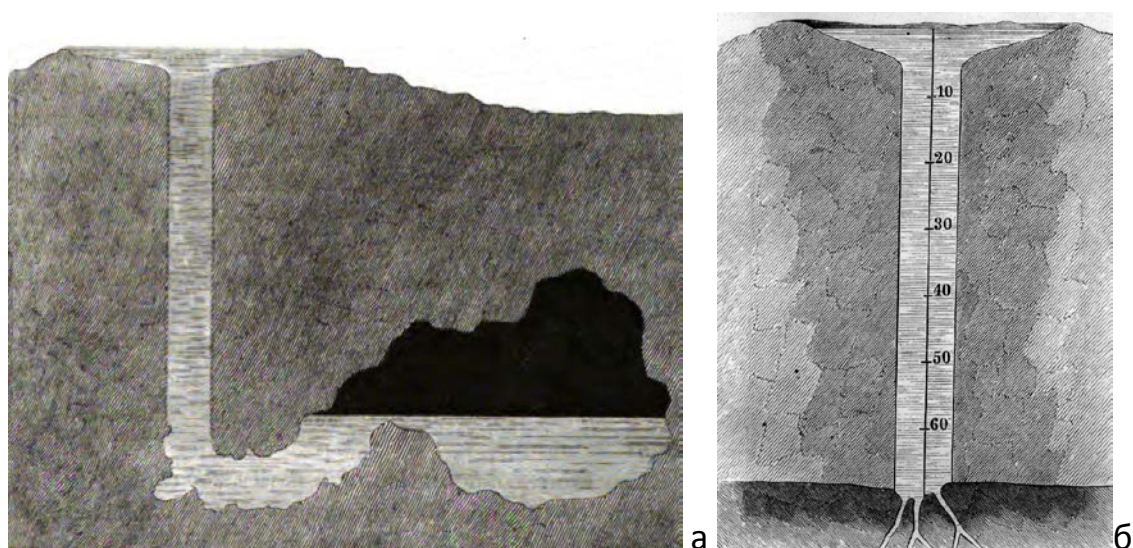


Рис. 1. Два основных типа подводящих систем гейзерных моделей:  
а – «ловушка для пузырей» предложенная Маккензи (Mackenzie, 1811);  
б – «длинный вертикальный канал», предложенная Бунсеном  
(Bunsen, 1847; рисунок приводится по Muller, 1875).

Серьёзным недостатком питающей системы Маккензи считается её сложная морфология. До настоящего времени не было геологического

объяснения тому, как может образоваться в одном месте на небольшой территории, как, например, в Долине Гейзеров так много каналов с необходимой, сложно изогнутой конфигурацией. Поэтому питающая система Маккензи оказалась практически забытой и в современных моделях гейзеров используется очень редко (Нечаев, 2012; Belousov et al., 2013).

Второй тип питающей системы предложен Р.В.Бунсеном (1847). Он предположил, что кипящий источник, имеющий простой вертикальный канал (рис. 1б), при определённых условиях может давать периодические извержения. Для этого канал должен быть узким и длинным, чтобы заполняющая его вода достигала перегретого состояния: высокое гидростатическое давление в нижней части канала препятствует кипению, а малый диаметр канала замедляет конвективное перемешивание. В момент, когда в перегретой воде появляются первые пузырьки пара, вытесненная ими вода сливается из верхней части канала, приводя к падению гидростатического давления и взрывоподобному вскипанию. Такие каналы могут легко образовываться вдоль вертикальных трещин, которые широко распространены в горных породах практически любого типа. Кроме того, некоторые геотермальные буровые скважины (имеющие форму вертикальных каналов), при определённых условиях, демонстрируют периодический, гейзероподобный, выброс воды и пара. До наших работ в мире была проведена единственная видеосъёмка в канале гейзера (Hutchinson et al., 1997). Исследовалась самая верхняя, освобождающаяся от воды при извержениях часть канала гейзера Старый Служака, Йеллоустоун. Съёмка показала, что эта часть канала имеет вид вертикальной трещины. Все это привело к тому, что питающая система Бунсена стала практически единственной используемой в современных гейзерных моделях (например, Steinberg et al., 1982; Штейнберг и др., 1984; Ingebritsen and Rojstaczer, 1993; Сугробов и др., 2009; Wang and Manga, 2009).

### **Материалы и методы исследований**

Целью нашей работы было выяснение строения питающих систем гейзеров Долины и определение геологических условий формирования гейзерных полей. Для изучения питающих систем гейзеров была сконструирована специальная герметичная термостатированная видеокамера. Видеосигнал от видеокамеры передавался по кабелю, наблюдался в реальном времени через монитор и одновременно записывался в цифровом

формате. Камера опускалась в каналы гейзеров на кабеле или гибком шесте. Видеосъёмка внутри каналов производилась как в периоды покоя, так

и в течение всех фаз извержений гейзеров. Были исследованы каналы двух самых крупных гейзеров Долины: Великан и Большой. Дополнительно изучены Ванна и Коварный – маленькие гейзеры с нерегулярными режимами работы. Получено более 10 часов видеозаписи. Отдельные фрагменты съёмки можно посмотреть в [www.geosociety.org/pubs/ft2013.htm](http://www.geosociety.org/pubs/ft2013.htm).

Также было проведено детальное изучение геологического строения отложений, в которых проработаны каналы современных гейзеров и изучено строение каналов древних гейзеров, обнажённых в бортах каньона реки Гейзерной.

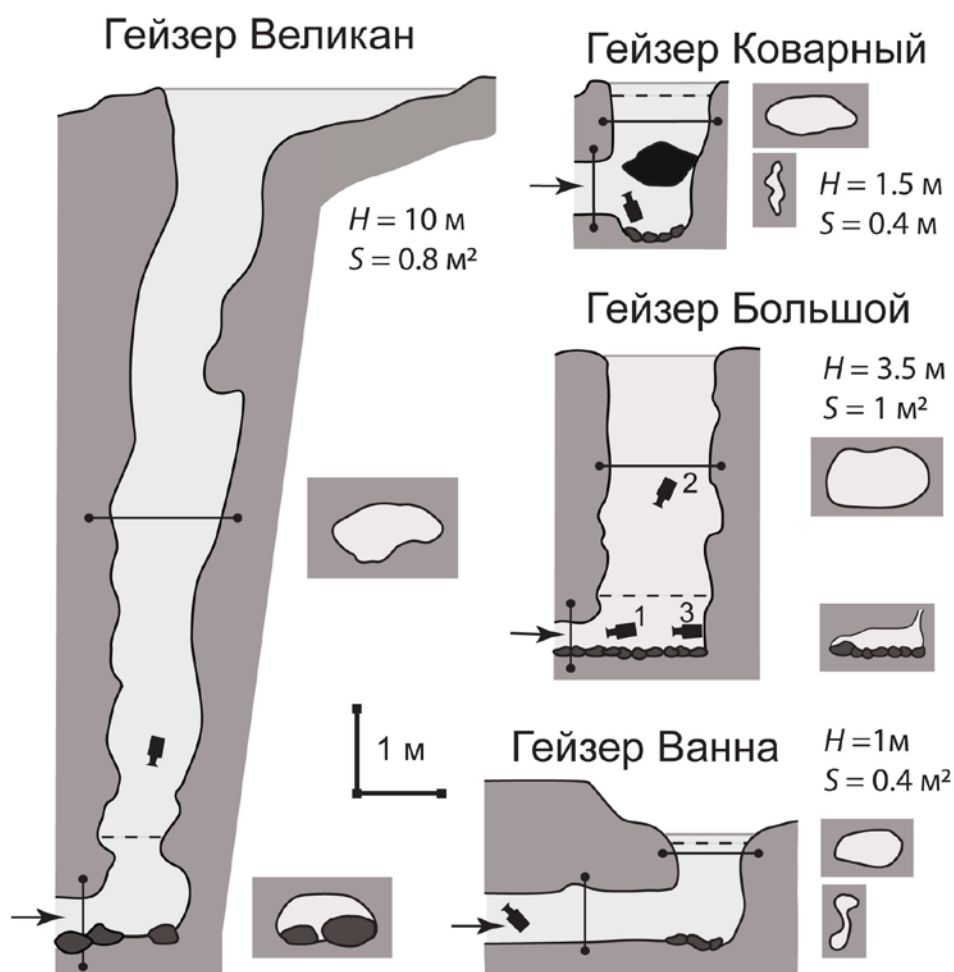
## **Результаты**

### *Видеонаблюдения в каналах гейзеров.*

Несмотря на значительные различия в размерах и режимах извержений изученных гейзеров, оказалось, что они имеют сходное строение питающих каналов (рис. 2). Каждый гейзер имеет верхний вертикальный канал глубиной от 1 до 10 м, имеющий, в первом приближении, овальное поперечное сечение диаметром 0,4-2 м. На дне вертикального канала лежат округлые валуны, покрытые гейзеритом. В придонной части, вертикальный канал соединен с относительно узким горизонтальным каналом длиной больше 0,5-2 м, имеющим поперечное сечение неправильной формы размером 0,3-1 м (дальние части горизонтальных каналов не просматривались). Таким образом, выполненная нами видеосъёмка показала, что каналы гейзеров Долины не являются простыми длинными вертикальными трубами или трещинами; на глубине несколько метров все они становятся горизонтальными.

Гидродинамические процессы, происходящие внутри каналов, также сходны у всех изученных гейзеров. После извержения начинается заполнение вертикального канала водой, поступающей из горизонтального канала. Это соответствует периоду покоя гейзера. Верхний канал постепенно заполняется до верхней кромки и начинается излив. В середине-конце фазы разлива вдоль свода горизонтальных каналов начинают появляться небольшие пакеты пузырей пара (поднимающихся из более глубоких частей питающей системы). Когда они встречаются с более холодной водой вертикального канала, происходит быстрая конденсация пара и пузыри схлопываются. Эти начальные вбросы пара постепенно (15 мин, 1 мин и 0,5 мин

для Большого, Ванны и Коварного, соответственно; у Великана этот процесс не удалось наблюдать) увеличивают температуру воды в вертикальном канале до величины, когда схлопывание пузырей прекращается. В этот момент один из крупных «пакетов» пузырей пара прорывается в вертикальный канал, где поднимаясь вверх, взрывоподобно расширяется и выбрасывает заполняющую канал воду в атмосферу – это соответствует фазе фонтанирования. Видеонаблюдения продемонстрировали, что кипения воды на дне вертикальных каналов не происходит ни на какой стадии извержений. Измерения с помощью термологгера показали, что на дне вертикальных каналов гейзеров Великан и Большой температура воды растёт по мере приближения к началу фазы фонтанирования, однако, она никогда не достигает точки кипения, соответствующей имеющемуся там гидростатическому давлению.



**Рис.2.** Схема строения каналов гейзеров Долины по данным видеосъемки. Валуну показаны черным цветом, горизонтальные каналы – стрелками, уровень воды после извержения – пунктиром. Значок камеры показывает положение камеры в момент съемки клипов, которые можно посмотреть на [www.geosociety.org/pubs/ft2013.htm](http://www.geosociety.org/pubs/ft2013.htm).

Во время фазы фонтанирования, вертикальные каналы гейзеров Великан и Большой опустошаются на 80-90%, и потом, на фазе парения, пар вырывается из горизонтальных каналов через небольшой слой воды, оставшейся на дне вертикальных каналов. Фаза фонтанирования гейзеров Ванна и Коварный – очень короткая, при этом выбрасывается менее 5-10% воды, находящейся в вертикальном канале. У извержений этих гейзеров нет фазы парения.

Суммируя вышеописанное, можно заключить, что мы наблюдали периодическую разгрузку крупных «пакетов» паровых пузырей через сильно изогнутые, заполненные водой каналы. Этот процесс характерен для гейзерных моделей, использующих питающую систему с «ловушкой для пузырей», предложенную Маккензи.

#### *Геология вмещающих пород и питающие системы древних гейзеров.*

Каналы современных гейзеров проработаны в отложениях нескольких крупных оползней голоценового возраста, которые сошли с крутого склона левого борта Гейзерной. Оползни перемещали плейстоценовые отложения кальдерного озера, представленные слоистыми, слабо сцементированными пемзовыми туфами кислого состава (Леонов и др., 1991; Сугробов и др., 2009). Отложения оползней сложены линзами туфа (блоками) поперечником до 5 м (Рисунок 3а). Внутри линз туф сильно перемят и раздроблен (до гравийно-песчаной размерности). Сразу после отложения этот материал был рыхлым (аналогичен отложениям оползня 2007 г.), но позднее был вторично слабосцементирован или превращён в глину действием термальных вод.

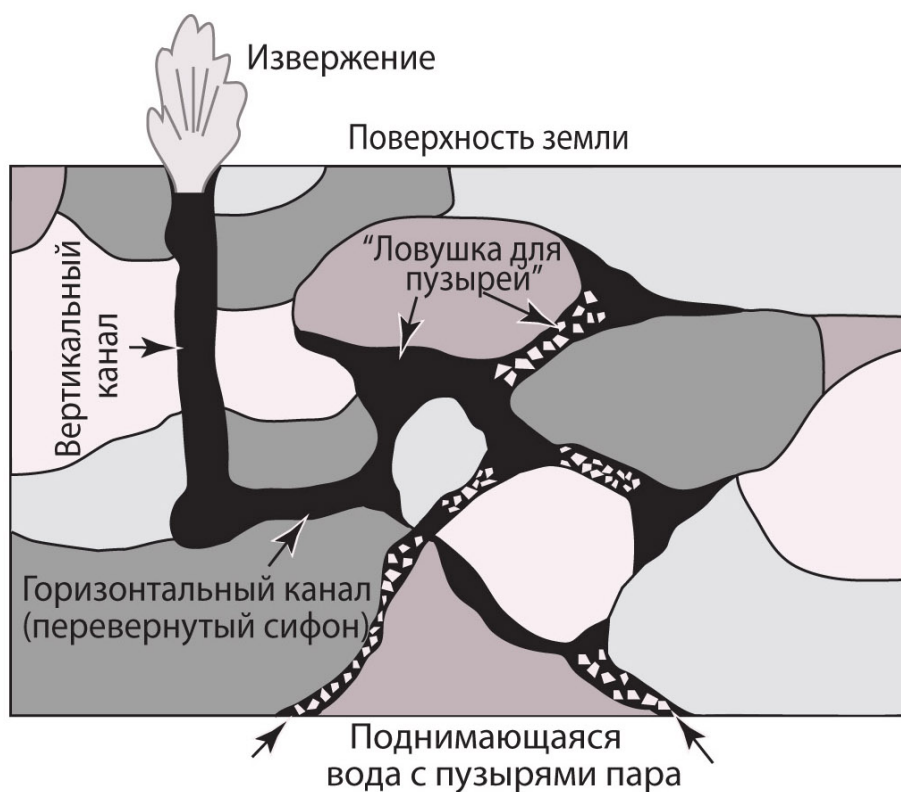
В отложениях древних обвалов эрозией обнажена сложная система выложенных гейзеритом палеоканалов и камер древних гейзеров (Рисунок 3а). Некоторые каналы и камеры являются открытыми пустотами, а некоторые выполнены грубым гравием. Они образованы постепенным выносом рыхлого мелкообломочного материала оползней восходящим потоком термальной воды, которая прокладывала себе путь между оползневыми блоками, имеющими различную проницаемость. Извилистые контакты между соседними блоками приводили к образованию сильно изогнутых каналов. Во многих случаях каналы имели форму колена типа «ловушки для пузырей» Маккензи.

#### **Обсуждение и выводы**

Выполненные нами видеонаблюдения чётко показали, что все четыре изученных гейзера имеют не прямые вертикальные, а сильно изогнутые



а



б

Рис. 3. а – разрез отложений оползня голоценового возраста с каналами древних гейзеров; левый борт р. Гейзерная, над Витражом. Стрелками показаны самые крупные каналы, сформированные вдоль контактов оползневых блоков. Самый крупный блок имеет поперечный размер 5 м.

б – схема строения питающей системы гейзеров в Долине. «Ловушка для пузырей» может быть не только открытой полостью, но и некоторым объёмом, выполнен-

*ным крупным гравием. Отложения оползневых блоков показаны разными оттенками серого цвета.*

каналы. Наличие крутых изгибов является необходимым условием для того, чтобы пузыри пара могли сепарироваться от восходящего потока термальной воды и накапливаться в тех местах, где свод каналов и камер имеет обратный уклон.

Оборудование, которое мы использовали, не позволяло нам проникнуть глубоко в горизонтальные каналы и непосредственно увидеть пустоты, заполненные паром под давлением. Однако изучение вскрытых эрозией каналов древних гейзеров продемонстрировало, что они часто имеют коленаподобные изгибы с обратным уклоном типа «паровых ловушек». Суммируя наблюдения каналов современных и древних гейзеров, мы можем сделать вывод, что гейзеры Долины имеют подводящие системы типа «ловушки для пузырей», предложенной Маккензи (Рис. 3б).

Наши наблюдения показали, что первые пузыри пара начинают проникать в нижние части вертикальных каналов задолго до начала фазы фонтанирования. Это является доказательством активного кипения воды в более глубокой части питающей системы. Следовательно, начало фонтанирования не является результатом быстрого, внезапного вскипания перегретой воды, как описывается в моделях, использующих питающую систему Бунсена «длинный вертикальный канал». Мы считаем, что проникновение первых пузырей пара в верхний вертикальный канал начинается в момент, когда «ловушка для пузырей» полностью заполняется паром. Однако, фонтанирование не начинается в этот момент, так как пар, попадая в более холодную воду, заполняющую вертикальный канал, моментально конденсируется и пузыри схлопываются. Эти первые вбросы пара сначала должны прогреть воду в вертикальном канале до температуры, когда конденсация сильно замедляется, и пузыри перестают схлопываться. Только после этого пар, находящийся под давлением в «ловушке для пузырей», может прорваться через заполненный водой вертикальный канал. В этот момент начинается фаза фонтанирования. Таким образом, наблюдаемые нами гидродинамические процессы получают простое объяснение в рамках модели, использующей подводящую систему типа «ловушка для пузырей», предложенную Маккензи. Физические принципы работы гейзеров с такой подводящей системой приведены в работах Нечаев, 2012; Belousov et al., 2013.



В Долине р.Гейзерная, гейзеры образовались только в местах, где разгрузка термальной воды происходит через толщу отложений оползней. За пределами области распространения оползней расположены только постоянно кипящие источники и фумаролы. Мы считаем, что хаотическая внутренняя структура отложений оползней, сложенных из линз пород с разной проницаемостью, создавала условия для формирования сильно искривлённых путей поднимающихся термальных вод. Со временем вдоль этих путей произошло вымывание мелкообломочного материала, и образовались многочисленные каналы и полости (некоторые просто пустотелые, а некоторые выполненные крупным гравием, который остался после выноса тонкой фракции). Многие из этих каналов оказались настолько сильно изогнутыми, что стали работать как «ловушки для пузырей». Это объясняет образование такого большого количества гейзеров в Долине.

Одиночные гейзеры, разбросанные в разных районах Земли, могут образовываться при случайном совпадении нескольких благоприятных факторов и, по-видимому, могут иметь разные типы конфигураций питающих систем и действовать в соответствии с принципами любой из имеющихся гейзерных моделей. Но почему большинство имеющихся на Земле гейзеров сконцентрировано в трёх крупных гейзерных полях? В чём заключается уникальность этих мест? Мы считаем, что в этих районах, в дополнение к необходимым гидротермальным условиям, имеются специфические геологические отложения и/или структуры, благоприятствующие формированию многочисленных сложно изогнутых подземных каналов и полостей. В Долине Гейзеров это отложения оползней. В Йеллоустоуне и Эль Татио эту роль могут играть ледниковые морены, покрывающие гейзерные поля (Allen and Day, 1935; Fenner, 1936; Fernandez-Turiel et al., 2003). Морены, как и отложения оползней, являются рыхлыми обломочными отложениями с хаотической, гетерогенной структурой. Таким образом, все 3 крупнейших гейзерных поля Земли имеют сходное геологическое строение верхних частей разреза. Наш основной вывод состоит в том, что для образования гейзерного поля необходимо сочетание гидротермальной разгрузки с особыми геологическими условиями, способствующими образованию изогнутых каналов и паровых ловушек. Такое сочетание встречается редко, что объясняет немногочисленность крупных гейзерных полей на Земле.

### **Литература.**

*Дрознин, В.А.* К теории действия гейзеров /Вулканология и сейсмология.- 1982.-№5.- С.49–60.

Леонов, В.Л., Гриб, Е.Н., Карпов, Г.А., Сугробов, В.М., Сугрובה, Н.Г., Зубин, М.И. Кальдера Узон и Долина Гейзеров /Активные вулканы Камчатки.- М.:Наука.-1991.-Т.2.- С.94–141.

Нечаев, А. О механизме извержения гейзера /Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника//Камчатпресс Петропавловск-Камчатский.– 2012.-Т.2.-С. 135–143.

Сугробов, В.М., Сугрובה, Н.Г., Дроздин, В.А., Карпов, Г.А., Леонов, В.Л. Жемчужина Камчатки - Долина Гейзеров / Петропавловск.: Камчатпресс.- 2009.-158 с.

Устинова, Т.И. Гейзеры Камчатки / Москва: География.-1955.- 120 с.

Штейнберг, Г.С., Штейнберг, А.С., Мержанов, А.Г. Гейзеры / Природа.- 1984.-№4.-С.32-47.

Allen, E.T., and Day, A.L. Hot Springs of the Yellowstone National Park/ Carnegie Institute of Washington Publication.- 1935.-V.466.-525 с.

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.-N4.- С.387-390.

Bryan, T.S. The geysers of Yellowstone /Boulder: University Press of Colorado.- 1995.- 480 с.

Bunsen, R.W. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geyisir Islands /Annalen der Physik und Chemie.- 1847.-V. 83.- С.159–170.

Fenner, C. Bore-hole investigations in Yellowstone Park /Journal of Geology.- 1936.-V. 44.-С.225–315.

Fernandez-Turiel, J.L., Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Saavedra-Alonso, J., Martinez-Manent, S. The hot spring and geyser sinters of El Tatio, northern Chile / Environmental Geochemistry and Health.- 2003.-V.25.-С.453–474.

Hutchinson, R.A., Westphal, J.A., Kieffer, S.W. In situ observations of Old Faithful Geyser /Geology.- 1997.-V. 25.- С. 875–878.

Ingebritsen, S.E. and Rojstaczer, S.A. Controls on geyser periodicity /Science.- 1993.-V. 262.-С.889–892.

Lu, X., and Watson, A. A review of progress in understanding of geysers / Proceedings of World Geothermal Congress.- 2005.- С.1–6.

Mackenzie, G.S. Travels in the Island of Iceland/ Edinburgh: Allam and Company.- 1811.- 27 с.

Steinberg, G.S., Merzhanov, A.G., Steinberg, A.S. Geyser process: Its theory, modeling and field experiment /Modern Geology.- 1982.-V.8.- С.67–86.

Wang, C.Y., and Manga, M. Geysers / J.Reitner. Earthquakes and water.- Berlin: Springer-Verlag.-2009.-С.117–123.