

А. Г. МЕРЖАНОВ, А. А. РАЗИНА, В. С. ФУНДАМЕНСКИЙ,
А. С. ШТЕЙНБЕРГ, Г. С. ШТЕЙНБЕРГ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЙЗЕРА МЕТОДОМ ГИДРОЗОНДИРОВАНИЯ

Ранее авторами была аналитически рассмотрена модель гейзерного процесса (Мержанов и др., 1970), базировавшаяся на следующих положениях.

1. Извержение гейзера происходит в результате вскипания воды, накапливающейся в подземном резервуаре (камере). Рабочим телом гейзера является грунтовая вода с изменяющимся во времени расходом, поступающая в подземную систему. Нагрев «холодной» грунтовой воды в камере осуществляется путем смешения с горячим теплоносителем (перегретая вода или пароводяная смесь), массовый расход которого постоянен.

2. Период (цикл) гейзерного процесса состоит из трех основных стадий:

а) заполнения объема камеры, освободившегося после извержения. Давление в камере и расход «холодной» воды постоянны, температура воды в камере в процессе ее заполнения падает;

б) заполнения канала. В этой стадии давление в камере увеличивается, расход «холодной» воды уменьшается, температура в камере по мере заполнения канала растет;

в) разогрева воды в камере до кипения и извержения гейзера. При температуре в камере, равной температуре кипения (T_k) при данном давлении, происходит прогрессивное самоускоряющееся падение давления, обусловленное появлением пузырей пара в канале и соответственно уменьшением удельного веса пароводяной (двухфазной) смеси, заполняющей канал. В результате в камере начинается интенсивное парообразование и извержение гейзера.

В указанной работе получены количественные закономерности, характеризующие каждую стадию процесса и весь период индукции гейзера, а также определены граничные условия перехода горячий источник → кипящий источник → гейзер → фумарола.

Выбор объекта исследования и методика эксперимента. Натурные исследования проводились в Долине Гейзеров в 1970 г. Эксперименты выполнялись на гейзере Котегей, расположенном на левом берегу р. Гейзерной в районе главной термальной стенки. Выбор объекта обусловлен следующими соображениями: 1) Котегей обладает сравнительно непродолжительным и весьма четким периодом (12 мин 15 с — 12 мин 35 с); 2) расположение гейзера позволило всю сливаемую и изверженную воду направить по одному руслу в трубу для точного измерения расходов; 3) возможность безопасного измерения температуры вплоть до начала извержения.

Для проведения эксперимента предложен новый метод активного воздействия на режим работы источника — гидрозондирование, сущность которого состоит в следующем.

№ опыта	Объем вливаемой воды $V_{вл}$, л	Температура вливаемой воды $T_{вл}$, °С	Время слива $t_{сл}$	Время извержения $t_{изв}$	Расход воды, л	№ опыта	Объем вливаемой воды $V_{вл}$, л	Температура вливаемой воды $T_{вл}$, °С	Время слива $t_{сл}$	Время извержения $t_{изв}$	Расход воды, л
86	180	80	12'40"	1'40"	252	38	70	60	1	38	128
						22	65	80	27	1	35
76	180	60	17 05	1 35	325	43	50	20	57	1	38
82	180	40	21 49	1 38	340	112	40	80	40	1	21
55	180	20	27 10	1 05	402	15	40	60	55	2	—
109	120	60	5 07	1 41	227	127	40	20	15	1	55
106	120	40	7 05	1 40	227	115	30	20	15	1	45
70	120	20	10 32	1 58	153	48	30	20	45	1	50
89	80	80	1 05	1 40	205	118	20	80	1 02	1	53
100	80	60	1 20	1 35	196	10	20	20	— 20	1	40
97	80	40	1 30	1 38	173	66	10	80	— 55	1	50
93	75	20	2 40	1 40	176	63	10	80	1 05	1	55
33	70	80	50	1 50	243	61	10	20	1 —	2	—

В гейзерную систему через грифон мгновенно* вливается определенное количество воды заданной температуры, после чего измеряются основные характеристики рабочего процесса: полный период гейзера, время заполнения системы, продолжительность стадии слива и собственно извержения, изменение во времени температуры и расхода сливаемой и извергаемой воды.

Объем и температура вливаемой воды, а также промежуток времени от конца извержения до влива могут изменяться от опыта к опыту и являются основными параметрами гидрозондирования. В серии опытов, результаты которых приводятся ниже, зондирование проводилось сразу после окончания извержения. За период принимался промежуток времени от конца предшествующего извержения (в нормальном режиме) до конца извержения, происшедшего после влива воды. Температура сливаемой воды измерялась ртутным термометром, помещаемым в верхнюю часть грифона. Вода для зондирования готовилась в бочке объемом 200 л. Необходимая исходная температура достигалась путем смешения горячей и холодной воды. Холодная вода ($T=15-20^\circ$) бралась из р. Гейзерной, горячая — из гейзера в процессе извержения.

Данные об изменении расхода во времени после обработки были подвергнуты графическому интегрированию, что позволило рассчитать количество воды, извергаемой и сливаемой гейзером в различных условиях.

Обсуждение результатов. Исследуемый гейзер в нормальном режиме характеризуется четко выраженной периодичностью с воспроизводимостью всех стадий 6—8%. Особенностью работы гейзера является малая продолжительность стадии слива ($t_{сл}=30-50$ с), сопровождающегося заметными кратковременными (3—5 с) пульсациями расхода и уровня воды в грифоне. В процессе извержения происходит выброс пароводяной смеси на высоту 1,5 м. Осредненные параметры работы гейзера: продолжительность слива 30—50 с, продолжительность извержения 1 мин 50 \pm 10 с, полный расход 118 \pm 6 л, полный период гейзера 12 мин 25 с \pm 10 с, температура слива 97°. Кривая изменения расхода во времени представлена на рис. 1.

Наиболее интересные результаты, для истолкования которых нет необходимости прибегать к априорным представлениям о внутреннем строении гейзера и механизме его работы, получены при зондировании источника большими объемами воды. Гидрозондирование позволило измерить свободный объем гейзерной системы после извержения. Он ока-

* Мгновенным вливом можно считать такой, продолжительность которого не порядок или более меньше периода работы гейзера.

зался равным 180 л — при вливе такого количества воды грифон заполнялся до краев.

В обычном (без зондирования) режиме гейзер извергает 118 л воды. Следовательно, при извержении 62 л ($180 - 118 = 62$) в объеме гейзерной системы занимает пар.

В этой же серии опытов определен расход воды, поступающей в гейзерную систему при полностью заполненных камере и канале. Очевидно, что в отсутствие процессов кипения расход воды на сливе равен расходу воды, поступающей в систему ($G_{\text{пост}} = G_{\text{сл}}$). Периоду работы заполненного водой гейзера (до начала образования пара в системе) соответствует слив с постоянным расходом ($G_{\text{пост}} = G_{\text{сл}} = 0,08$ л/с). В дальнейшем (см. рис. 3) начинается увеличение расхода на сливе.

Можно показать, что расход воды, поступающей в гейзерную систему после извержения, существенно больше расхода при полностью заполненной системе. Если бы расход воды, поступающей в гейзерную систему, был неизменным в течение всего периода гейзера, количество извергнутой и сливаемой воды составило бы $G \cdot t = 0,08 \times 745 = 60$ л. Несовпадение этой величины с экспериментально определенной (180 л) приводит к выводу: расход воды, поступающей в гейзер, меняется по мере заполнения системы. После окончания извержения рас-

ход поступающей в гейзер воды $G_{\text{пост}}^{\text{нач}}$ больше определенной выше величины $G_{\text{сл}} = 0,08$ л/с. Нетрудно показать, что, проводя зондирование через определенные отрезки времени после извержения, можно экспериментально определить расход воды, поступающей в гейзерную систему по мере ее заполнения, и найти закон изменения расхода от $G_{\text{пост}}^{\text{нач}}$ до $G_{\text{пост}} = 0,08$ л/с. Однако в 1970 г. такой эксперимент выполнен не был, поэтому можно только констатировать, что расход воды, поступающей в гейзерную систему после извержения, уменьшается по мере заполнения системы и достигает постоянного значения 0,08 л/с к началу слива.

В дальнейшем после приблизительно 10-минутного периода работы гейзера с неизменным расходом на сливе $G_{\text{сл}} = 0,08$ л/с расход сливаемой воды начинает увеличиваться, и тем более резко, чем выше температура вливаемой воды. Это изменение расхода целесообразно связывать с развивающимся в системе парообразованием.

Кривые $G_{\text{сл}}(t)$ (рис. 2) имеют два максимума. Первый обусловлен началом интенсивного парообразования в системе, когда скорость парообразования начинает превышать скорость конденсации. Поступающий в верхнюю часть канала пар выталкивает соответствующие объемы воды наружу. Это фиксируется как увеличение расхода на сливе. В то же время поступление паровых пузырей в канал снижает давление в камере и интенсифицирует поступление в камеру «холодной» воды, что на короткое время приостанавливает процесс кипения. По существу, первый максимум — это начало извержения гейзера, которое не получило развития из-за увеличившегося поступления в систему «холодной» воды.

На примере полного зондирования с $T_{\text{вст}} = 20^\circ$ можно показать количественные соотношения для поступающей в систему и сливаемой воды. В рассматриваемом опыте период гейзера составил $t_{\text{полн}} = 28$ мин 15 с. Следует подчеркнуть, что зондирование выполнялось сразу же после извержения и было полным, т. е. система заполнялась до краев грифона и,

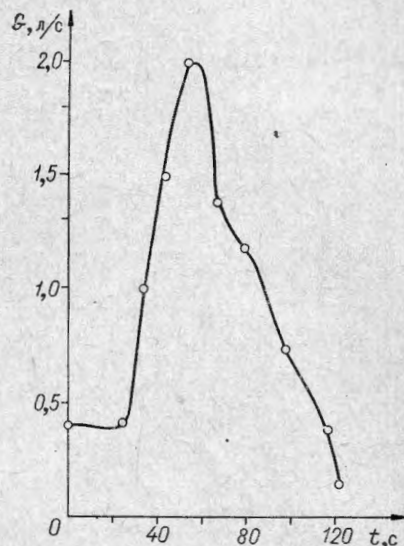


Рис. 1. Расход воды в гейзере Котегей в нормальном режиме.

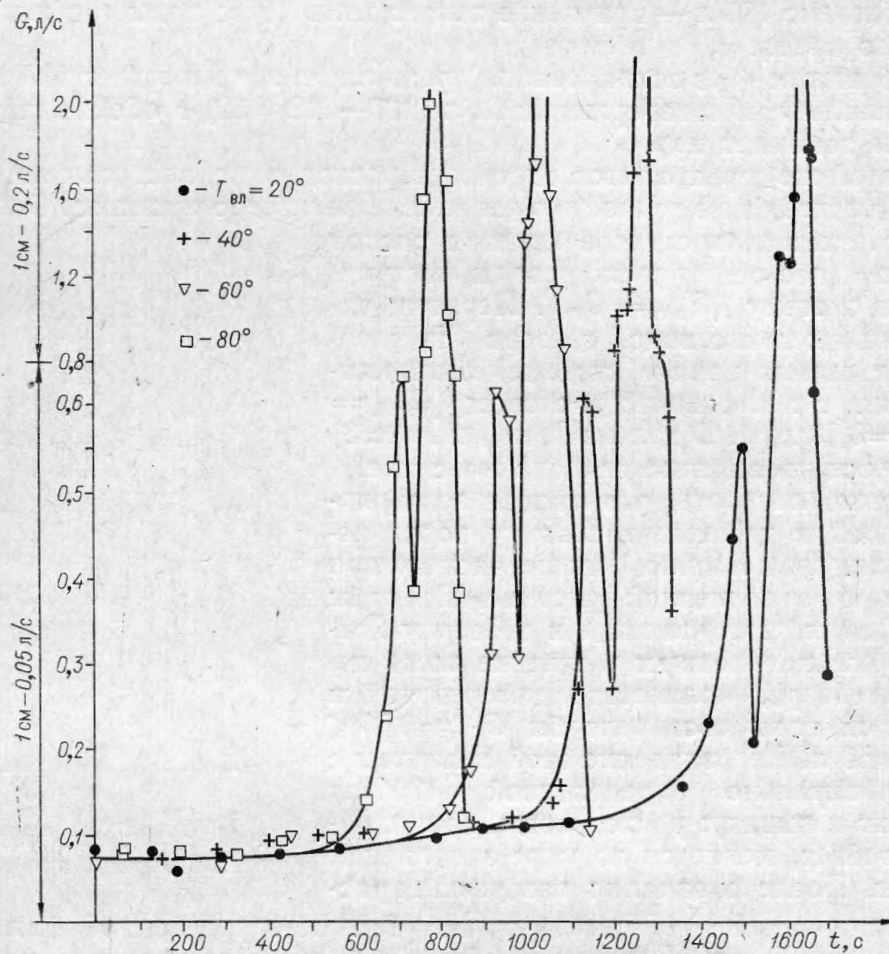


Рис. 2. Расход воды при гидрозондировании.

следовательно, гейзер с самого начала работал в режиме слива. Если считать, как показано выше, расход на сливе в отсутствие процессов кипения в системе неизменным, то количество слитой воды составит $0,08 \text{ л/с} \cdot 1695 \text{ с} = 135 \text{ л}$. К этой величине следует добавить свободный объем гейзерной системы после извержения $135 + 180 = 315 \text{ л}$. Экспериментально же определенная величина суммарного расхода при сливе и извержении составила 402 л. Эта величина занижена, так как выше было показано, что из 180 л, выбрасываемых при извержении, только 118 л извергалось в виде воды, т. е. к 402 л нужно прибавить воду, извергнутую в виде пара.

Сравнив рассчитанное поступление воды в систему (315 л) с фактическим расходом ($> 400 \text{ л}$), можно сделать вывод о том, что в стадию, предшествующую извержению, расход воды, поступающей в систему, существенно превышал начальное значение $G = 0,08 \text{ л/с}$.

Изложенное позволяет разделить период слива на две стадии: стадию с постоянным расходом (рис. 3, область I) и стадию самоускоряющейся разгрузки (область II). В свою очередь, в стадии самоускоряющейся разгрузки можно выделить две области: а) слабого увеличения расхода, обусловленного механическим выталкиванием воды пузырями пара (область IIa), б) сильного увеличения расхода с последующим спадом (первый максимум), вызванного падением гидростатического давления в системе и увеличением притока «холодной» воды (область IIб).

Характерно, что у полностью прозондированного гейзера длительность стадии самоускоряющейся разгрузки не зависит от температуры вливаемой при зондировании воды. Последнее подтверждает то, что ста-

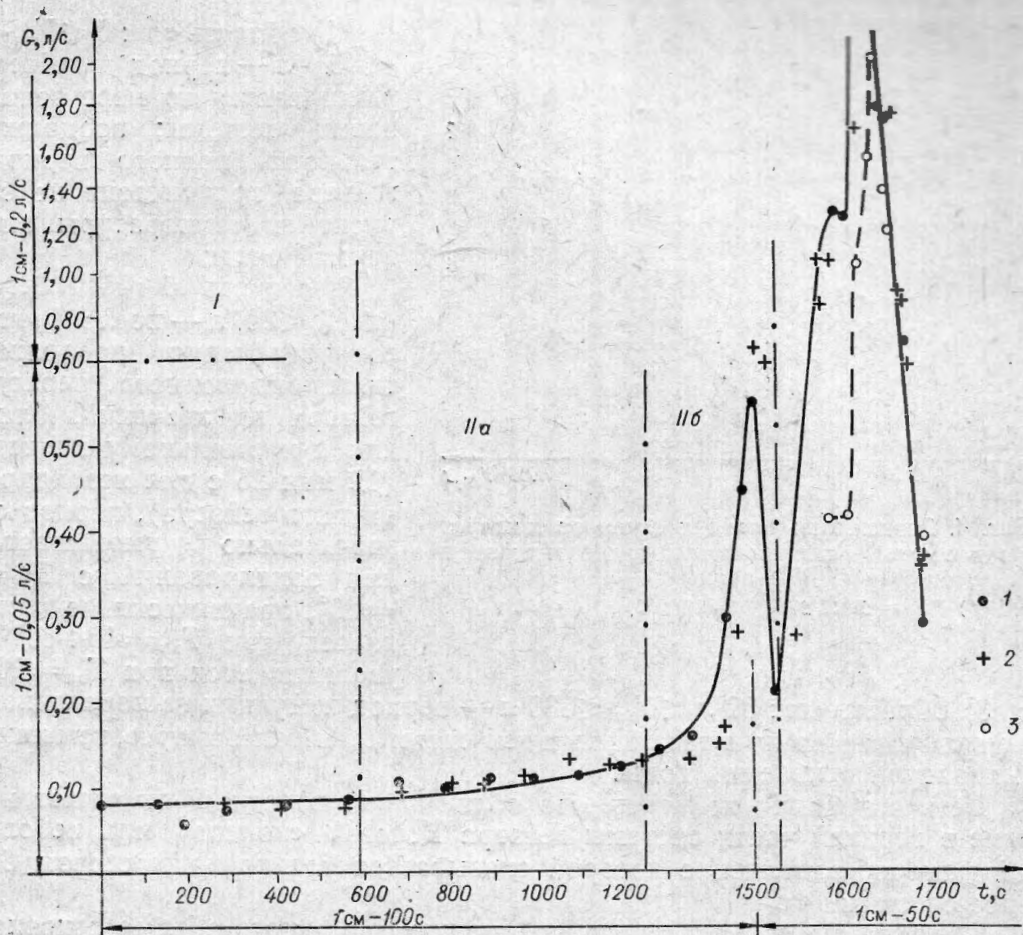


Рис. 3. Расход воды при гидрозондировании с $T_{вл}=20^\circ$ и $T_{вл}=40^\circ$. Максимумы извержений совмещены.
 1) $T_{вл} = 20^\circ$; 2) $T_{вл} = 40^\circ$; 3) нормальный режим.

для самоускоряющейся разгрузки — это отрезок времени от начала процесса кипения в системе до извержения.

Таким образом, расход воды, поступающей в гейзерную систему, имеет максимальное значение сразу после извержения, а затем уменьшается по мере заполнения системы, достигая минимума к началу слива; далее некоторое время расход сохраняется постоянным, после чего с началом парообразования в системе снова возрастает, достигая максимума к концу извержения.

Кривая расхода для гейзера в нормальном режиме (без зондирования) близка в зоне максимума к кривым для зондированного гейзера (см. рис. 3). Отсутствие на ней четко выраженного максимума в области, предшествующей извержению (область IIб для зондированного гейзера), обусловлено крайне незначительной продолжительностью стадии слива, что указывает на то, что в незондированном гейзере кипение в системе начинается до начала слива. Последнее подтверждается и высокой температурой в грифоне к началу слива (97°).

О внутреннем строении гейзерной системы можно судить по графикам изменения периода слива и полного периода гейзера в зависимости от объема и температуры вливаемой воды (рис. 4, 5). В области $V_{вл} < 40$ л период слива практически не зависит от температуры вливаемой воды (рис. 4). Дальнейшее заполнение системы ведет к увеличению периода слива; с уменьшением температуры вливаемой воды продолжительность слива пропорционально возрастает.

Для всех кривых характерны три примерно одинаковых интервала (рис. 5):

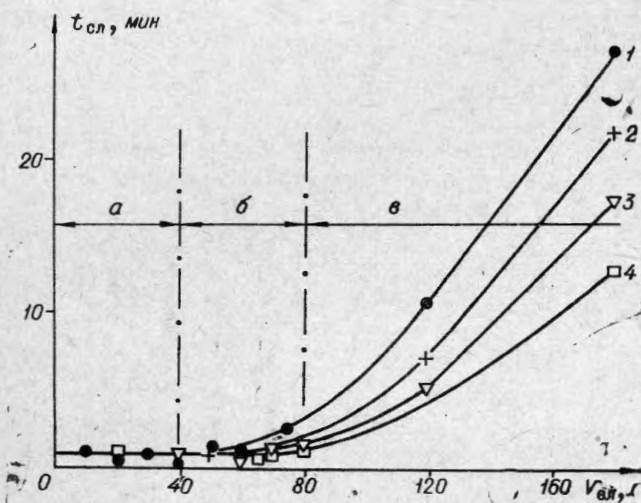


Рис. 4. Зависимость времени слива от температуры и объема вливаемой при гидрозондировании воды.

- 1) $T_{вл} = 20^\circ$; 2) $T_{вл} = 40^\circ$; 3) $T_{вл} = 60^\circ$;
4) $T_{вл} = 80^\circ$.

3) область «в»: $80 \text{ л} < V_{вл} < 180 \text{ л}$ — период индукции гейзера линейно увеличивается по мере заполнения системы, и тем быстрее, чем ниже температура вливаемой воды.

Есть основания полагать, что область «а» на рис. 5 отражает наличие в верхней части системы гейзера Котегей «колена» или небольшой камеры, заполнение которой сказывается только на массовом балансе системы.

Область «б» соответствует заполнению свободного объема основной камеры гейзера. Сокращение продолжительности $t_{полн}$ в области «б» при $T_{вл} = 80^\circ$ и увеличение при $T_{вл} = 20^\circ$ можно объяснить, полагая, что в нормальном режиме работы гейзера начальная равновесная температура при заполнении свободного объема основной камеры лежит в интервале $20^\circ < T_{равн} < 80^\circ$. В дальнейшем равновесная температура увеличивается, что не противоречит теории (Мержанов и др., 1970).

Область «в» соответствует заполнению канала. Чем меньше $T_{вл}$, тем длительнее время конденсации пузырей пара в канале, тем больше полный период гейзера (см. рис. 5).

Проведенные работы позволили выяснить температурные и расходные характеристики гейзера Котегей. Методом гидрозондирования был определен свободный объем гейзерной системы после извержения, установлены закономерности изменения расхода во времени воды, поступающей в систему, определено соотношение между паровой и водной фазами извергаемой смеси, получены данные для суждения о строении гейзерной системы.

В настоящей работе не затрагиваются энергетические характеристики процесса, хотя изменение во времени температуры сливаемой воды при разных температурах и объемах зондирова-

1) область «а»: $0 < V_{вл} < 40 \text{ л}$ — период гейзера уменьшается по мере заполнения системы; продолжительность полного периода гейзера практически не зависит от температуры вливаемой воды;

2) область «б»: $40 \div 50 \text{ л} < V_{вл} < 80 \text{ л}$ — после резкого увеличения продолжительности полного периода гейзера до значений, близких к нормальному периоду (12 мин 25 с для незондированного гейзера), период незначительно уменьшается для зондирований с $T_{вл} = 80^\circ$, практически не изменяется при $T_{вл} = 40 \div 60^\circ$ и увеличивается при $T_{вл} = 20^\circ$;

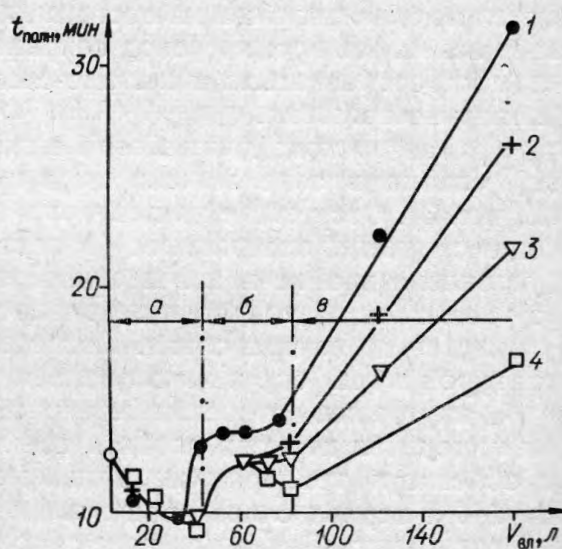


Рис. 5. Зависимость продолжительности полного цикла $t_{полн}$ гейзера от объема и температуры воды, вливаемой при гидрозондировании. Условные обозначения см. рис. 4.

ния качественно отражает изменение температуры в глубинных частях системы с учетом сдвига во времени на величину $\Delta t = \frac{V_{\text{своб}}}{G}$ и влияния теплообмена с вмещающими породами.

В дальнейшем, применяя метод гидрозондирования через определенные интервалы времени после извержения, можно получить количественные данные о расходе вод, питающих гейзерную систему, в различные стадии процесса, а также, сочетая натурные эксперименты с моделированием, получить данные для оценки геометрических параметров различных участков гейзерной системы.

Авторы выражают благодарность В. Николаенко за содействие и помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- Мержанов А. Г., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С.* К теории гейзерного процесса.— «Докл. АН СССР», 1970, т. 194, № 2.
- Набоко С. И.* Гейзеры Камчатки.— В кн.: Тр. Лаб. вулк., вып. 8, 1954.
- Нехорошев А. С.* К вопросу о теории действия гейзеров.— «Докл. АН СССР», 1959, т. 127, № 5.
- Устинова Т. И.* Камчатские гейзеры. Географгиз, 1955.
- Allen E. T.* Neglected Factors in the Development of the Termal Springs.— "Proc. Acad. Sci.", 1934, vol. 20.
- Barth T. W.* Volcanic Geology; Hot Springs and Geysers of Island, 1950.
-