

В. В. И В А Н О В

## ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ОБЛАСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА

Гидротермальная деятельность в областях активного вулканизма как в современную эпоху, так и в прошлые геологические периоды, по сравнению с гидротермальной деятельностью в других геоструктурных, областях земной коры, характеризуется высокой интенсивностью, разнообразием форм проявления и сложными геохимическими процессами.

Накопленные в последнее десятилетие новые обширные материалы по гидрохимии и гидрогеологии вулканических областей свидетельствуют о том, что общий характер термальной деятельности и основные типы природных газо-паровых выделений и термальных растворов — современных гидротерм — весьма сходны для большинства областей проявления современного вулканизма: Камчатки, Курильских островов, Японии, Новой Зеландии, Исландии и многих других.

В качестве главнейших факторов, определяющих характер и специфические черты гидротермальных процессов активных вулканических областей, должны быть отмечены следующие: наличие кислых высокотемпературных вулканических газов, выходящих на поверхность и частично поступающих в подземные воды; интенсивные глубинные термометаморфические процессы, захватывающие широкие зоны вокруг действующих вулканов; аномально-высокие геотермические условия, возникающие часто на небольших глубинах; широкое развитие новейших тектонических разломов, обеспечивающих возможность глубокой инфильтрации атмосферных осадков и выход на поверхность высоконапорных подземных термальных вод.

В большинстве районов активного вулканизма гидротермальная деятельность проявляется в трех основных, связанных между собой, формах-выходах вулканических газов, различных термальных вод и газо-паровых струй, взаимоотношения которых определяются не только активностью глубинных вулканических очагов, но также термодинамическими и гидрогеологическими условиями, существующими в верхних горизонтах толщ эффузивных пород, которые до недавнего времени учитывались недостаточно (Иванов, 1956; 1958; 1959 и др.).

При определенных геотермических условиях, допускающих существование в вулканах подземных вод в жидком виде, последние оказывают решающее влияние на состав и дифференциацию вулканических газовых выделений. Только в особо высокотемпературных условиях (при отсутствии подземных вод) вулканические газы, часто весьма

сложного хлористо-сернисто-углекислого состава, могут поступать на поверхность в малоизмененном виде. При наличии подземных вод все легкорастворимые компоненты вулканических газов отфильтровываются ими, и на поверхность выходят обычно газы уже значительно более простого сероводородно-углекислого состава.

Газовые выделения последнего типа, обладающие относительно невысокой температурой (100—150° С), обычно считаются сольфатарными газами; во многих случаях их следует рассматривать как выделения из водной среды — из сильнонагретых подземных вод, но не как выделения непосредственно из вулканических аппаратов.

Еще более велика роль подземных вод в формировании широко распространенных в вулканических областях газо-паровых струй, выходящих иногда под большим напором в значительном удалении от действующих вулканов. Газо-паровые выделения образуются, как правило, в результате частичного перехода в приповерхностных горизонтах (в условиях давления, близкого к атмосферному) в парообразное состояние напорных, высоконагретых подземных вод.

Абсолютное содержание и состав газовых компонентов паровых выделений зависит в этом случае всецело от газового состава подземных вод, которые в процессе пароотделения интенсивно дегазируются.

Таким образом, в аномально высоких («вулканических») геотермических условиях подземные термальные воды не только выходят на поверхность по тектоническим разломам, создавая часто мощные естественные очаги разгрузки природных термальных растворов и образуя интенсивные, направленные к поверхности тепловые потоки, но активно взаимодействуют с вулканическими (фумарольными) газами и иногда дают начало весьма крупным газо-паровым выделениям.

Формирование термальных вод активных вулканических районов может происходить в весьма различных геологических, геохимических и геотермических условиях, вызывающих создание различных генетических типов терм.

По геотермическим условиям формирования гидротермы областей современного вулканизма могут быть разделены на четыре основные группы.

I. Формирующиеся под непосредственным воздействием магматических и термометаморфических газов и мощных тепловых потоков, созданных активными вулканическими очагами.

II. Формирующиеся в исключительно высокотемпературных геотермических условиях — при 150—300° и более, — созданных интенсивным тепловым воздействием магматических очагов, но с ограниченным участием магматических и термометаморфических эксгаляций.

III. Формирующиеся в условиях нормального или несколько повышенного теплового режима, в сфере воздействия термометаморфических процессов.

IV. Формирующиеся в условиях нормального геотермического режима при температурах менее 100—150° и при участии газов в основном воздушного происхождения.

В перечисленных различных геотермических обстановках вулканических областей формируется четыре главных генетических типа термальных растворов, обозначаемых нами сокращенно по их газовому составу, хорошо отражающему условия их образования: сероводородно-углекислые, азотно-углекислые, углекислые и азотные термы. Характеристика их состава была дана нами ранее в ряде опубликованных работ, а также приведена в табл. 1.

Первые два типа термальных вод — сероводородно-углекислые и азотно-углекислые — формируются исключительно в областях активного

## Гидротермы областей современного вулканизма

Главнейшая обстановка формирования	Основной тип термальных вод	Геологические условия образования	Главнейший подтип	Характерные особенности				
				Т при выходе на поверхность, °С	минерализация, г/л	типичный ионный состав	pH	специфические компоненты
1. В верхней окислительной зоне, в высокотемпературных условиях, при участии вулканических газов	Сероводородные углекислые (фумарольные)	В верхних горизонтах толщ лав, туфов и туфобрекчий, слагающих действующие вулканы	Поверхностного формирования	До 100	До 5,0	Сульфатные сложного катионного состава	1,0—5,5	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
			Глубинного формирования	До 100	До 20,0	Сульфатно-хлоридные, иногда хлоридные, сложного катионного состава	<3,0 (иногда <1,0)	HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , HBO
2. В глубинных восстановительных высокотемпературных условиях, при ограниченном участии магматических и термометаморфических газов	Азотно-углекислые	По периферии действующих вулканов, в глубоко залегающих вулканических и вулканогенно-осадочных породах	—	Выше 100	До 5,0	Хлоридные или гидрокарбонатно-хлоридные, натриевые	На глубине — <7,0 На выходе — >8,0	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> HBO <sub>2</sub>
3. В глубинных условиях, в зоне воздействия термометаморфических процессов	Углекислые	В вулканических вулканогенно-осадочных породах, в условиях затрудненного водообмена	—	До 80	До 10,0 (в редких случаях выше)	Хлоридные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые и кальциево-натриевые	5,5—6,5	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> HBO <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>
4. В глубинных восстановительных условиях, вне влияния магматических и термо-метаморфических процессов	Азотные	В зонах тектонических нарушений, преимущественно в вулканических породах	—	До 100	До 1,5	Сульфатно-хлоридные натриевые	7,5—9,5	H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>

вулканизма, углекислые термы весьма широко распространены также в районах четвертичной вулканической деятельности. Азотные термы образуются в разнообразных геоструктурных районах земной коры; они весьма широко представлены и вне областей молодой магматической деятельности.

1. Сероводородно-углекислые (фумарольные) термы являются специфическим типом термальных растворов, формирующихся только в массивах активных вулканов под непосредственным воздействием вулканических газов. Эти термы наблюдаются во всех областях современного вулканизма.

При высокой активности магматических очагов, поступающие на поверхность высокотемпературные сложного состава (хлористо-сернисто-углекислые) вулканические газы растворяются в той или иной мере в подземных (а иногда и поверхностных) водах, образуя кислые и ультракислые сульфатно-хлоридные термальные растворы сложного катионного состава с свободным  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , с высокими концентрациями  $\text{Fe}$  и  $\text{Al}$ , иногда с высокой общей минерализацией.

Этот характерный тип термальных растворов обозначается нами как фумарольные термы глубинного формирования.

В условиях угасающей активности вулканических очагов и значительного охлаждения верхних частей вулканических каналов фумарольные газы поступают на тех или иных глубинах в подземные воды, из которых могут выделяться на поверхность только некоторые газы (в основном  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ ), образующие сероводородно-углекислые газовые струи обычно более низких температур. Подземные воды играют при этом роль своеобразного фильтра, отделяющего такие легко растворимые газовые компоненты, как  $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{SO}_2$ .

В этих случаях в глубоких горизонтах вулканических толщ могут также формироваться кислые сульфатно-хлоридные (или хлоридные) термы, а в приповерхностных горизонтах вулканических толщ образуются только чисто сульфатные растворы, которые обозначаются нами, как фумарольные термы поверхностного формирования.

Химический состав фумарольных терм обоих указанных подтипов создается в конечном итоге под влиянием ряда сложных взаимосвязанных процессов: насыщения вод вулканическими газами (в состав которых входят газы собственно магматические и газы термометаморфического происхождения, разграничить их при современных методах исследования не представляется возможным), частичного окисления сернистых газов в верхних зонах вулканических массивов до серной кислоты ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ), выщелачивания кислыми термальными растворами вулканических пород с обогащением вод  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  и другими компонентами (табл. 2).

При этом интенсивно идущие в термальных водах в приповерхностных условиях процессы окисления  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_4$  связаны, по-видимому, не только с кислородом, поступающим в воды из воздуха (количество которого бывает весьма ограничено), но с взаимодействием термальных вод с присутствующими в вулканических породах окисными соединениями железа и других металлов.

В процессе длительного соприкосновения этих терм с горными породами кислотность их постепенно снижается (рис. 1), при этом ряд компонентов может удаляться из них в осадок.

Обе указанные разновидности фумарольных терм, выделяемые различными исследователями во многих областях активного вулканизма, являются наиболее молодыми термальными растворами, образующимися в основном за счет современных атмосферных вод,

## Условия формирования гидротерм областей современного вулканизма

Основные типы термальных вод	Основные газовые компоненты	Исходные воды	Основные процессы формирования
1. Сероводно-углекислые (фумарольные)	Газы вулканического (магматического и термометаморфического) происхождения	Современные инфильтрационные атмосферные; для терм глубинного формирования, с незначительным участием конденсационных вод магматического и термометаморфического происхождения	<p>Поступление вулканических газов и паров (с HCl, H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, В и др.) в подземные воды и интенсивный нагрев вод</p> <p>Переход легкорастворимых газовых компонентов (HCl, В и других) в ионно-солевой состав вод, с образованием кислых растворов</p> <p>Окисление сернистых газов (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>) до SO<sub>4</sub>, с образованием сернокислых растворов</p> <p>Выщелачивание кислыми (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> или HCl и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) термальными растворами вулканических пород, с обогащением вод Fe, Al, Ca, H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> и другими компонентами (с повышением pH вод)</p> <p>Дегазация терм в приповерхностных горизонтах пород (с выделением H<sub>2</sub>S и CO<sub>2</sub>)</p>
2. Азотно-углекислые	Газы воздушно-го (N <sub>2</sub> +редкие газы) и частично термометаморфического и, возможно, магматического происхождения	Инфильтрационные атмосферные, иногда, возможно, с незначительным участием измененных морских, а также магматических вод	<p>Нагрев в аномально-высоких геотермических условиях подземных вод до весьма высоких температур (до 200—300 и более °С)</p> <p>Поступление на глубине в воды незначительных количеств газов термометаморфического (CO<sub>2</sub>) и, возможно, магматического (HCl, H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> и др.) происхождения</p> <p>Выщелачивание высокотермальными слабокислыми водами пород, с обогащением вод H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, В и другими компонентами</p> <p>Восстановление в глубинных высокотемпературных условиях присутствующих в водах SO<sub>4</sub> до H<sub>2</sub>S; связывание H<sub>2</sub>S железом горных пород</p> <p>Парообразование и соответствующее концентрирование вод</p> <p>Дегазация терм (выделение CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и других газов), выпадение в осадок CaCO<sub>3</sub>, повышение щелочности вод</p> <p>Насыщение газо-паровыми струями (с CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S) грунтовых и поверхностных вод, с образованием вторичных кислых сульфатных терм</p>
3. Углекислые	Газы термометаморфического (CO <sub>2</sub> ) происхождения	Инфильтрационные атмосферные (относительно древнего возраста), иногда с незначительным участием измененных морских вод	<p>Нагрев вод в нормальных или несколько повышенных геотермических условиях</p> <p>Насыщение подземных вод различного исходного состава CO<sub>2</sub></p> <p>Выщелачивание слабокислыми термальными водами пород, с обогащением вод в первую очередь карбонатами Ca и Mg, а также H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></p> <p>Дегазация терм в приповерхностных условиях (выделение CO<sub>2</sub>), с выпадением в осадок CaCO<sub>3</sub>, с некоторым повышением щелочности вод</p> <p>Насыщение CO<sub>2</sub> верхних горизонтов подземных, в том числе грунтовых, а также поверхностных вод, с образованием вторичных углекислых вод</p> <p>Образование углекислых газовых струй (мофетт)</p>
4. Азотные	Газы воздушного (N <sub>2</sub> +редкие газы) происхождения	Инфильтрационные атмосферные (обычно чет-вертичного возраста)	<p>Нагрев вод в нормальных или несколько повышенных геотермических условиях</p> <p>Выщелачивание горных пород (преимущественно вулканических), обогащение вод H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> и другими компонентами</p>

В термах глубинного формирования возможно также незначительное участие вод, образовавшихся в результате конденсации магматических паров, а также паров, выделяющихся при термометаморфизме горных пород.

Многочисленные сероводородно-углекислые (фумарольные) термы поверхностного формирования весьма широко распространены в СССР на Камчатке и на Курильских островах; фумарольные термы глубинного формирования известны в настоящее время только в пределах последних.

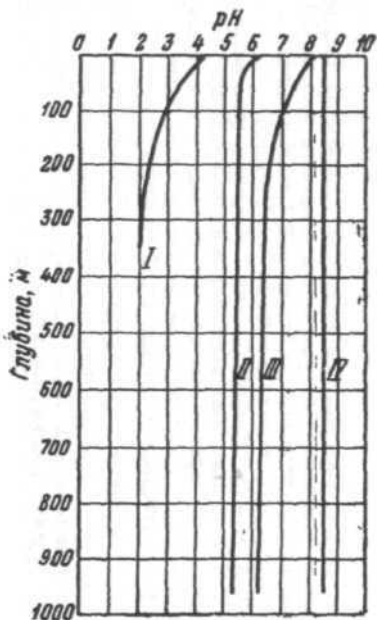


Рис. 1. Схема изменения кислотности—щелочности различных типов термальных вод областей современного вулканизма при подъеме к поверхности

Термы: I — сероводородно-углекислые (фумарольные); II — углекислые. III — азотно-углекислые, IV — азотные

Состав некоторых характерных представителей фумарольных терм из различных вулканических областей приведен в табл. 3.

2. Азотно-углекислые термы формируются обычно в глубинных высокотемпературных условиях по периферии активных вулканических очагов, в толщах, сложенных вулканическими и вулканогенно-осадочными породами.

Это наиболее высокотемпературные современные термальные растворы (до 200—300° С), выходящие во многих вулканических районах на поверхность по крупным тектоническим разломам в виде естественных кипящих источников (в том числе гейзеров) и вскрытые в последние годы в ряде стран (Италия, Исландия, Новая Зеландия, Япония, Камчатка и др.) буровыми скважинами на глубинах от 300—500 до 1000—1200 м.

Большой дебит этих терм в естественных очагах их разгрузки (до 50—100 л/сек) и во много раз большие расходы, получаемые при вскрытии месторождений таких терм на глубине буровыми скважинами, свидетельствуют о наличии весьма крупных запасов этих терм в вулканических районах и интенсивном их движении по трещиноватым зонам пород.

Состав этих терм отличается повсеместно характерными особенностями: сравнительно низкой минерализацией (до 5 г/л), абсолютным преобладанием среди ионов хлора (в некоторых случаях и гидрокарбонатов), весьма незначительным содержанием сульфатов (обычно не более 100 мг/л), абсолютным преобладанием среди катионов натрия; высоким содержанием кремнекислоты (до 500—600 мг/л), обычно невысокой газонасыщенностью, преобладанием на глубине в общем газовом составе вод  $\text{CO}_2$  и присутствием ничтожных количеств  $\text{H}_2\text{S}$ .

Главнейшие особенности состава рассматриваемых терм определяются, по нашему мнению, с одной стороны — выщелачиванием высокотермальными растворами, преимущественно вулканогенных и вулканогенно-осадочных горных пород, содержащих обычно весьма ограниченные количества воднорастворимых компонентов, с другой — поступлением в воды в небольших количествах  $\text{CO}_2$  — в основном, вероятно, термометаморфического происхождения. Возможно, что в составе газов рассматриваемых терм некоторое участие принимают и магматические газы.

Однако в отличие от ряда других исследователей (Wilson, 1955; White, 1957 и др.) мы не видим убедительных доказательств того, что химический состав этих терм определяется в основном магматическими эксгальциациями и что, в частности, один из основных компонентов этих вод — хлор — имеет исключительно магматическое происхождение.

Относительно небольшие количества хлора (не более 2 г/л), которые присутствуют в этих водах, могут быть объяснены процессами выщелачивания горных пород, особенно пород вулканогенно-морского происхождения, в которых всегда могут сохраняться, хотя бы в ничтожных количествах, остатки морских вод. Косвенным подтверждением этого является меньшее содержание хлоридов в термах Исландии, в строении которой, как известно, морские отложения отсутствуют.

Характерная особенность всех рассматриваемых терм — ничтожное «содержание, а иногда и полное отсутствие в них сульфатов при обычно несколько повышенном содержании сульфатов во всех водах вулканических пород. Это объясняется, по нашему мнению, неустойчивостью их в глубинных высокотемпературных восстановительных условиях вулканических областей и вполне согласуется с отсутствием сульфатных минералов в высокотемпературных зонах земной коры (Коржинский, 1940). Нам представляется, что и в высокотермальных растворах на достаточных глубинах сульфаты разлагаются (с расходом кислорода на различные окислительные реакции) с образованием соответствующих количеств  $H_2S$ . Однако в условиях соприкосновения с вулканическими породами сероводород не может длительное время сохраняться в водах, так как будет неминуемо связываться железом, присутствующим всегда в больших количествах в указанных породах. Очевидно, также будет вести себя и сероводород вулканического происхождения, в случае поступления его на глубине в термальные воды. Все это соответствует весьма незначительному содержанию  $H_2S$  во всех представителях рассматриваемых термальных вод.

Исключительно высокое содержание в азотно-углекислых термах  $H_2SiO_3$  является характерным показателем их термальности; это обусловлено зависимостью выщелачивания  $SiO_2$  из пород от температуры и давления.

При поступлении высокотермальных вод в приповерхностные горизонты горных пород (в условиях давления, приближающегося к атмосферному) возникают два характерных процесса.

Во-первых, в результате интенсивного, нарастающего к поверхности, парообразования происходит довольно значительное (иногда на 10—20%) концентрирование ионно-солевого состава терм.

Во-вторых, в связи с высокой температурой вод, по мере снижения давления, происходит постепенная, но к моменту выхода их на поверхность, почти полная их дегазация.

Удаление из термальных вод  $CO_2$  вызывает резкое увеличение щелочности вод, превращение вод к моменту выхода их на поверхность из слабокислых в сильнощелочные с рН до 8,5—9,2, а также выпадение осадок карбонатов кальция. Последний процесс может не только несколько изменять ионный состав терм, но при интенсивном течении приводить и к кальматированию стенок водовыводящих трещин, постепенно изолируя последние от вмещающей породы и одновременно сужая водоподводящие каналы. При высоком содержании карбонатов кальция в термальных водах, выводимых скважинами, эти процессы могут приводить к резкому сокращению полезного сечения и даже закупорке скважин, препятствующей их нормальной эксплуатации (такие случаи были при разведке гидротермального района Вайотапу в Новой Зеландии).

### Химический состав некоторых характерных

Область	Воды кратерных озер и воронок						Термальные воды		
	Новая Зеландия			СССР, о-в Парамушир			СССР, о-в Парамушир		
Район и источник	Вулкан Белый Остров, Кратерное озеро Vigorously Boiling			Вулкан Эбеко, центральная воронка Верхнего кратера			Вулкан Эбеко, ист. Верхне-Юрьевский		
Время взятия проб	1939 г. <sup>1</sup>			30.VIII 1955 г. <sup>2</sup>			1.IX 1955 г. <sup>2</sup>		
Температура воды при выходе на поверхность, в °С	—			100,0			95,0		
В 1 л воды содержится	г	мг/экв	экв. %	г	мг/экв	экв. %	г	мг/экв	экв. %
<b>Катионы</b>									
H <sup>+</sup>	0,308	308,0	15,12	1,7764	1776,40	98,34	0,1433	143,30	44,60
Li <sup>+</sup>	—	—	—	0,0024	0,34	—	0,0068	1,03	0,32
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,018	1,0	0,05	0,0050	0,32	—	0,0600	3,34	1,03
Na <sup>+</sup>	7,670	333,5	16,37	0,1081	4,70	0,25	0,2866	12,46	3,84
K <sup>+</sup>	1,000	25,6	1,26	0,0921	2,37	0,13	0,2679	6,90	2,16
Mg <sup>2+</sup>	7,310	601,0	29,50	0,0322	2,65	0,13	0,2267	18,64	5,86
Ca <sup>2+</sup>	2,560	127,8	6,27	0,0920	4,60	0,25	0,3444	17,20	5,35
Str <sup>2+</sup>	0,010	0,2	0,01	0,0008	0,01	—	0,0010	0,01	—
Fe <sup>2+</sup>	11,340	406,4	19,95	0,2016	7,20	0,40	0,7742	27,65	8,60
Fe <sup>3+</sup>	0,140	7,5	0,37	0,0372	2,01	0,12	0,4170	22,30	6,94
Al <sup>3+</sup>	2,030	224,7	11,03	0,0619	6,81	0,38	0,6084	67,68	21,06
Mn <sup>2+</sup>	0,260	1,4	0,07	9,0032	0,11	—	0,0200	0,79	0,24
Co <sup>2+</sup>	—	—	—	0,00028	—	—	0,00012	—	—
Ni <sup>2+</sup>	—	—	—	0,00097	—	—	0,00031	—	—
Cu <sup>2+</sup>	—	—	—	0,00003	—	—	0,00001	—	—
Ti <sup>4+</sup>	—	—	—	0,00016	—	—	0,0006	—	—
<b>Сумма . .</b>	<b>32,646</b>	<b>2037,1</b>	<b>100,00</b>	<b>2,4085</b>	<b>1807,52</b>	<b>100,00</b>	<b>3,1459</b>	<b>321,30</b>	<b>100,00</b>
<b>Анионы</b>									
F <sup>-</sup>	0,870	45,8	2,38	0,0030	0,15	—	0,0520	2,70	0,04
Cl <sup>-</sup>	61,840	1744,0	90,59	63,0412	1777,82	98,98	4,9280	138,90	43,03
Br <sup>-</sup>	0,040	0,5	0,03	0,0440	0,58	—	0,0005	—	—
I <sup>-</sup>	0,006	—	—	0,0004	—	—	Не обнаружено	—	—
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,346	48,8	2,53	0,9955	20,74	1,02	8,8553	184,48	56,93
HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	8,210	84,6	4,39	—	—	—	—	—	—
H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	0,170	1,5	0,08	—	—	—	—	—	—
S <sub>6</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup>	0,010	—	—	—	—	—	—	—	—
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>Сумма . .</b>	<b>73,486</b>	<b>1925,2</b>	<b>100,00</b>	<b>64,0841</b>	<b>1719,29</b>	<b>100,00</b>	<b>13,8360</b>	<b>326,08</b>	<b>100,00</b>
<b>Недиссоциированные молекулы</b>									
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,230	—	—	0,0768	—	—	0,3170	—	—
HBO <sub>2</sub>	0,026	—	—	—	—	—	—	—	—
H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	—	—	—	0,0008	—	—	0,0006	—	—
H <sub>2</sub> S	0,030	—	—	—	—	—	—	—	—
CO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
<b>Общая минерализация</b>	<b>105,427</b>	—	—	<b>66,8341</b>	—	—	<b>17,6498</b>	—	—
<b>pH</b>	<b>~0,5</b>	—	—	<b>-1,7</b>	—	—	<b>0,86</b>	—	—
<b>Формула химического состава</b>	$M_{104} \frac{Cl_{11}}{Mg_{20}Fe_{20}Na_{18}H_{11}Al_{11}}$			$M_{67} \frac{Cl_{20}}{H_{98}}$			$M_{11} \frac{SO_{57}Cl_{43}}{H_{44}Al_{11}}$		

<sup>1</sup> По С. Н. Уилсон (W. M. Hamilton und I. L. Baumgart White Island, 1959). Расчет pH произведен по данным анализа С. С. Крапивиной.

<sup>2</sup> Проба воды взята автором, анализ выполнен С. С. Крапивиной, определение F—Е. П. Рябичкиной.



## представителей fumarольных терм

глубинного формирования			Термальные воды поверхностного формирования					
СССР, о-в Кунашир			Япония, префектура Точига			СССР, о-в Кунашир		
Вулкан Менделеева, ист. Нижне-Менделеевский			Вулкан Назудак, ист. Мото-Ю			Вулкан Менделеева, ист. Северный		
30. X 1954 г. <sup>3</sup>			—			1. X 1954 г. <sup>3</sup>		
91,3			69,9			69,9		
г	мг/экв	экв, %	г	мг/экв	экв, %	г	мг/экв	экв, %
0,0200	20,00	32,85	0,0150	15,00	46,4	0,0200	20,00	32,88
—	—	—	0,00001	—	—	—	—	—
0,0039	0,38	0,62	0,0031	0,17	0,5	0,0080	0,44	0,72
0,1212	5,27	9,59	0,0222	0,96	3,0	0,4551	19,79	32,40
0,1047	2,67	3,37	0,0071	0,18	0,5	0,0096	0,23	0,30
0,0680	5,64	8,99	0,0305	2,50	7,7	0,0087	0,71	1,16
0,1496	7,43	12,10	0,0636	3,18	9,8	0,0791	3,95	6,45
0,0009	—	—	—	—	—	сл.	—	—
0,2194	7,84	12,80	0,0275	0,95	3,0	0,1124	6,07	9,92
0,0312	1,68	2,74	—	—	—	0,0344	1,22	1,98
0,0930	10,35	16,94	0,0852	9,45	29,1	0,0779	8,65	14,16
0,0304	—	—	0,00032	—	—	0,0006	0,02	0,03
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,00009	—	—	0,00003	—	—	0,00003	—	—
0,0002	—	—	0,00017	—	—	0,0035	—	—
0,81559	61,26	100,00	0,2547	32,40	100,00	0,8061	61,08	100,00
0,0012	0,06	0,09	0,00035	0,02	0,1	0,0009	0,04	0,07
0,9825	27,77	45,33	0,1688	4,55	14,0	0,0925	2,61	4,27
0,0033	—	—	—	—	—	0,0004	—	—
Не обнаружено	—	—	—	—	—	Не обнаружено	—	—
1,1539	24,04	39,30	0,6024	12,55	38,6	2,0190	42,04	68,83
0,9108	9,39	15,28	1,4416	15,17	46,6	1,5910	16,39	26,83
—	—	—	0,0003	—	—	—	—	—
—	—	—	0,0006	0,01	—	—	—	—
—	—	—	0,0060	0,05	0,2	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	0,0062	0,13	0,4	—	—	—
3,0487	61,26	100,00	2,2263	32,48	100,00	3,7038	61,08	100,00
0,3515	—	—	0,1908	—	—	0,3568	—	—
—	—	—	0,2320	—	—	—	—	—
0,0015	—	—	0,0335	—	—	0,0011	—	—
—	—	—	0,0345	—	—	0,0442	—	—
—	—	—	0,066	—	—	—	—	—
4,3479	—	—	2,9073	—	—	4,9610	—	—
1,7	—	—	1,5	—	—	1,7	—	—
$M_{4,2} \frac{Cl_{41}(SO^4+HSO^4)_{11}}{H_{22}Al_{17}Fe_{15}Ca_{12}}$			$M_{2,9} \frac{(SO^4+HSO^4)_{21}Cl_{14}}{H_{44}Al_{29}(Ca+Mg)_{17}}$			$M_{3,6} \frac{(SO^4+HSO^4)_{26}}{H_{22}Na_{22}Al_{14}Fe_{12}}$		

<sup>3</sup> Проба воды взята автором, анализ выполнен С. С. Крапивиной.<sup>4</sup> По Kimura В., Jojojama Y. и Ikeda N.. 1954. Пересчет анализа в эквивалентную форму произведен И. Х. Забелышинской.

Вместе с тем частая кальцитизация пород, наблюдаемая в разрезах буровых скважин, выводящих рассматриваемые термы, может являться результатом более длительного и более древнего процесса. Поэтому связывать это явление с современными гидротермальными процессами и с современным составом терм можно только с большой осторожностью, на основе тщательного и всестороннего анализа геологических и гидрогеологических условий, желательного с применением методов определения абсолютного возраста отложений.

Интенсивное пароотделение (а также газоотделение) приводит к образованию в верхних частях водовыводящих каналов или буровых скважин — пароводяной смеси (парлифта), резю изменяющей динамику фонтанирования термальных вод и значительно усиливающей их приток на поверхность.

Наблюдающийся для многих представителей именно этого типа терм (Исландия, Новая Зеландия, Камчатка и др.) гейзерный режим фонтанирования связан непосредственно с эффектом «самооткачки» источников (а в некоторых случаях и скважин, например, в Вайракей в Новой Зеландии, на Паужетских источниках на Камчатке) и зависит от двух основных факторов: высокой температуры вод и ограниченности притока последних к каналам, питающим гейзеры (или скважины).

В условиях естественной разгрузки рассматриваемых термальных вод на поверхность во многих вулканических областях (Камчатка, Новая Зеландия, Исландия и др.) возникают вторичные поверхностные процессы образования слабокислых термальных растворов. В результате дегазации глубинных термальных вод в очагах их разгрузки газопаровые выделения могут конденсироваться в грунтовых и поверхностных застойных водах, образуя в результате окисления  $H_2S$  слабокислые-сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные воды низкой минерализации, содержащие в тех или иных количествах  $CO_2$  и  $H_2S$ .

Эти слабокислые вторичные поверхностные термальные растворы — характерные спутники глубинных терм — генетически отличны от рассмотренных выше сероводородно-углекислых типично вулканических термальных вод.

Процессы образования кислых термальных газопаровых выделений и вторичных кислых водных растворов приводят во многих случаях, наряду с типично фумарольной деятельностью, к интенсивному термальному изменению (выщелачиванию, разложению) вулканических пород, к превращению их в пестроцветные структурные глины, широко распространенные во всех областях активного вулканизма.

Недоучет указанных характерных геохимических процессов, проявляющихся во многих вулканических районах в крупных масштабах, приводил нередко в прошлом к неверной интерпретации геологических фактов, к ошибочному установлению фумарольных явлений там, где в действительности имели место только интенсивная гидротермальная деятельность.

В табл. 4 приводится состав некоторых известных представителей охарактеризованных термальных вод.

3. Углекислые термы представляют собой в областях молодой вулканической деятельности весьма широко распространенный тип термальных вод. Генетически эти термы не связаны непосредственно с активными вулканическими явлениями. Их образование и распространение определяются в основном процессами глубинного термометаморфизма горных пород, которые могут приводить к значительному насыщению водоносных горизонтов углекислотой.

В сфере непосредственного воздействия активных вулканических очагов формируются обычно только два охарактеризованных выше типа

Таблица 4

## Химический состав некоторых характерных представителей азотно-углекислых терм

Область	Новая Зеландия <sup>1</sup>			Исландия <sup>2</sup>			Камчатка <sup>3</sup>		
	Район и источник	Вайракей (сква 4)			Кризувик (главная скважина)			Паужетские источники (Пульсирующий источник)	
Время взятия проб	—			26 VII 1957 г			19 IX 1958 г.		
Температура воды при выходе на поверхность, °С	Выше 100			Выше 100			Выше 100		
В 1 л воды содержится	г	мг/экв	экв %	г	мг/экв	экв %	г	мг/экв	экв %
<b>Катионы</b>									
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,0009	0,05	0,1	0,0002	0,01	—	Не обнаружено	—	—
Li <sup>+</sup>	0,0122	1,74	1,6	—	—	—	—	—	—
Na <sup>+</sup>	1,1300	49,13	87,9	0,5531	24,05	89,3	0,9489	41,26	90,1
K <sup>+</sup>	0,1460	3,74	6,7	0,0540	1,37	5,0	0,0648	1,65	3,6
Mg <sup>2+</sup>	0,0010	0,82	1,4	0,0078	0,64	2,4	0,0037	0,30	0,6
Ca <sup>2+</sup>	0,0260	1,30	2,3	0,0174	0,87	3,3	0,0519	2,59	5,7
Сумма	1,3161	56,78	100,0	0,6325	26,94	100,0	1,0693	45,80	100,0
<b>Анионы</b>									
F <sup>-</sup>	0,006	0,32	0,6	0,0002	0,01	—	0,0009	0,04	0,1
Cl <sup>-</sup>	1,927	54,28	97,1	0,8488	23,93	87,1	1,5377	43,36	94,4
Br <sup>-</sup>	—	—	—	0,0020	0,02	—	0,0042	0,05	0,1
I <sup>-</sup>	—	—	—	Не обнаружено	—	—	Не обнаружено	—	—
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,035	0,73	1,3	0,0740	1,54	6,0	0,0727	1,51	3,3
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,035	0,57	1,0	0,0050	0,08	0,3	0,0335	0,55	1,1
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	—	—	—	0,0003	0,01	—	0,0090	0,30	0,7
HSiO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—	—	—	0,1400	1,88	6,6	0,0078	0,10	0,3
Сумма	2,003	55,91	100,0	1,0703	27,47	100,0	1,6658	45,91	100,0
<b>Недиссоциированные молекулы</b>									
H <sub>2</sub> S	0,0009	—	—	—	—	—	—	—	—
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,5020	—	—	0,518	—	—	0,204	—	—
HBO <sub>3</sub>	0,1060	—	—	Не обнаружено	—	—	—	—	—
Общая минерализация	3,9441	—	—	2,2216	—	—	3,05	—	—
pH	8,6	—	—	9,2	—	—	8,2	—	—
Формула химического состава	$M_{3,9} \frac{Cl_{97}}{(Na_2 + K)_{95}}$			$M_{2,2} \frac{Cl_{97}}{(Na + K)_{94}}$			$M_{3,1} \frac{Cl_{94}}{(Na + K)_{94}}$		

<sup>1</sup> S. H. Wilson, 1955 Пересчет анализа в мг/экв форму произведен С. С. Крапивиной.<sup>2</sup> Проба воды взята автором, анализ выполнен С. С. Крапивиной и Е. П. Рябичкиной<sup>3</sup> Проба воды взята автором, анализ выполнен С. С. Крапивиной

термальных вод. Углекислые же термы, не содержащие в газовой составляющей  $H_2S$ , возникают в областях современного вулканизма только на некотором расстоянии от действующих вулканов. Во многих районах, где проявился только раннечетвертичный вулканизм (Малый Кавказ, Центральное вулканическое плато Франции, некоторые районы Камчатки и др.), углекислые термы представлены значительно шире и более характерными типами вод, чем в районах современного активного вулканизма.

Углекислые термы формируются на достаточной глубине в весьма разнообразных горных породах — осадочных, вулканических, интрузивных и др. Их ионно-солевой состав определяется исходным составом подземных вод, насыщающихся  $CO_2$ , которые могут иметь как морское, так и атмосферное происхождение и литологическим составом водовмещающих пород, выщелачиваемых агрессивными углекислыми водами.

Характерным компонентом большинства высокотемпературных углекислых терм являются хлориды, которые типичны вообще для всех подземных вод глубокой циркуляции. Вторым важным анионом являются гидрокарбонаты, которые могут присутствовать в значительных количествах в самих исходных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых водах морского генезиса, но могут накапливаться и в углекислых водах в результате процессов растворения последними карбонатных отложений (известняков, кальцитовых жил и др.).

Среди катионов в углекислых термах на первом месте стоит натрий, на втором кальций, реже магний. Соотношения между ними во многом определяются процессами катионного обмена между водами и породами.

Состав некоторых представителей углекислых терм различных вулканических областей приведен в табл. 5.

Углекислые термы, формирующиеся обычно в полужакрытых структурах с затрудненным водообменом, могут обладать весьма высокой газонасыщенностью — до нескольких десятков граммов  $CO_2$  в литре воды.

Температура углекислых вод определяется глубиной их циркуляции часто в условиях несколько повышенного геотермического режима. В естественных выходах эти термы обладают обычно температурой до  $60-80^\circ C$ .

При подъеме к поверхности большая часть растворенной в них  $CO_2$  выделяется в виде спонтанного газа, создающего интенсивно-газирующие источники. Одновременно, при значительном содержании в водах Ca и Mg, последние выпадают в осадок в виде травертиновых (карбонатных) отложений, иногда совместно с Fe и As.

При интенсивной дегазации, до выхода на поверхность поднимающихся с глубины углекислых терм, могут создаваться благоприятные условия для насыщения  $CO_2$  выщележащих подземных, в частности, грунтовых вод и образования вторичных углекислых, обычно гидрокарбонатных вод невысокой минерализации и низкой температуры.

В результате дегазации углекислых терм могут также появляться, как указывалось уже выше, углекислые газовые струи, которые в прошлом обычно ошибочно рассматривались только как результат вулканической деятельности.

4. Азотные термы один из наиболее распространенных в природе типов термальных вод. Это в большинстве случаев типичные трещинные воды атмосферного происхождения, формирующиеся в основном в результате выщелачивания горных пород в восстановительной обста-

Краткая сравнительная характеристика состава некоторых углекислых терм областей современного и раннечетвертичного вулканизма

Область	Источники	Т вод, °С	Минерализация, г/л	Формула ионного состава	pH
I Области современного вулканизма					
Камчатка	Налачевские	74,8	4,4	$\frac{Cl_{72}SO_{15}^4}{(Na+K)_{75}Ca_{21}}$	6,4
Камчатка	Тимоновские	48,0	3,2	$\frac{HCO_{44}^3 Cl_{34}SO_{22}^4}{(Na+K)_{66}Ca_{20}}$	6,5
о-в Итуруп (Курильские острова)	Дачные	34,0	5,9	$\frac{Cl_{60}HCO_{39}^3}{(Na+K)_{70}Ca_{15}Mg_{15}}$	6,0
Япония (р-н Арима)	Тенманго-но-ю (скважина)	94,0	76,7	$\frac{Cl_{66}}{(Na+K)_{41}Ca_{17}}$	5,8
II. Области раннечетвертичного вулканизма					
Малый Кавказ	Исти-су	55,0	4,9	$\frac{HCO_{52}^3 Cl_{33}SO_{15}^4}{(Na+K)_{86}}$	6,6
Центральное вулканическое плато Франции	Ля Бурбуль	54,7	5,8	$\frac{Cl_{61}HCO_{35}^3}{(Na+K)_{96}}$	6,7
Чехословакия	Карловы Вары	73,0	6,5	$\frac{HCO_{40}^3 SO_{40}^4 Cl_{20}}{(Na+K)_{89}}$	

новке, вне генетической и пространственной связи с магматическими и термометаморфическими процессами.

Химический состав этих терм в вулканических областях очень однообразен: воды обладают низкой минерализацией (не более 1,0—1,5 г/л), сильнощелочной реакцией (рН более 8,0), преимущественно хлоридно-сульфатным натриевым составом и высоким содержанием  $H_2SiO_3$ . Температура этих терм при выходе на поверхность лежит обычно в пределах 60—100°. Щелочная реакция для этих терм остается неизменной как на глубине, так и при выходе на поверхность (см. рис. 1).

По условиям формирования азотные щелочные термы вулканических областей аналогичны слабоминерализованным азотным термам гранитных массивов многих древних платформенных и горно-складчатых областей. Отличия первых заключаются только в несколько более высокой минерализации и несколько большем абсолютном содержании некоторых ионов (табл. 6 и 7).

Особенности химического состава и основных процессов формирования главнейших типов термальных вод областей современного вулканизма позволяют констатировать следующее.

1. Основные генетические типы термальных вод областей современного вулканизма характеризуются своеобразием газового и ионно-солевого состава, геологических условий и геохимических процессов образования.

Таблица 6

**Краткая сравнительная характеристика состава некоторых  
слабоминерализованных азотных щелочных терм различных областей СССР**

Область	Источники	Т вод, °С	Минерализация, г/л	Формула ионного состава	pH
<b>I. В пределах области современного вулканизма</b>					
Камчатка	Начикинские	80,6	1,2	$\frac{SO_{59}^4 Cl_{34}}{(Na+K)_{90}}$	8,4
То же	Малкинские	82,7	0,6	$\frac{SO_{38}^4 Cl_{36} HCO_{23}^3}{(Na+K)_{97}}$	9,4
» »	Апапельские	96,0	1,5	$\frac{SO_{56}^4 Cl_{26}}{(Na+K)_{93}}$	8,1
<b>II. В пределах древних платформенных и горно-складчатых областей</b>					
Материковые области Дальнего Востока СССР	Кульдурские	72,0	0,3	$\frac{(HCO^3 + CO^3)_{46} Cl_{31}}{(Na+K)_{94}}$	9,3
	Тальские	90,0	0,5	$\frac{(HCO^3 + CO^3)_{42} Cl_{38}}{(Na+K)_{93}}$	9,1
Прибайкалье	Горячинские	54,3	0,6	$\frac{SO_{88}^4}{(Na+K)_{88}}$	9,3
Таджикская ССР	Хаджа-Оби-Гарм	94,0	0,5	$\frac{Cl_{32} (CO^3 + HCO^3)_{45} SO_{25}^4}{(Na+K)_{89}}$	8,6

При взаимодействии термальных вод с горными породами и другими водами происходит частичное изменение состава термальных растворов, однако это, как правило, не приводит к переходу одних типов терм в другие.

2. Основным источником питания гидротерм областей современного вулканизма служат инфильтрационные атмосферные воды. В составе лишь некоторых фумарольных терм допустимо незначительное участие вод магматического и термометаморфического происхождения.

3. В формировании газового состава терм принимают участие газы магматического, термометаморфического и воздушного происхождения. Ионно-солевой состав терм формируется в результате сложных, различных для разных типов терм, геохимических процессов взаимодействия вулканических газов, вод и горных пород.

4. Условия циркуляции большинства гидротерм областей современного вулканизма подчиняются обычным гидрогеологическим и гидродинамическим закономерностям, свойственным всем подземным водам.

Даже при весьма высоких температурах на глубинах в несколько сот метров гидротермы находятся, как правило, только в жидком состоянии; газовый фактор терм на больших глубинах не влияет на условия циркуляции термальных вод.

5. В верхних горизонтах вулканических толщ условия миграции вулканических газов во многом определяются гидрогеологическими условиями. Подземные воды играют роль своеобразного фильтра, отделяющего из газовых струй легко растворимые компоненты.

Таблица 7

**Среднее содержание основных компонентов  
в азотных слабоминерализованных щелочных  
термах Камчатки и материковых областей СССР<sup>1</sup>**  
(в мг/л)

Компоненты	Камчатка	Материковые области
<b>Анионы</b>		
Cl	150,0	30,0
SO <sub>4</sub>	400,0	120,0
HCO <sub>3</sub> + CO <sub>3</sub>	75,0	80,0
<b>Катионы</b>		
Na + K	250,0	100,0
Ca	65,0	10,0
Mg	4,0	1,0
<b>Недиссоциированные молекулы</b>		
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	130,0	90,0
<b>Общая минерализация</b>	<b>1,1</b>	<b>0,4</b>
<b>pH</b>	<b>8,5</b>	<b>9,0</b>

<sup>1</sup> Средние значения высчитаны для каждой группы по 10 наиболее характерным источникам.

6. В очагах естественной разгрузки напорных высокотермальных (перегретых) вод возникают процессы парообразования и дегазации терм, образования газо-паровых струй и вторичных кислых поверхностных термальных растворов, которые приводят к интенсивным гидротермальным изменениям вулканических пород.

7. Химический состав многих термальных вод вулканических областей при подъеме их к поверхности испытывает существенные изменения, которые могут приводить к выпадению в осадок многих присутствующих в них компонентов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бетехтин А. Г. Гидротермальные растворы, их природа и процессы рудообразования. Сб. «Основн. пробл. в учении о магматог. рудн. месторождениях», М., Изд-во АН СССР, 1953.
- Зеленов К. К. О выносе растворенного железа в Охотское море гидротермами вулкана Эбеко (о-в Парамушир). Докл. АН СССР, т. 120, № 5, 1968.
- Иванов В. В. Гидротермы очагов современного вулканизма Камчатки и Курильских островов. Труды Лаб. вулканол. АН СССР, вып. 12, 1956.
- Иванов В. В. Основные стадии гидротермальной деятельности вулканов Камчатки и Курильских островов и связанные с ними типы термальных вод. Геохимия, № 5, 1958;
- Иванов В. В. Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока СССР. Сб. «Вопр. формиров. и распр. минеральн. вод СССР».. М., Труды Центр. ин-та курортол. и физиотерап., 1960.
- Коржинский Д. С. Факторы минеральных равновесий и минералогические фации глубинности. Труды Ин-та геол. наук АН СССР, сер. петрогр., в. 12, № 5, 1940.
- Набоко С. И. Вулканические эксгалации и продукты их реакций. Труды Лаб. вулканол. АН СССР, в. 16, 1959.
- Овчинникова М. Гидрогеологические условия гидротермальных процессов. Бюлл. моск. об-ва испыт. природы, Отд. геологии, т. XXII, № 5, 1957.

- Barth T. Volcanic Geology. Hot Springs and Gyesers of Iceland. Carnegie Inst. Wash. Publ. 587, 1950.
- Hamilton W. M., Baumgart I.L. White Island New Zealand. Department of Scientific and Industrial Research. Bulletin. 127. 1959.
- Kimura K., Yokogama Y. and Ikeda N. Geochemical studies on the minor constituents in mineral Springs of Japan. Un. geod. et geoph. intern. Ass. Int. d'Hydro. Sci., Assamblee Gen. de Rome, t. 11, 1954.
- Lloyd E.F. The hot Springs and Hydrothermal Eruptions of Waiotapu. New Zeal. Journ. of Geol. and Geoph., vol. 2, No. 1, 1959.
- White D.E., Sandberg C.H. and Brannock N. N. Geochemical, geophysical approaches to the problem of the utilization of Hot Springs Waters and Steam and their utilization. Proc. of the Seventh Pac. Congr. of the Pacific Sci. Ass. Wellington, vol. 11, Geology, 1953.
- White D. E., Thermal Waters of Volcanic Origin. Bull. of the Geol. Soc. of Am. vol. 68, 1957.
- Willson S.H. Chemical Investigations Geothermal Steam for Power in New Zealand. New Zeal. Depart. of Sci. and Industr. Res., 117, 1955.