

# GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЕЙЗЕРНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

*Арсанова Г.И.*

*кандидат геолого-минералогических наук*

*старший научный сотрудник*

*Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

## CONCEPTUAL MODEL OF GEYSER GEOLOGICAL STRUCTURE

*Arsanova G.*

*Ph.D. in Geologo-mineralogical sciences,*

*senior researcher Officer*

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*

### Аннотация

Предложена новая понятийная модель гейзерной геологической структуры.

Свойства и характеристики гейзеров сопоставлялись с процессами, вследствие которых они могут появиться или, наоборот, - появиться не могут.

Системный анализ показал, что газовый и минеральный состав гейзерных вод, их температура и ряд других их показателей не отвечают истории, согласно которой в Природе происходит нагрев метеорных вод о магматические тела.

Геологическая локализация гейзеров указывает на связь их возникновения с долгоживущими вулканическими центрами, что подтверждается особенностями состава и состояния гейзерной воды.

Согласно предлагаемой концепции, извергаемая гейзерами вода рассматривается как продукт вулканизма.

### Abstract

A new conceptual model of the geological structure of geysers is proposed.

The properties and characteristics of geysers were compared with the processes as a result of which they may appear or, conversely, cannot appear.

Systematic analysis showed that the gas and mineral composition of geyser waters, their temperature and a number of their other indicators do not correspond to the story according to which meteor waters are heated by magmatic bodies in Nature.

The geological localization of geysers indicated the connection of their occurrence with long-lived volcanic centers, which is confirmed by the peculiarities of the composition and condition of geyser water.

A new concept is proposed in which the water spewed by geysers is considered as a product of volcanism.

**Ключевые слова:** гейзер, вулкан, нагрев воды о магматические тела, гидротермы, сложные системы самоорганизация материи, природная автоколебательная система, природные газы, газлифт.

**Keywords:** geyser, volcano, water heating on magmatic bodies, hydrotherms, complex systems of self-organization of matter, natural self-oscillatory system, natural gases, gas-lift.

Очевидное редко бывает истинным.

КОНФУЦИЙ

Гейзер - фонтанирующий источник кипящей воды, выбросы которого повторяются через определённый промежуток времени.

Цель работы – обозначить место гейзеров в вулканизме. Маленький по геологическим масштабам, он потому столь интересен геологу любой специализации, что на нём сошлись большие геологические проблемы.

Исторически так получилось, что первыми горячие воды Земли начали изучать медики. Вопрос генезиса гидротерм для них был не так уж важен. Наиболее вероятным представлялся контактный нагрев холодной воды о глубинные горячие тела и смешение различных вод и глубинного пара. Меха-

низм казался столь очевидным, что не требовал доказательств, и представления вошли в научную гидрогеологическую литературу.

В начале 19 века Зюссом было высказано предположение о глубинном поступлении горячих вод, ранее не бывших в поверхностном кругообороте, но это представление гидрогеологами практически не развивалось.

Ныне площадки гейзеров и отдельные гейзеры во многих частях мира с помощью различных датчиков описаны, измерены и изучены с поверхности и до некоторой глубины (пара десятков метров). В отдельных местах даже разбурены их площади. Однако теория гейзерного процесса не создана: не ясна природа глубинного восходящего потока кипящей воды.

Часто исследователь, подобно старцам из старой притче о слоне, ищет геологические причины тех параметров, которые изучает непосредственно.

Более того. В середине прошлого столетия утверждалось, что различные свойства и характеристики гейзеров вообще есть следствия независимых причин. Например, считалось, что высокая температура воды, возникновение специфического (гейзерного) режима извержения, происхождение минеральной составляющей воды, её газовый состав - объясняются разными процессами, «которые не надо путать» [Устинова 1955].

Ныне создан ряд классификаций термальных вод, и предложены многочисленные процессы, объясняющих их отдельные физико-химические параметры, например [Кононов 1983]. При этом компоненты, характеристики и даже процессы рассматриваются в основном как аддитивные множества.

Во второй половине прошлого века в естествознание пришло понимание глубокой взаимосвязи, взаимозависимости и взаимообусловленности объектов и явлений в мире. Правда, так считали еще и в далёкой древности. На новом уровне увидели возможность возникновения сложных природных систем как следствия самоорганизации материи. Работы И.Пригожина, И.Стенгерс, Г.Хакена, Е.Князевой, С.Курдюмова, В.Эбелинга, Д.Чернавского и ряда других вошли в учебники. Настоящие исследования природы гейзеров лежат в тренде этой парадигмы.

Для возможно более адекватного понимания природы гейзеров использован системный подход, в рамках которого были конкретизированы общие значимые черты и качества гейзеров: состав, температура, динамика, локализация и т.п. Их совместный анализ дал возможность исключить «не работающие» здесь механизмы и предложить концепцию, которая наиболее непротиворечиво объясняет наличие их всех в совокупности.

### **1. Ранние объяснения причин гейзерного режима**

Изучение гейзеров начали еще в 19 веке с исследования причин периодичности их извержений, как самого яркого их проявления. Это работы Р. Бунзена и многих других. В 40-х годах прошлого столетия гейзеры Долины Гейзеров на Камчатке изучала их первооткрывательница Т. Устинова [1955], которая, в свою очередь, тоже предложила физическую модель извержения.

Причину гейзерного режима искали в структурных особенностях подводных каналов. Предполагалось поступление в канал холодных вод из окружающих пород. Существовало представление о наличии на глубине магматического очага и о поднимающимся от него горячем паре, который накапливается в полостях пород, связанных с каналом, и периодически разбавляется холодной водой.

В пятидесятых годах прошлого века была разбурена гейзерная гидротермальная система в районе реки Паужетка на Камчатке. Часть скважин вывела горячую воду в непрерывном режиме, а некоторые - извергали воду и пар в прерывистом гейзерном режиме. Чтобы изменить режим на непрерывный (для удобства эксплуатации) оказалось достаточным уменьшить диаметр обсадных труб [Аверьев 1960].

Казалось бы, после этого опыта вопрос необходимости проточных камер под гейзерами, как и необходимость приповерхностного подмешивания холодных вод, - отпали. Однако в 1970 г А.Мержановым, А.Штейнбергом и Г.Штейнбергом была сделана попытка создания теории гейзерного процесса, в которой математические выкладки вновь опирались на существование сложной гипотетической конструкции в породах под гейзером.

Если возникновение многофункциональной структуры под единичным гейзером можно назвать маловероятным событием (обусловлено суммой случайностей), то вероятность таких конструкций под каждым гейзером площадки слишком ничтожна, что понимали уже тогда и сами их авторы. В Институте вулканологии физиком В. Дрозниным были созданы три различных работающих конструкции гейзеров, которые демонстрировались на IV Всесоюзном вулканологическом совещании. Работу гейзеров они имитировали, но гейзер как природное явление - не объясняли.

Тем не менее, из-за простоты и наглядности представление о существовании проточной емкости под каждым гейзером оказалось очень живучим, и время от времени «народные» исследователи и журналисты к ней возвращаются.

В силу своей профессии геолог ищет причины периодичности гейзера в структуре пород под ним, в то время как физик (в силу своей профессии!) только по внешнему виду определяет гейзер как часть природной автоколебательной системы. В учебниках по физике гейзер приводится как пример такой системы. Геологу важно понять геологическую структуру, которая действует как автоколебательная система.

### **2. Об автоколебаниях и автоколебательных системах**

Термин «автоколебания» был введён в науку А.Андроновым в 1928 году; теория автоколебаний построена несколько позже.

Автоколебательные устройства в больших количествах создаются в технике. Но помимо созданных искусственно, в Природе они организуются еще и сами по себе. Поэтому есть серьезная необходимость учитывать возможность их возникновения. (Информацию об автоколебаниях см. в учебниках для тех. вузов, а также статьях и монографиях, например, [Харкевич 1954]).

Автоколебания — это самовозникающие незатухающие колебания в диссипативной динамической системе с нелинейной обратной связью, поддерживающейся за счёт энергии постоянного внешнего воздействия.

Так как автоколебательная система это всегда диссипативная динамическая система, то ей присущи и их общие свойства и особенности. Свойства же эти (как известно из физики) — одни и те же вне зависимости от типа среды, в которой возникла система. (Кратко в геологической работе эти свойства приводились ранее [Арсанова 2020б]).

Следовательно, для объяснения действия гейзерной геологической структуры (далее ГГС) следует привлекать известные данные по свойствам и особенностям автоколебательных систем.

Известно, что диссипативные динамические системы относительно изолированы (подобно трубе) от внешней среды, а энергия поступает в них извне, и компенсирует потери энергии самой системой. Следовательно, тоже имеет место в ГГС.

Моменты поступлений энергии, задаются самой колеблющейся системой (а не внешней средой!). Тоже происходит и с ГГС.

Собственные внутренние свойства системы (вид и параметры колебаний) тоже задаются и управляются самой системой. В нашем случае система «сама определила» так называемый релаксационный вид автоколебаний, когда периодически идёт накопление поступающей энергии до определенного уровня, после чего происходит срыв и повторение процесса.

Все автоколебательные системы включают определенные функциональные узлы (подсистемы), которые действуют во взаимосвязи. Значит, они должны быть и в ГГС, которая ведёт себя как автоколебательная система.

Привлечение известных свойств автоколебательных систем даёт общее представление о ГГС, однако будет не лишним сопоставить его с данными, полученными традиционными геологическими средствами.

### **3. Анализ особенностей гейзеров как следствия их происхождения**

Основная ныне действующая гипотеза возникновения на поверхности Земли гейзеров (гипотеза нагрева) опирается на следующие принципы:

(1) По открытым полостям метеорные воды опускаются в породы и, контактируя с ними, обогащаются минеральной и газовой составляющей.

(2) В районах активного вулканизма эти циркулирующие воды нагреваются о неглубокие магматические тела.

(3) Динамика вод обеспечивается разностью высот зон их питания и разгрузки.

Однако накопившийся фактический материал в эту гипотезу давно не вписывается.

Чтобы понять, почему гейзеры работают так, как они работают, надо прежде собрать их новую наиболее не противоречивую смысловую модель.

Первый шаг на этом пути: систематизировать имеющийся фактический материал с целью сопоставления свойств гейзеров с процессами, которые за эти свойства отвечают. Анализ свойств действующих веществ, значений их параметров и особенностей поведения даёт возможность допускать или исключать процессы, в ходе которых явления и вещества с такими свойствами могут или – не могут появиться.

Цель сравнительного анализа – в том, чтобы определить геологический процесс, следствием которого могут быть все значимые свойства и особенности гейзеров вместе взятые, и исключить геологические механизмы, которые хотя и могут объяснить те или иные отдельные характеристики

гейзеров, но при этом не согласуются с существованием других их качеств.

Такой подход сократит предположения, сделанные из общегеологических соображений, а привлечение знаний из смежных наук поможет взглянуть на гейзеры по-новому.

### **3.1. Основные общие свойства и характеристики гейзеров**

Гейзеры Земли возникают группами на относительно небольшой площади в пределах гейзерного поля, или гейзерной площадки вне зависимости от климатических условий местности – и в самой сухой пустыне мира Атакама и на туманной Камчатке, и у моря, и высоко в горах. При этом гейзерных площадок на всей Земле очень немного – известно всего шесть на планету. Правда есть еще редкие единичные выходы.

Да и «живут» гейзеры не слишком долго по геологическим масштабам. Исследователи определяют возраст имеющихся гейзерных полей в пределах одного миллиона лет: от десятков до сотен тысяч. Это означает, что комплекс условий в коре для возникновения на поверхности гейзерной площадки складывается нечасто и существует – недолго. Поэтому априори можно ожидать, что слишком простые, и очевидные объяснения, едва ли будут адекватны генезису этого редкого природного явления.

#### **3.1.1. Исследования гейзеров с поверхности.**

За предшествующие годы трудами многих исследователей выполнен огромный объем работ с поверхности, и собраны разнообразные данные о деятельности гейзеров: от красочных описаний извержений фонтанов кипятка и пара до их изучения с использованием погружаемых датчиков и камер, включая результаты бурения.

Видимая поверхностная часть отдельного гейзера устроена просто. Земная поверхность сечет канал, по которому поднимается вода и пар. Если выход приходится на крутой каменистый берег ручья, то можно видеть щелеобразное или округлое устье канала и отложения гейзерита вокруг на всём, на что попадает при извержении вода. Если же выход расположен на относительно плоской площадке, то над каналом обычно есть воронка или ванна с водой. Они предвещают вход в канал. Иногда канал находится на дне неглубокой пещерообразной полости. Часто вокруг канала образуются причудливые формы из осаждающегося из воды диоксида кремния (минерала гейзерита).

Группа американских геологов между извержениями гейзера Old Faithful (Йеллоустон) опустила в его жерло телекамеру с датчиками и исследовала 21 метр его подземного канала. Канал представлял собой сплюснутую трещиноватую расселину переменной ширины с пережимами до 15 см. Горячая вода с паром поступала с глубины 14 метров.

Каждый из гейзеров гейзерной площадки извергается в своём собственном ритме, со своим интервалом между извержениями (англ. - ИВЕ).

Обычно они достаточно долго (годы) действуют однообразно, но могут поменять режим или даже «замолчать» совсем или на время.

Есть общие стадии извержений, причём они регистрируются и на скважинах, работающих в гейзерном режиме [Аверьев 1960].

Стадии извержений по Т.Устиновой [1955]:

(1) После фонтанирования верхняя часть канала - пуста; затем постепенно наполняется поднимающейся по каналу водой.

(2) Гейзерная воронка наполняется, переполняется, и вода начинает течь через её край.

(3) Поднимаются пузыри, и вдруг резко бьёт пароводяной фонтан, и идет фонтанирование.

(4) В финале возможны извержения пара, которых для отдельных гейзеров может и не быть.

На самом деле периодичность отдельных гейзеров в деталях еще сложнее, как это показали работы В.Дроздина и др. [1999] на гейзере Великан (Долина Гейзеров), особенностью которого является серия промежуточных вскипаний, предшествующих основному выбросу.

Строго говоря, любой гейзер неповторим в деталях по причине разнообразия геометрии каналов.

Было установлено, что на режим (IBE) отдельных гейзеров не влияют колебания атмосферного давления и уровень местных поверхностных вод [Устинова 1955].

На режим гейзеров (IBE) в различной степени сказывается поверхностное охлаждение вплоть до сезонного увеличения периода извержений, зарегистрированных на гейзерах Йеллоустона и Долины Гейзеров на Камчатке [Кирюхин и др.2013].

Другим фактором, изменяющим время периодичности, является возникновение всякого вида динамических сопротивлений на пути подъема, что особенно хорошо видно по наблюдениям на скважинах [Аверьев 1960].

В Природе таким мешающим работе гейзеров явлением были сели. Первым был сел, сошедший в Камчатскую Долину Гейзеров 3.06.2007г. Часть гейзеров оказалась погребена под ним. Явление вызвало много опасений, но постепенно (несколько лет) Долина освободилась от его последствий, и работа гейзеров почти восстановилась, хотя и не вполне с тем же IBE.

Возникшие в результате селей подпрудные озера на гидротермальную систему Долины Гейзеров в целом существенного теплового влияния не оказали [Рычкова 2019].

Основной вывод по сумме наблюдений с поверхности состоит в том, что хотя некоторые поверхностные процессы и влияют на работу гейзеров (мешают, подавляют, причём иногда очень значительно), они не являются определяющими в их жизни, потому что не задают ни их появления, ни их состава, ни их способа излияния на поверхность. Они не влияют на температуру поднимающегося потока («на изменение температуры в геотермальном резервуаре в целом»; по данным TOUGH2-EOS1+tracer моделирования [Рычкова 2019])

Различные препятствия и чрезмерное охлаждение требуют затрат дополнительной энергии на вывод воды на поверхность, и поэтому они сбивают периодичность, увеличивают IBE и т.п. Пока поступление энергии находится в балансе с её тратами, гейзер извергается с IBE, установленной самой системой. Если же какое-то внешнее воздействие востребует дополнительную энергию, – режим сбивается, периодичность меняется. При этом система, корректируя режим «своими силами», так или иначе, восстанавливается через какое-то время. (Такой тип поведения отвечает свойствам диссипативных систем.)

Характерной особенностью подводящих каналов является их относительная изоляция от окружающих холодных вод. Система препятствует их подмешиванию в поднимающийся поток, что было показано и наблюдениями и в лабораторном эксперименте [Рычкова 2019, Кирюхин и др.2013, 2020]. (Что тоже соответствует свойствам диссипативных систем.)

Задает появление и характер функционирования гейзеров на поверхности - глубинный восстающий поток кипящей воды. Он есть главная причина явления, состава воды и газов, объемов поступающего тепла и изолирующих свойств каналов.

Если с поверхности гейзерные поля уже неплохо исследованы, то их глубинное строение, гидродинамика, источник тепла и вещества во многом остаются в области предположений, и единое мнение здесь отсутствует.

Сложность задачи еще и в том, что гидрогеологическими методами она едва ли решается в принципе. Поднятое из очень глубоких горизонтов вещество с неизбежностью будет сильно изменено, причём - необратимо. «Восстановить огонь по пеплу», в какой-то мере можно, опираясь на известные физические и геохимические законы, геологические данные по вулканизму и с учётом способности Природы к самоорганизации структур.

**3.1.2. Свободные газы** – постоянная часть гейзерной воды на поверхности.

Примечание 1. В геологические тексты из техники проник неудачный термин, - «неконденсирующиеся» газы. В технике он объединяет группу мешающих производству газов разного происхождения, которые не удастся вывести из свободного состояния. Так как естествознание изучает поведение естественных газов в естественных условиях, использование этого термина в отношении свободных природных газов теряет изначально заложенный в него смысл и ведёт к путанице. Газы, отнесенные в технике к неконденсирующимся, в природных условиях или не возникают совсем или иначе себя ведут.

Гейзерные свободные газы составляют порядка 0.5 % от пара и их содержание очень колеблется. Они представлены в основном (>90% от общего количества) – CO<sub>2</sub>, а так же – H<sub>2</sub>S (менее десятой части от CO<sub>2</sub>). В ещё меньших количествах есть N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, NH<sub>3</sub>, He, Ar, Rn; и в следах - сероуглерод (COS), серооксид углерода (CS<sub>2</sub>). Вероятно, есть еще какие-то неизвестные. Горячие

газы достаточно сложно в неизменённом состоянии доставить до анализатора, так что открытия и корректировки по качеству и количеству здесь - ожидаемы.

Как известно, растворимость газов в воде с повышением температуры – падает (справочники). В горячей воде газы не растворяются. Кипячение используется как простейший лабораторный способ освобождения воды от  $\text{CO}_2$ . Поэтому обогатиться свободными газами из любых источников кипящая гейзерная вода не может.

Получается, что по состоянию гейзерной воды она не должна содержать газов, но de facto она их содержит. Более того. Максимальные концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  обнаружены в скважинах с более высокой температурой, что было подмечено еще в середине прошлого века на Паужетских гидротермах Камчатки [Паужетские...1965]

Это говорит о том, что растворения свободных внешних газов как процесса - не было, а газы оказались в горячей воде по иной причине, и её надо найти.

Известно, что при очень высоких параметрах  $P$  (давления) и  $T$  (температуры) вода существует в форме (фазе), которая называется сверхкритическим состоянием (сверхкритика) или водным флюидом [Кочетков, Федотов 2016; Арсанова 2019, 2020 и др. работы]. Свойства флюида отличаются от таковых и горячей воды и пара. И прежде всего: флюид хорошо растворяет газы и хорошо смешивается со всеми флюидами и жидкостями.

**Примечание 2.** Флюид – физ. термин, обозначающие фазовое состояние вещества, и в данной работе даётся в этом значении. В геол. текстах - используются, но означают текучее, подвижное вещество любого состава (вода, нефть).

**Примечание 3.** В русском языке слово «вода» означает и вещество, и его жидкую фазу. Значение вытекает из текста. Для однозначности жидкая фаза воды иногда даётся как вода<sub>ж</sub>, а вода как вещество – как вода<sub>в</sub>.

С падением  $P$  и/или  $T$  водный флюид становится 2-х фазной средой и превращается в воду<sub>ж</sub> и/или пар с газами.

Так как вода<sub>ж</sub> и газы возникают одновременно, они оказываются тонко перемешанными уже при рождении, а «разбежаться» из-за изоляции каналов они не могут. Само превращение флюида - не одновременно. Поэтому в охлаждающейся смеси воды<sub>ж</sub> и пара какое-то время, судя по всему, находится еще и сам флюид.

Основанием такого предположения служит свойство воды как вещества. Вода обладает метастабильностью и у неё очень высокая теплоемкость, что даёт ей возможность какое-то время одновременно сосуществовать в соседних фазах и медленно «согласовывать» своё состояние с параметрами окружающей среды. Это свойство можно наблюдать весной в паводок, когда сосуществуют лёд, вода<sub>ж</sub> и пар. В данном случае в смеси сосуществуют три высокотемпературные фазы воды.

Поэтому свободные газы горячей воды есть следствие превращений флюида при остывании.

Факт сосуществования горячей воды и газов говорит о двух моментах: об изоляции канала подъема и о флюидном состоянии воды у «старта» потока.

Углекислый газ. В поверхностных условиях он становится свободным и уходит в атмосферу, но может, при наличии подходящей структуры, раствориться в окружающих, но холодных метеорных водах и создать холодные, низко минерализованные газифицирующие воды. При наличии подходящих форм рельефа (ловушек)  $\text{CO}_2$  может скопиться в атмосфере (он тяжелее воздуха) и вместе с  $\text{H}_2\text{S}$ , а также с  $\text{COS}$ ,  $\text{CS}_2$  проявить себя как отравляющий газ для животных и человека.

Сероводород. Присутствие сероводорода в паре объясняет возникновение на полях гейзеров или рядом с ними ярких цветных площадок гидротермально измененных пород и вторичных минералов. Сера сероводорода ( $\text{S}^{-2}$ ) химическим путём и с помощью микроорганизмов окисляется до элементарной серы ( $\text{S}$ ) и до серной кислоты ( $\text{S}^{+6}$ ). Последняя разлагает каркасные алюмосиликаты окружающих пород (андезиты, базальты, дациты и т.д.) до слоистых глин. Поверхность из каменистой превращается в рыхлую, глинистую, размываемую дождями, пёструю по цвету и минеральному составу. В раствор переводится множество различных породообразующих минералов, которые вступают в новые соединения и раскрашивают ими поверхность. Появление глин ведёт к возникновению грязевых котлов.

Со временем эти процессы меняют рельеф области разгрузки. Он выполаживается, и поверхность даже проседает, что можно наблюдать, например, - в кальдерах. Огромные размеры кальдер объясняются не только взрывами и обрушениями. Кристаллические породы подвергаются агрессивному химическому разложению. Вновь образованные компоненты подхватываются и перемещаются водными потоками как растворённые и взвешенные частицы (глины), а поверхность опускается, так как вещество уносится. Где-то, иногда достаточно далеко, встретив физико-химический барьер, они сбрасываются из воды и накапливаются, возможно, до объемов месторождений.

По-видимому, степень крутизны рельефа, где разгружаются гейзеры, говорит о возрасте самой гейзерной площадки. И в этой связи: Камчатская Долина Гейзеров моложе гейзеров Йеллоустона, Исландии и Новой Зеландии.

Таким образом, только сам факт наличия газов в природной горячей воде отрицает возможность возникновения гейзерной воды через нагрев холодных метеорных вод. Этот же факт свидетельствует о их начальном флюидном состоянии и подтверждает наличие относительной изоляции каналов.

**3.1.3. Минеральный состав гейзерных вод.** Гейзерная вода имеет уникальный, только ей свойственный состав, как по макро - так и, особенно, - по микрокомпонентам, отличный от состава не только метеорных вод, но и всех иных вод Земли. Причем состав, содержания и соотношения различных компонентов воды гейзеров из разных мест

имеют высокую схожесть при достаточно устойчивых физико-химических параметрах, что говорит о едином для всех них процессе образования.

Макрокомпоненты воды гейзеров Долины Гейзеров (Камчатка) в анионной части в основном представлены почти одними хлоридами щелочных металлов; обычно их >90% в анионной части воды и иногда до 98-99%. При этом отношение Na/K ~ 10; минерализация низкая - всего 1.5 – 2 и редко до 4 г/л.

Вода гейзеров Йеллоустона, Новой Зеландии, Исландии тоже в основном хлор-натровая, но с присутствием в составе до четверти гидрокарбонатов. Есть предположение, что количество гидрокарбонатов и сульфатов увеличивается с «возрастом» структуры [Арсанова 2014].

Возможность формирования хлор-натровых растворов низкой минерализации, как в природных условиях, так и в эксперименте, детально разбирались ранее [Арсанова 1974а, 1974б, 2014], и результаты позволяют утверждать, что наблюдаемый минеральный состав гейзерной воды не есть следствие контакта горячей воды как растворителя с вмещающими породами. Состав, подобный гейзерной воде, не возникает в экспериментах по выщелачиванию водой любых пород. Высокотемпературный прогрев водовмещающих пород в Природе (наблюдения при подземной газификации углей) также не приводит к превращению вод выщелачивания в такие растворы, причем отсутствует даже тенденция к этому [там же].

Ранние представления о хлоре, как извлечённом из седиментационных вод - в прошлом, и ныне хлор гейзерной воды всеми признаётся глубинным.

Еще более уникален микро компонентный состав гейзерных вод, как по набору, так и по высокому уровню содержаний. Он представлен Li, Rb, Cs, Be, Nb, Mo, Y, W, Cd, B, Tl, Pb, Sn, F, Br, I, P, As, Sb, Se, U, элементами группы лантанидов и этот список едва ли полный. Причём, содержания некоторых элементов настолько высоки, что воды представляют определённый интерес как источник их попутного извлечения на ГеоТЭС (препятствие - отсутствие подходящих методик).

Например, воды Паужетского гидротермального месторождения ежегодно сливают в Мировой океан порядка 2,5 тон цезия и 25 тон лития [Арсанова 2016]. (Мировая цена цезия - 40 € за грамм.)

Как известно еще со времен В. Вернадского, о генезисе природного раствора можно судить по характеру распределения в нём микроэлементов, если известна их геохимия (работы А. Виноградова, И. Рябчикова и других). Для гейзерной воды это можно сделать, используя многие выщепивённые элементы, но так как гидрогеохимия редких щелочей термальных вод уже изучалась ранее [Арсанова 1974б, 2013, 2014, 2016], можно остановиться на данных по Li, Rb, Cs.

Таблица 1 даёт представление о понятии «много-мало» в отношении этой группы элементов для разных природных сред.

Табл.1.

Содержания и отношения редких щелочных элементов в Земной коре и водах

			Li	Rb	Cs	Li:Rb:Cs	Cs/Rb
Среднее сод. в Земной коре		%	0,0032	0,015	0,00037	100:468:12	0,025
Гейзеры	Камчатка, Паужетка, гейзер 1 *	мг/л	3,55	0,24	0,43	100:7:12	1,7
	Камчатка, Дол. Гейзер., гейзер Великан*	мг/л	3,10	0,40	0,37	100:12,9:11,9	0,93
	Япония, Кюсю, ист. 7*	мг/л	4,05	0,48	0,71	100:12:18	1,47
	Новая Зеландия, Вайракей (по площади)	мг/л	9,7	2,1	1,8	100:20:19	0,86
	С.Америка, Йеллоустон. Верхний бассейн	мг/л	11,0	0,2	0,3	100:18:27	1,5
Речные воды (сред.) **		мг/л	0,0025	0,0015	0,00003	100:60:12	0,02
Река Москва*		мг/л	0,0009	0,0011	0,000025	100:130:3	0,02
Морские воды (сред.)**		мг/л	0,180	0,120	0,0003	100:67:0,16	0,003
Юж.-Абинская ст. подзем. газификации углей *		мг/л	0,22	0,145	<0,0001	100:07:<0,05	<0,007
		мг/л	0,12	0,0054	<0,00005	100:05:<0,04	<0,009
Воды над пегматитами***		мг/л	0,0006	0,002		100:330	
Сред. в подземных водах зон выщелачивания ****		мг/л	0,0062	0,0018	0,00018	100:290:29	0,1
Техногенно-трансформен. воды Вост. Забайкалья, интервал колебаний*****		мг/л	0,258 0,004	0,043 0,0008	0,012 0,00005		

\*Данные автора. \*\*Савенко 1997. \*\*\* Кольский п-о среднее по нескольким авторам. \*\*\*\*Шварцев 1998. \*\*\*\*\*Чечель 2020.

Анализ содержаний редких щелочей одновременно с их условным отношением Li:Rb:Cs (где Li по массе принят за 100) показал, что эти данные

можно использовать как генетическую индикаторную метку. Их колебания позволяют судить о процессах, в которых участвует вода.

Гейзерные воды разных районов мира стабильно выносят очень много редких щелочных элементов, особенно цезия. Их содержания на воду (в форме мг/л) составляют первые единицы по литию и несколько десятых мг по рубидию и цезию. Выше их - только содержания в горячих рассолах и термальных углекислых водах областей недавнего вулканизма, которые генетически связаны с гейзерными водами [Арсанова 2014]. Однако в форме процентного содержания на минеральную часть гейзерные воды остаются чемпионами среди всех вод Земли. Содержания Cs в % на мин. часть гейзерной воды составляет 0,017- 0,024 %. В то время как, например, для горячего рассола Солтон Си (сев. Америка) содержание Cs в % на мин. часть - 0,007% (при содержании на воду - 20 мг/л).

Отношение Li:Rb:Cs гейзерных вод достаточно стабильно и в среднем равно 100:13:14. Для Камчатских вод: 100:10:9.

Li, Rb и Cs относятся к редким элементам в Земной коре, а рубидий и цезий еще и к рассеянным. Все они могут в микро количествах извлекаться из пород, но уровень их накопления в водах выщелачивания очень низок, как в случае выщелачивания пород с фоновым их содержанием, так и в водах над пегматитами и в техногенно-трансформированных водах полиметаллических месторождений. (В последнем случае, как указание на их источник, подмечено одновременное увеличение солёности и кислотности растворов [Чечель 2020].)

Минералы - поставщики в природные растворы цезия - не известны. В концентрированном виде Cs в коре существует в виде минерала поллуцита. Поллуцит не только редок, но представляет собой самую устойчивую форму иммобилизации цезия. В искусственный поллуцит связывают радиоактивный нуклид Cs 137 для предотвращения загрязнения. Форвардная скорость выщелачивания из него Cs водой при 90°C оказалась ниже  $1 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>2</sup>·сут. [Кузнецов, Богданов 2010]. То есть ожидать повышенных концентраций цезия в водах как выщелоченного из природной кристаллической фазы - не приходится.

Анализ отношения Li:Rb:Cs в разных природных средах [Арсанова 1974б, 2013] показывает, что в природном растворе при выщелачивании относительно накапливается только литий, а рубидий и особенно - цезий раствор покидают, сорбируясь на глинистых минералах. Поэтому относительно «свежие» растворы выщелачивания наследуют породное отношение Li:Rb:Cs (при содержаниях на три и более порядка меньше их содержаний в гейзерной воде!), а воды, успевшие «побегать» в коре, еще и относительно обедняются цезием. Это связано с тем, что цезий ведёт себя как самый слабый водный мигрант по сравнению с другими щелочными элементами.

Тем не менее, очень редко скважины вскрывают горячие растворы с высокой концентрацией всех редких щелочей: сотни мг/л лития и рубидия и до 20 мг/л цезия (Солтон си). Однако в их отношении Li:Rb:Cs по сравнению с гейзерной водой все-

гда меньше число цезия. Меньше и процентное содержание Cs на минеральную часть. Поэтому из горячего рассола гейзерную воду разбавлением получить не удастся. А допустить получение горячего рассола из низко минерализованного гейзерного природного раствора путем испарения растворителя - можно.

Гейзерные воды представляют большой интерес для геологов, изучающих рудообразование, как первые кандидаты на роль эндогенных гидротермальных рудообразующих растворов, о чем говорилось ранее [Арсанова 2016].

Таким образом, исследование природных растворов, мигрирующих среди кристаллических пород, показывают, что существуют определённые геохимические препятствия к накоплению в них редких щелочей при относительном накоплении цезия. До уровня гейзерных вод они далеко не дотягивают ни по уровню, ни по отношению.

Отсюда вывод: гейзерная вода не может возникнуть как результат длительного транзита метеорной воды по холодным или горячим породам любых составов. Какими бы породами ни оказались сложены области питания формирующихся вод, они не в состоянии обеспечить высокий уровень редких щелочей, фактически присутствующих в гейзерных водах. Такие факторы как обильные атмосферные осадки и высокая проницаемость разломных зон и вулканитов не объясняют их специфического состава: ни минерального, ни газового.

Гейзерная вода не может быть следствием разбавления горячих рассолов или смешения различных природных вод, или результатом выпадения в осадок (очистки) из растворов каких-то компонентов.

То есть генезис гейзерной воды - не есть история растворителя, длительно взаимодействующего с кристаллическими породами. Раствором эта вода становится в ходе иных превращений.

Выше было показано, что наличие газов в гейзерной воде говорит о её начальном флюидном состоянии. Существование начального флюидного состояния объясняет и минеральную составляющую гейзерной воды. В горячую жидкую воду превращается водный флюид, сразу же со всеми компонентами, включающими и редкие щелочные элементы. И уже далее начинается история этой воды как раствора.

Итак, механизмы формирования минеральной составляющей гейзерной воды и метеорных вод, циркулирующих в коре, - принципиально различны.

Минеральная составляющая вод, контактирующих с кристаллическими породами, действительно набирается по мере их движения, но редкие щелочные элементы таким путём не концентрируются до уровня гейзерных вод.

Минеральная составляющая гейзерных вод рождается одновременно с самим растворителем как наследуемая минеральная составляющая водного флюида. Поэтому эти воды, будучи из разных мест, столь похожи.

**3.1.4. О кремнеземе и каналах.** Характерным признаком разгрузки кипящих гейзерных вод является отложение на выходе вод минерала гейзерита. Уровень кремнезема в воде достигает 7-9 сотен мг/л в  $H_2SiO_3$ .

Известно, что растворимость кремнезема в воде и паре тем больше, чем выше их плотность. Следовательно, на больших глубинах вода во всех своих формах может содержать еще больше кремнезема. Максимум его растворимости фиксируется вблизи Критической точки воды. С падением параметров давления и температуры (что неизбежно с подъемом) количество кремнезема, который может удерживаться в воде в разных её формах, - падает, и  $SiO_2$  начинает сбрасываться в окружающее пространство вокруг водного потока, что ведёт к окремнению вмещающих пород.

Явление было показано в эксперименте [Рычкова 2019, Кирюхин и др.2020.] Следствием является самоизоляция поднимающегося водного потока от окружающей среды. (Относительная самоизоляция является отличительной чертой диссипативных структур.)

Изоляция касается и теплопотерь. Из теплотехники известно, что отложения диоксида кремния толщиной всего 0,1 мм снижают теплообмен на 5%, а здесь его достаточно много.

Кучное расположение гейзеров на поверхности позволяет судить о «дизайне» подводящего канала (или - жилы) как о некой зоне близко расположенных относительно мелких каналов. Последние представляют собой как бы отдельные нити единой жилы, или отдельные «макаронины» «пачки макарон». Земная поверхность «срезает» эту жилу, и возникает площадка с гейзерами. Каждая «макаронина» сложена диоксидом кремния и гидротермально измененными породами, среди которых немало глин, что вкуче изолирует канал. Движение по осевой части поддерживает и увеличивает проницаемость каналов. Вмещающие породы коры секутся этой протяженной субвертикальной жилой, и пока есть целостность стенок, гейзерная вода из вмещающих пород практически ничего не получает.

С течением временем, из-за синхронизации колебаний мелкие каналы объединяются в более крупные. Поэтому «молодые» гейзерные структуры состоят из множества относительно малых гейзеров, а «старые» - из крупных. По этому признаку Камчатская Долина Гейзеров - это относительно молодая структура. (Её возраст определяют  $\approx 10-40$  тыс. лет.) А Исландские и Новозеландские - относительно старые; несколько сотен тысяч лет.

Можно предполагать, что когда через многие-много лет вода покинет структуру, в коре (после перекристаллизации) останутся области (полости, зоны и т.п.) окремнелых пород с сетью кварцевых жил, включающих гидротермальные минералы. Они будут трассировать путь бывшего горячего водного потока, и вероятно в связи с этой «дорогой» образуется цепочка гидротермальных рудопроявлений и месторождений. Гидротермальные руды и рудопроявления, как известно, всегда связаны с кварцевыми жилами.

И в этом профессиональный интерес геологов-рудознатцев к веществу и динамике гейзерных вод.

**3.1.5. Об изотопном составе элементов воды.** К настоящему времени изотопных характеристик для глубинных вод - не выявлено [Мартынова и др. 2013]. Тем не менее, распространено мнение, что только одно сходство изотопных составов элементов вод метеорных и горячих, включая гейзерные, есть доказательство метеорного происхождения гидротерм. Данные по изотопам воды гейзеров действительно хорошо «ложатся» на линию метеорных вод.

Однако, на самом деле, - выявлено только сходство.

Посчитать, что одно это сходство есть доказательство метеорного происхождения гейзерных вод - значит допустить логическую ошибку, которая называется «подмена понятий», правда - довольно распространенную.

Логическими называют ошибки в рассуждении. Они возникают из-за нарушения логической правильности умозаключений, когда один предмет нечаянно (или намерено), но всегда незаметно подменяется другим (см. например [Уемов 1958]).

Сходство изотопных составов водорода и кислорода метеорной и гейзерных вод есть факт. Неоднозначны геологические выводы из этого факта.

Ошибкой будет подмена однозначностью факта неоднозначности геологического вывода.

Из факта сходства изотопных составов вытекает как минимум три варианта геологических выводов:

1) метеорные воды - это бывшие глубинные (эндогенные, ювенильные) воды;

2) глубинные воды - это нагретые метеорные воды;

3) и метеорные и глубинные воды сходны по изотопам, как следствие конвергенции, или по иным причинам (однойцевые близнецы - похожи, но один из другого не происходит).

Как говорил в выступлении лауреат премии Абея за 2014 год математик Я. Г. Синай, правильное решение похоже на разгаданный кроссворд: должно быть совпадение по горизонтали и вертикали.

Едва ли кто-то примет за доллар купюру только потому, что она зелёная. Для выбора правдоподобного варианта из спектра возможных требуются дополнительные данные. Например, есть две фотографии очень похожих людей. Можно предположить, что они родственники, но кто из них сын, отец или брат можно сказать, только зная их относительное время рождения.

Поэтому только одно сходство изотопных составов еще недостаточно для утверждения того - какая вода, из какой произошла. Будучи единственными данными, они «кроссворда не разгадывают», так как могут различно трактоваться в зависимости от других данных.

В данном случае, с учётом дополнительных данных, более вероятен первый вариант. На Земную поверхность действительно постоянно посту-

пает новая вода, а часть поверхностной воды планеты покидает, о чём детальной см. [Арсанова 2014, с. 45].

**3.1.6. О температуре, тепле, и смешении природных вод.** Извергаясь, вода гейзеров - кипит. Неоднократно подмечено на различных гейзерных площадках мира, что температура кипения на поверхности определяется местным атмосферным давлением (к этому вернёмся 3.1.9.).

Камчатская долина Гейзеров располагается на высоте 350-550м над уровнем моря, и самая высокая замеренная температура гейзерной воды составляет 98°C. (На каждые 300м высоты температура кипения падает приблизительно на один градус).

Йеллоустонский Национальный парк располагается в среднем на высоте 2400м, и среднюю температуру гейзерной воды определяют как 93°C.

Высокогорные гейзеры Эль-Татио в Андах на севере Чили извергаются на высоте 4320 м, и их вода кипит при 85°C.

Замеренная глубинным датчиком температура воды гейзера Old Faithful на 21метре от поверхности оказалась равной 130°C.

Температура воды гейзера Великан на Камчатке на глубине 7м, тоже замеренная датчиком, составляет 108°C. [Дрознин и др. 1999]

Уже ниже 100-200 метров от поверхности гейзерные структуры имеют T выше 200°C (Камчатка, Паужетка), и до 350°C (Йеллоустон).

Очень велика тепловая мощность, так как высок дебит источников:>100-300л/с. Тепловая мощность Паужетских гидротерм оценивается в 104 мВт, Долины Гейзеров - 321 мВт [Действующие вулканы Камчатки 1991].

То, что источником тепла воды является вулканическое тепло, ни у кого сомнения не вызывает. Разногласия между исследователями заключаются в способе выноса этого тепла на поверхность: имели место нагрев холодных вод о горячие глубинные тела, или сама вода целиком является эндогенной, глубинной, ювенильной?

Может быть - холодная вода смешивается с горячей водой или паром и представляет собой смесь воды разных температур или фазовых состояний?

Среди гидрогеологов, работающих в области вулканологии, традиционно принято считать, что горячие породы районов активного вулканизма являются областями теплового питания для циркулирующих в них холодных вод.

Однако, еще в прошлом веке сопоставление фактического количества выносимого тепла и того, которое могут отдать породы, показало, что фактически выносимого тепла слишком много. Чтобы оставаться в рамках гипотезы нагрева вод о породы и при этом «свести концы с концами» В. Аверьеву [1966] пришлось изыскивать дополнительный источник тепла.

По его предположению, не менее четверти общего выноса тепла должно вкладываться глубинным водным эндогенным веществом. Но это, в свою очередь, требует объяснения механизма сме-

шения среди пород двух водных генетически различных составляющих, находящихся в разных физико-химических состояниях, что само по себе есть проблема (о смешении как геологическом механизме - ниже).

Валерий Аверьев - один из самых талантливых и уважаемых исследователей гидротерм Камчатки - вне сомнения разобрался бы с этими противоречиями, но авиакатастрофа оборвала его жизнь в 39 лет.

Физики и философы считают, что гипотеза, претендующая на правдоподобность, должна лежать в рамках определенного, детерминированного поля возможностей [Князева, Курдюмов 1994].

По гипотезе нагрева холодной воды вещество с очень низкой теплопроводностью (а это породы) определили на роль теплоносителя, а веществу с огромной теплоемкостью (а это вода) предписали нагреваться о них до высокой температуры, причём - в динамике. Но в природных процессах роли объектов не только адекватны их свойствам, - они всегда энергетически и физически подогнаны. По физическим свойствам эффективней воде нести тепло и нагревать вмещающие породы, а породам - удерживать наведённое водой тепло.

Кто кого греет? Вот в чём вопрос!

Определиться здесь очень важно и теоретически и для практики. От этого зависят прогнозные оценки, что связано с финансированием работ. Отдавая должное последнему, нельзя забывать, что «покорить природу можно только повинаясь ее законам» (Френсис Бэкон), поэтому стратегически полезней согласиться с Сократом: «...истина дороже!»

Как механизмы и нагревание, и смешение вод разных температур наблюдаются по жизни ежедневно; их возможность применительно к природным водам кажется очевидной. Разница в том, что в быту, как и в лаборатории, смешиваются воды (растворы) близкого физико-химического состояния, ограниченные ёмкостью и принудительно перемешиваемые. Что очень отличается от процессов в Природе!

С большой степенью достоверности можно сказать, что механизм нагрева воды о породы не подходит для объяснения высокой температуры воды гейзеров. Тем более, что нагревать надо в динамике и выше флюидного состояния.

С поверхности на глубину в породы по трещинам и слоям холодная вода пойдёт самотёком под действием сил гравитации. Но погружаться по горячим породам ей удастся не глубже, чем до своего первого фазового перехода. Далее пар ринется вверх, возникнет зона просушки, барьер для проникновения холодных вод, и движение станет.

Статичный объем холодной воды среди горячих пород вне сомнения нагреется через какое-то достаточно длительное время, если его не тревожить. Но необходимым условием эффективности теплового питания текущих потоков является высокая скорость теплопередачи в месте теплообмена, большая площадь области теплообмена и «правиль-

ная конструкция» из вмещающих пород для организации потока. Реальные породы нужными для этого свойствами - не обладают.

Флюидное состояние воды наступает при еще более высоких, параметрах, чем кипение (374°C и 218 атм.). Такие условия в нижней коре есть. Но вода может туда поступить только снизу из области еще более высокой плотности энергий. Теплопередача и кондуктивным и конвективным способом, как величина векторная, по законам теплофизики направлена от больших значений к меньшим. В область высоких давлений и температур из области более низких давлений и температур вода не может идти самотёком. По этой причине добраться самопроизвольно до таких глубин с поверхности холодным водам «не дозволено».

Даже, если вода в связанном виде присутствует в составе пород, то и тогда, прежде их нагрева и плавления в ходе погружения, произойдёт переход воды из связанного состояния в свободное, и рассеяние воды в виде пара.

Процесс **смешения** контактирующих вод в Природе, как показывает опыт наблюдений, сам по себе (без сторонней, «третьей» силы) тоже не идёт, даже если разные воды оказались в прямом непосредственном контакте - как горизонтальном, так и вертикальном. Достаточно взглянуть на границы морей в проливах, на океанские течения, места слияния рек и т.п. Не смешиваются, например, теплые воды Гольфстрима со своими водными «берегами», воды Атлантического океана и Средиземного моря в Гибралтарском проливе, воды Красного моря и Индийского океана в Баб-эль-Мандебском проливе и т.д. Под прямым углом, но каждая своим «этажом», пересекаются речки Велна и Нельба вблизи г. Вонгровец. (см.фото в Интернете)

Журнал National Geographic провёл киносъемку океанских курильщиков и показал, что извергнутый материал «протыкает» океанскую толщу «кинжальной» струей, а на поверхности закручивается в плоский диск. Диск отрывается и движется по поверхности океанской воды, долго с ней не смешиваясь. В конце концов, он разбивается волнами (сторонняя сила).

Пар с холодной водой не смешивается (есть граница раздела). Чтобы они всё-таки смешались – нужна ограничивающая ёмкость, перемешивание и время.

В Природе находятся в контакте, но не смешиваются воды разных температур, разной солёности. Например, горячие воды Красного моря. Причина - в различных физико-химических состояниях вод.

Даже во временных подпрудных озёрах в Долине Гейзеров, где со дна поднималась вода залитых гейзеров, и, казалось бы, созданы условия для хорошего перемешивания, температура воды по вертикали оказалась разной [Рычкова 2019]

Физический смысл невозможности смешения вод, находящихся в разных физико-химических состояниях, можно понять по аналогии из примера. Люди, стоящие на платформе, не могут поговорить с людьми в проносающемся поезде (у них разные скорости), но они могут пообщаться (смешаться),

стоя на одной платформе или находясь в одном купе (скорости одинаковы).

Смешение в Природе – процесс неочевидный и обусловленный. Голословное объяснение физико-химического состояния природной воды (её изотопного состава, температуры и т.п.) следствием смешения каких-то других природных вод, без анализа возможности такого механизма в конкретном месте - доказательной силы не имеет. Требуется показать, что смешение действительно идёт и разные воды не просто есть (лежат, текут) рядом, а еще и перемешиваются.

**3.1.7. Локализация гейзеров.** Чтобы понять природу воды важно изучить место, где она выходит на поверхность. Гейзерные площадки – исключительная принадлежность районов активного вулканизма.

Связь высокотемпературных гидротермальных систем с долгоживущими вулканическими центрами и кислым вулканизмом подмечена уже давно [Эрлих, Мелекесцев 1973, Леонов 1989 и др.]. По наблюдениям гидротермальные поля приурочены к районам кислого вулканизма и ассоциируются с вулканотектоническими депрессиями и кальдерами. Возникают они или в самой кальдере или на её внешних склонах.

Казалось бы, если стоять на традиционных позициях возникновения гидротерм через нагрев холодных вод о магматические тела, то гидротермам уместней возникать где-нибудь рядом с действующими активными вулканами. Там относительно недалеко могут находиться высокотемпературные магмы и лавы текут даже по поверхности. Но там они не наблюдаются.

По гипотезе нагрева вод глубинным источником тепла предполагается существование неглубоко залегающих внедрившихся магматических тел. Отдавая своё тепло холодной воде, сами они на контакте должны остывать. Остывая, они «укутаются» кристаллизующимися породами. Низкая теплопроводность горных пород обеспечит высокий контраст температур, и даже тонкая стенка уберёжет тепло внутри. Поэтому сколько-нибудь длительно снимать тепло с поверхности остывающего силикатного тела холодной поверхностной воде не удастся.

Никакого поднимающегося горячего пара от внедрившегося магматического тела не может быть дольше первых пары дней. Его поверхность не будет испускать струй вещества наружу: для этого должно быть постоянное увеличение его внутреннего давления. В общем случае тепловое равновесие, согласно термодинамического принципа Ле Шателье, смещается в сторону ослабления воздействия, поэтому остывающие тела будут стараться сохранить «всё своё» внутри и не делиться ни теплом, ни веществом. Например, батолиты «капсулируются» поверхностной коркой, «запирая» тепло и вещество.

Иное дело вулкан. Действующий вулкан - это проточная геологическая структура. Он соединён

каналом с мантийным источником и с разной интенсивностью, но постоянно подпитывается горячим магматическим веществом.

По наблюдениям вулканы всегда имеют в своём составе воду, которая присутствует на всех этапах их жизни. Жидкая вода или пар в силикатном расплаве почти не растворяются, но коль скоро вода всегда наблюдается в вулканическом процессе, она там присутствует, и вулканам она зачем-то «нужна».

Ключ к пониманию многих вулканических явлений кроется в многочисленных и разнообразных качествах и свойствах высокотемпературных фаз воды [о чём детально Арсанова 2019, 2020]. Благодаря этим свойствам во многом обеспечивается подъем и эвакуация тяжелых силикатных расплавов, и последующее превращение их в породы разных типов. Поэтому вода так значима в вулканизме.

В вулканизме есть и другие газы, но по сравнению с водой их относительно мало. Главный газ вулканизма – это вода. Здесь она действует в трёх своих ипостасях – фазах: флюид, пар и жидкая вода, а также короткое время - в смеси соседних фаз. Разные геологические последствия наступают в зависимости от скорости смены фаз, что в свою очередь, зависит от скорости падения давления и температуры и сочетания этих параметров. Благодаря разным свойствам этих фаз, а так же их способности короткое время сосуществовать вместе перед фазовым переходом, происходят превращения тяжёлого силикатного расплава в более подвижный и лёгкий пористый и раздробленный материал, и его выброс или выдавливание. Остывая, он «сбрасывает» воду и становится вулканической породой.

Хотя параметры существования флюида как фазы воды очень высоки, на очень короткое время флюид может «задержаться» при нормальных РТ условиях. (Благодаря этому свойству воды мы успеваем выпить горячий чай на морозе.) По свойствам флюид, образно говоря, напоминает юркий, лёгкий и горячий кисель. Он во всё проникает, всё обволакивает, со всем смешивается и с лёгкостью объединяет разнородный материал в скользкий, летящий горячий поток.

Прямо из канала вулканической постройки, пока не остыл, водный флюид может просочиться сквозь рыхлый насыпной склон и обрушить его в виде оползня. Оползни разных размеров часто наблюдается на склонах вулканов перед взрывами.

Флюид может еще в канале, будучи в тонкой смеси с расплавом, снизить его вязкость, создав псевдооживленную массу, и быстро её переместить. Водный флюид – это вулканическая взрывчатка. Скопившись и одновременно превратившись в пар, он легко разносит вулканическую постройку. Вспенив расплав, выбрасывает его как пепел и/или пемзу. А на поверхности в тот момент, когда исследователь может взять его в руки, его уже нет; он испарился.

Все извержения начинаются с появления пара; затем обычно идут выбросы пепла, то есть материала, образующегося с участием воды. И только потом начинают извергаться магмы.

Вулкан, глубинные магмы которого имеют особенно много воды, проходит в своей геологической истории этап мощного взрыва с образованием палящих туч и кальдеры. (Ранее [Арсанова 2020б] предлагалось называть эту глубинную магму как магма-континуум, или магма-с.)

В кальдерную стадию вулкан продолжает выносить на поверхность эндогенное вещество. Но теперь оно представлено по составу одной водой, без расплава.

С этих позиций: гидротермальная гейзерная структура - это этап развития вулканической структуры, продолжающий вулканическое извержение водой.

Может быть, вулканическая постройка способна «принимать в себя» холодную воду из окружающих пород или из атмосферы, чтобы потом отдать её горячей?

Законы теплофизики однозначно говорят, что тепло в любом виде (и при конвективном и при кондуктивном диффузионном способе передачи) как векторная величина распространяется от горячего вулкана в направлении холодных вмещающих пород. Следовательно, для холодной воды действует запрет самотёком проникать в горячий материал. (Нужна большая внешняя сила, энергия, чтобы холодную воду сделать частью горячего расплава!)

Отсюда главный вывод:

*И тепло, и силикатный расплав, и сама вода имеют единый общий глубинный мантийный источник.*

Но в каком виде вода может существовать на столь больших глубинах Земли?

**3.1.8. О воде больших глубин.** Согласно данным Christoph J. Sahle et al. [2013] молекула воды неустойчива при слишком высоких параметрах РТ. Поэтому в нижних частях вулканического канала вся вода, или хотя бы – часть её, не может быть веществом с формулой  $H_2O$ . Там должны быть какие-то иные, «первичные» формы, «осколки», «частицы» будущих молекул воды. Об этом почти нет надёжных данных. Уверенно можно сказать только то, что на таких глубинах не может существовать вещество с формулой  $H_2O$ , но есть некий «строительный материал» для синтеза этой молекулы.

Как бы то ни было, но компоненты будущей воды должны быть частью магмы больших глубин – магмы-с. С подъемом магма-с непрерывно перестраивается и дифференцируется (разделяется в себе). Причина этого состоит в том, что меняющееся давление вынуждает вещество менять свою структуру.

Как самостоятельная субстанция, вещество с молекулой  $H_2O$  возникает, вероятно, на глубине порядка 5-10 км. (Исходя из Р, при которых существует водный флюид).

Отделение воды от силикатного расплава, скорее всего, происходит в состоянии водного флюида. (Другая форма воды при таких высоких параметрах РТ – не известна.)

«Родившийся» водный флюид включает компоненты, которые позже уже в канале и выше, как

газы разного состава, и минеральная составляющая гейзерной воды, поднимутся к поверхности.

Образовавшись, восходящий водный поток будет подниматься по вулканическому каналу. Но ближе к поверхности он прокладывает свой собственный путь, вписываясь и приспосабливаясь к внешней среде и используя для этого своё вещество и свою энергию. Он сам обеспечивает себе пространство для подъема и относительную (боковую) изоляцию этого пространства.

То есть глубинный восходящий поток горячей воды создаёт для своего подъема динамическую диссипативную систему, как скажут физики, или гейзерную геологическую структуру, как говорят геологи.

**3.1.9. Гидродинамика гейзерной воды.** Для обычных холодных, артезианских вод напор в гидросистеме зависит от перепада гидростатического давления в зонах водного питания и разгрузки. Поэтому скважины для добычи холодных вод часто задают в пониженных местах рельефа.

Но в случае гейзеров, как это было подмечено многими и уже давно, напор в системе по факту оказывается слишком высоким для его объяснения гидростатическим давлением [Аверьев1960].

Очевидно, что физические причины подъема горячих вод должны быть принципиально иными, нежели артезианских, а различие следует искать в состоянии вод.

В случае артезианских структур вода находится в единственной фазе: жидкая вода.

Гейзерная вода до самой поверхности представлена одновременно и водой и паром.

Ещё в 1841 году Бунзен первым предположил, что кипение гейзерной воды является декомпрессионным кипением.

В середине прошлого века геологи, работающие на Паужетском геотермальном месторождении Камчатки В. Аверьев, А. Нехорошев и В. Сугробов

пришли к выводу, что необходимым условием гейзерного режима извержения является существование у поверхности воды в перегретом состоянии с температурой свыше  $100^{\circ}\text{C}$ . По их мнению с началом фонтанирования гейзера вся вода в канале вскипает и извергается за счёт значительного увеличения объёма пароводяной смеси.

С этими авторами нельзя не согласиться, но вопрос о причинах цикличности гейзеров остаётся. Причина цикличности и фонтанирования должна быть общей.

Выше (3.1.6.) отмечалось, что температура кипения гейзеров разных районов Земли связана с местным атмосферным давлением. Наличие связи между температурой воды и давлением есть особенность всех гейзерных систем мира. Особенностью является и относительная изоляция гейзерных каналов.

Связь между температурой, и давлением изучена теплофизикой, и описывается стандартной диаграммой фазового состояния воды, которая показывает взаимосвязь трёх параметров:  $T$ ,  $P$  и фазового состояния.

Следовательно, принимая во внимание относительную изоляцию каналов, эту диаграмму правомерно привлекать для описания фазового состояния воды в ГГС.

Ниже (рис.1) приведен фрагмент фазовой диаграммы состояния воды по IAPWS (Международная ассоциация по изучению свойств воды).

Интересующий интервал температур и давлений описывается полями «сверхкритическая жидкость», «вода» и «пар» и фазовой линией между водой и паром.

Фазовая линия начинается с Критической точки воды. Состояние воды выше Критической точки определяется единственной фазой: сверхкритической жидкостью, или флюидом. Его также называют сверхкритический флюид воды, сверхкритика и обозначают как СКФ<sub>H<sub>2</sub>O</sub>.

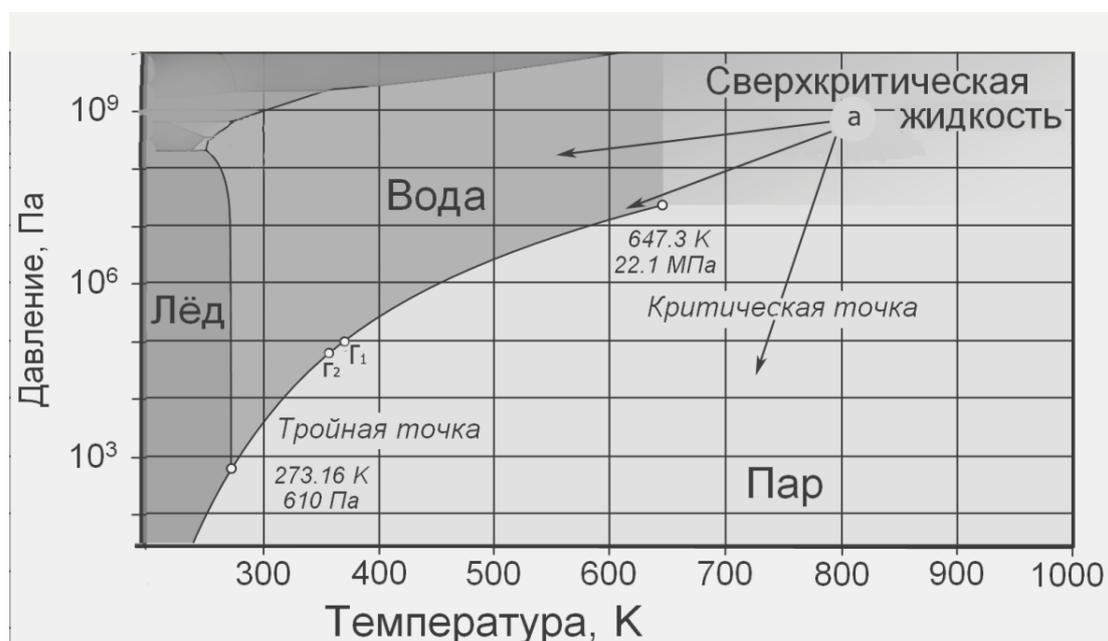


Рис.1. Фрагмент фазовой диаграммы состояния воды по IAPWS. Объяснения — в тексте.

Состояние воды на фазовой линии определяется двумя фазами воды (водой<sub>ж</sub> и паром). Участок фазовой линии, отвечающий кипению гейзерной воды при различном местном атмосферном давлении обозначен точками Г<sub>1</sub> и Г<sub>2</sub>, где первая соответствует Камчатским гейзерам, а вторая - гейзерам Эль-Татио.

Состояние гейзерной воды ниже этих точек диаграммой не описывается, так как пароводяная смесь покидает канал ГГС (уровень земной поверхности).

Природная гейзерная вода сложнее чистой воды: в её составе есть небольшое количество газов и минеральных веществ. Форма присутствия (будущих) газов в остывающей из флюида воде - не известна. Скорее всего, они пребывают в ней во флюидной фазе и в пар переходят постепенно. Поэтому с подъемом часть газов оказывается в паровой фазе, а часть – ещё останется в жидкой воде. Мелкие газовые пузырьки, иногда наблюдаемые где-нибудь у камней в гейзерных ваннах, по-видимому, представлены этим последним газом.

Газ в основном состоит из диоксида углерода.  $T_{кр} \text{ CO}_2$  равна 31°C, в то время как у чистой воды  $T_{кр} \text{ 374°C (647°K)}$ . Параметры смеси в первом приближении рассчитывают как среднее арифметическое компонентов. Поэтому  $T_{кр}$  гейзерной воды будет на несколько градусов ниже, чем  $T_{кр}$  чистой воды. По этой же причине температура кипения гейзерной воды тоже будет на несколько градусов ниже. Прямые замеры показали, что она на 3-6° ниже температуры кипения чистой воды при соответствующем давлении. [Рычкова 2019].

Из-за малости добавок общую направленность процессов они принципиально не меняют, но факт их присутствия есть указание на то, что гейзерная вода - остывает из флюидного состояния.

По этой же причине  $P_{кр}$  гейзерной воды будет несколько ниже 218 атм. (22 МПа). Такое давление соответствует ≈7-8 км глубины. «Подошва» ГГС должна быть где-то не выше этой глубины.

С подъемом воды<sub>в</sub> давление и температура в канале с неизбежностью должны снижаться, поэтому траектории фигуративных точек состояния воды<sub>в</sub> от точки «а» поля «сверхкритическая жидкость» расположатся в нижнем левом квадранте.

Рассмотрим возможные варианты. Их три. Два из них – верхняя и нижняя стрелки - показывают, что остывая, флюид превратится в жидкую воду (верхняя стрелка) или пар (нижняя стрелка), то есть в этих случаях состояние отвечает одной фазе воды.

Если же эволюция фазового состава воды<sub>в</sub> из флюидного состояния с подъемом пойдет по фазовой линии диаграммы, то пар и вода в канале будут присутствовать вместе до самой поверхности. И тогда на поверхности возникнут гейзеры. По-видимому, гейзерная комбинация параметров случается нечасто, оттого и гейзеры – явление редкое.

Но здесь возникает противоречие. С одной стороны давление в канале с неизбежностью связано с его «этажом». С другой – в случае гейзеров есть взаимосвязь трёх параметров: Т, Р и фазового состояния.

Как такое может совмещаться? Но de facto – совмещается.

В качестве объяснения можно предположить следующее:

Для вывода гидротермы с глубины на поверхность, из её же вещества «сооружается» канал нужной конструкции.

Особенность этого канала в том, что он состоит из пачки отдельных более тонких каналов, где по каждому такому малому каналу последовательно пакетами вода поступают в двух своих фазах: то вода, то пар. «Лёгкий» пар поднимает к поверхности «тяжелую» воду малыми порциями.

При таком способе в пределах всей колонны подъема давление снизу вверх действительно падает. В пределах отдельных пакетов локальное равновесие фаз, температур и давлений тоже соблюдается. Правда, равновесие здесь – мимолётно. Как только вода оказывается «этажом» выше, внешнее давление становится – ниже, и в пар перейдет чуть больше воды, и так до верха. Если по высоте колонны давление от пакета к пакету падает относительно постепенно, то в случае последнего пакета разность давлений с атмосферой может быть значительной. В результате больше воды<sub>ж</sub> перейдет в пар, и пар выбросит остатки воды фонтаном.

Похоже, что таким способом Природа «обходит» гидростатические нагрузки на всю структуру: вода поднимается с больших глубин, но конструкция при этом - не разрушается.

Такой способ подъема «тяжелой» жидкости на «лёгком» газе в технике известен и называется газлифтом. Способ реализуется при малых расходах (поэтому каналы должны быть относительно тонкими), а так же при последовательном снижении давления во всей конструкции снизу вверх от пакета к пакету, чтобы в пар могли поступать новые порции воды<sub>ж</sub>. При газлифте подъем пара опережает подъем жидкости.

Впервые этот способ подъема жидкости (нефти) на газе в скважине применил В.Шухов.

О газлифте как способе вывода на поверхность пароводяной смеси в СССР впервые заговорили в связи с разработкой Паужетского месторождения термальных вод на Камчатке. Одним из первых, кто его изучал применительно к механике извержений гейзеров, был В. Дрознин [1982] - физик, работавший в области вулканологии.

С целью понять динамику подъема тяжелых магм в вулканическом канале, вулканолог А.Озеров [2016] создал установку, моделирующую движение двухфазной смеси в протяженной вертикальной колонне (КАМБИ).

Стало очевидным, что для понимания механизма подъема горячих тяжелых природных жидкостей необходимо значительно больше знать о физических свойствах и характеристиках газлифта.

Ниже некоторые особенности газлифта по работам В.Дрознина [работа на правах рукописи].

Газлифт как способ:

- обеспечивает подъем без избыточного давления,

- работает только циклически;

- сохраняет свойства на всем протяжении канала, причем - как для всего канала, так и для любой его части.

Таким образом, дискретное с резким выбросом поступление на устье канала то воды, то пара, то есть периодичность фонтанирования гейзеров, объясняется свойством механизма подъема двухфазных сред, названного газлифтом, который реализуется автоколебательной диссипативной динамической системой, рождающейся в недрах вулканического канала, и получившей название гейзерной геологической структуры (ГГС).

Чаще случается так, что необходимое для возникновения гейзеров сочетания условий в коре – не реализуется, и к поверхности вода<sub>в</sub> поднимается или как пар или как жидкая вода.

Если  $e > T_{кр}$ , а флюидное состояние перестало быть из-за падения давления, (быстрый подъем с глубины, нижняя стрелка от точки «а» на диаграмме), то до поверхности поднимутся высоко-температурные парогазовые струи без воды<sub>ж</sub> (поле «пар» на диаграмме). Например: Верхне-Кошелевские парогазовые выходы (Т до 150° С и Р до 7-10 атм.).

Если же случилось так, что поднимаясь, водный флюид, будучи при достаточно высоком Р, меняет фазу из-за падения Т, то согласно диаграмме, фигуративная точка такой воды окажется в области «вода» (верхняя стрелка от точки «а»). Такое может случиться в канале «старой» остывающей вулканической структуры на глубине >7-8 км. Историю этой воды трудно предсказать. Возможно её захоронение и медленное упаривание до рассолов. Горячие и тёплые рассолы действительно изредка вскрываются скважинами. Возможен подъем до поверхности и излияние. Теплых вод малого дебита действительно много в областях недавнего вулканизма, и возможно их происхождение именно так.

Анализ диаграммы фазового состояния воды помогает в первом приближении понять особенности условий возникновения высокотемпературных напорных паровых струй, кипящих и тёплых вод, гейзеров. Но в Природе всё сложнее: с разной скоростью идёт подъем вулканического вещества; состояние вещества отстает от новых параметров; Т и Р в канале падают с разной скоростью; среда, в которой идёт подъем, – неоднородна. Сочетания всего этого и последствия этих сочетаний требует соответствующего исследования.

Однако один вывод – вполне однозначен: не применим перенос методик, созданных в рамках одной системы, для объяснения закономерностей в другой системе.

Так еще в прошлом веке, зная фактическое содержание CO<sub>2</sub> и гидрокарбонатов гейзерной воды и принимая содержание углекислоты в воде в пластовых условиях в виде свободной CO<sub>2</sub> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, В.Аверьев [1960] рассчитал значение концентрации водородного иона (рН) так, как это делалось для артезианских вод. Расчетное значение оказалось максимум 6.5 (рН), в то время как фактически замерен-

ное значение было более 8. Расхождение рассчитанной и непосредственно замеренной величин концентрации водородного иона оказалось более, чем на полтора порядка, что тогда вызвало большое удивление. Причина в том, что метод, созданный для артезианских систем, не применим в случае ГГС.

На этом же основании нельзя применять к гейзерным полям косвенные способы определения глубинных температур, созданные для случая артезианских вод и т.п.

#### 4. Концептуальная модель гейзерной геологической структуры

...не рискуя, мы рискуем в сто раз больше.

Марк Аврелий

Философы говорят, что не факты, но концепции помогают понять мир, хотя концепции меняются, а факты - остаются.

Настоящая смысловая модель ГГС дается как рабочая гипотеза. Каждое достаточно сложное научное высказывание всегда - временно, но оно важно для целенаправленного сбора фактического материала, подтверждающего, уточняющего или порочащего его.

Невозможность объяснения явления гейзеров через нагрев метеорных вод потребовала поиска иных причин их излияния на поверхность. Сравнительный системный анализ свойств, качеств и особенностей гейзерных вод позволил предложить новую концепцию, в которой сама вода гейзеров обретает своё геологическое место и роль как продукт вулканизма:

\* Вода есть вещество постоянно присутствующее в вулканическом процессе, включая время между пароксизмами. По наличию пара над кратером часто судят об активности вулкана. Вулканический расплав всегда поступает вместе с тем или иным количеством воды. Расплав строит тело вулкана и остается на поверхности в виде лав, и потому они достаточно изучены. Вода же участвует в создании вулканических пород и явлений, но еще горячей покидает «поле боя». Поэтому её роль недостаточно изучена и осознана. Не исключено, что без воды силикатный расплав не имел бы достаточной мобильности для извержений.

\* Вода существует в составе глубинных магм (магмы-с) изначально, но не как вещество с формулой H<sub>2</sub>O, а в виде компонентов (?), из которых она позже синтезируется. Отдельным веществом она становится, скорее всего, при подъеме в канале в результате дифференциации магмы-с на глубине порядка 5-10 км. Дифференцироваться магму-с вынуждают меняющиеся при подъеме условия, при которых её прежнее состояние последовательно оказывается неустойчивым.

\* Дифференциаты магмы-с представляют собой две (как минимум) отдельные жидкости: водную (в фазе флюида) и силикатный расплав, которые далее сосуществуют и взаимодействуют.

\* По способу возникновения расплав с флюидом тонко перемешены, то есть представляют собой смесь. Функциональные свойства и возможно-

сти этой смеси очень велики. Они определяют большинство вулканических явления и типов пород. Как именно они проявятся - зависит от параметров среды, скорости перепада Р и Т и сочетания всего этого.

\* Вулканы, имеющие высокое содержание компонентов воды в составе своей магмы-с, в последние этапы свой жизни извергают только один водный флюид без расплава. Для этого в недрах вулканического канала самозарождается новая диссипативная система - гейзерная геологическая структура (ГГС).

\* Действующая ГГС, по-видимому, представляет собой протяженную (километры) зону, близкую к вертикальной, с началом (подошвой) в вулканическом канале, с диаметром порядка сотни метров, секущую породы, но вписывающуюся в ослабленные зоны.

\* Собственно канал ГГС представляет собой пачку более мелких каналов, похожих на связку трубо- и щелеобразных полостей (типа «пачки макарон»), в «муфтах» из диоксида кремния и гидротермально измененных вмещающих пород, которые обеспечивают относительную (боковую) изоляцию каналов.

\* Подъем воды осуществляется паром по отдельным мелким каналам способом газлифт, то есть циклически. Возникают автоколебания. Они согласуют работу системы. На поверхность вода поступает в виде пакетов перегретой воды, перемежающихся пакетами насыщенного пара.

\* Содержимое каждой трубообразной полости (малого канала) колеблется в своем ритме. Со временем ритмы синхронизируются, и некоторые полости объединяются в более крупные полости-каналы. На поверхности это выражается в том, что одни гейзеры становятся мощнее, а другие – пропадают совсем.

\* Величина и мощь гейзеров, а также крутизна склонов зон разгрузки, и уровень гидрокарбонатов и сульфатов в составе, судя по всему, говорят о возрасте ГГС.

\* Газлифт и автоколебания в системе будут существовать, пока поступающей энергии будет достаточно, чтобы до самой поверхности вода могла оставаться в двух фазах.

\* Затем система должна эволюционировать в гидротерму другого типа, с меньшим теплосодержанием, и иным составом [Арсанова 2014].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С расширением наших представлений о гидротермах Земли приходит осознание того, что формирование их состава и способа подъема обеспечиваются не только и не сколько спектром различных независимых друг от друга сил, инициирующих процессы, меняющих вещество и создающих структуры. По-видимому, большинство геологических структур, возникает само по себе в результате самоорганизации как диссипативные динамические системы. Их динамика определяется свойствами их собственного вещества. Таких структур - много, они вложены друг в друга, эволюционируют и развиваются по своим правилам.

Гейзерная геологическая структура именно такова.

### Список литературы

1. Аверьев В. В. Особенности динамики пароводяных скважин // Тр. лаб. вулканологии «Новейший вулканизм и гидротермы». 1960. вып. 18. С. 113-122.
2. Аверьев В.В. Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью // Современный вулканизм. М.: Наука, 1966. С. 118-128.
3. Арсанова Г. И. К вопросу о происхождении перегретых хлоридно-натриевых вод молодых вулканических областей. В кн. Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма». Новосибирск. Наука. 1974 а. С.14-21. <http://repo.kscnet.ru/3083/>.
4. Арсанова Г.И. Редкие щёлочи в термальных водах вулканических областей. Новосибирск, «Наука», 1974б. 111с. Эл. вар. 2-ред. 2009. <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1181535>
5. Арсанова, Г. И. К геохимии цезия: источник цезия в термальных водах и кислых вулкаников [Электронный ресурс] // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2013. Т. 4. Вып. 1: Система планета Земля — Стационарный сетевой адрес: 2227-9490e-aprovgr\_e-ast4-1.2013.23
6. Арсанова Г.И. Происхождение термальных вод вулканических областей.// Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С.44-58.
7. Арсанова, Г. И. Цезий как индикатор ювенильного флюида и многофункциональность флюида. Электронное научное издание Альманах Пространство и Время.2016 Т.11. Вып.1.Система планета Земля.
8. Арсанова, Г. И. Роль воды в вулканизме. //Вулканология и сейсмология. 2019, № 4. С.69–80. <http://repo.kscnet.ru/3962/>
9. Арсанова Г.И. Сверхкритическое состояние воды как причина вулканических явлений. //The scientific heritage. 2020a. No.45. Vol.2. P.7-17.
10. Арсанова Г.И. Вулкан как глубинная геологическая структура.//The scientific heritage. 2020б. No. 50. С.16-24.
11. Действующие вулканы Камчатки. Т.1. М.: Наука, 1991.
12. Дрознин В.А. К теории действия гейзеров // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5. С. 49-60.
13. Дрознин В.А., Бахтияров В.Ф., Левин В.Е. Измерения температуры в ванне гейзера Великан (Долина Гейзеров, Камчатка). //Вулканология и сейсмология. 1999 №1. С.46-53.
14. Дрознин В.А (на правах рукописи). Механика извержений. [dva.@kscnet.ru](mailto:dva.@kscnet.ru)
15. Кирюхин А.В. Рычкова Т.В. Дубинина Е.О. Анализ гидрогеологического режима гидротермальной системы Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск Камчатский, 2013. С. 312-326.

16. Кирюхин А. В., Рычкова Т. В., Сергеева А. В. Моделирование условий формирования проницаемых каналов гейзеров в районах кислого вулканизма. //Вулканология и сейсмология. 2020. № 2. С.3–16.
17. Князева Е.Н. Курдюмов С.П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М. Наука. 1994. 236 с.
18. Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. //Труды вып. 379. М. Наука. 1983. 216 с.
19. Кочетков А.В., Федотов П.В. Фазовая диаграмма воды // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. Том 8. №4 <http://naukovedenie.ru/PDF/38TVN416.pdf>
20. Кузнецов Р.А., Богданов Р.В. Ядерно-химические аспекты захоронения концентратов радиоактивных отходов в земной коре //Вестник СПбГУ. 2010. Сер. 4. Вып. 3. С.126—130.
21. Леонов В. Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989.
22. Мартынова, М. А., Хаустов, В. В., Диденков, Ю. Н. Ювенильные воды. // Пространство и Время. 2013. № 1(11). С. 132—139.
23. Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С. К теории гейзерного процесса // ДАН. 1970. Т.194, №2. С 318-321.
24. Озеров А. Ю. Динамика эруптивной деятельности, эволюция магм и модели базальтовых извержений (на примере Ключевского вул.). Дисс. на соис.уч.ст.док.г.-м.н. 2016. М. 410с.
25. Паужетские горячие воды на Камчатке. Москва. Наука. 1965. 208 с.
26. Рычкова Т. В. Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки). Дис.-канд. г.-мин. н., Петропавловск-Камчатский. 2019. 165с. <http://crust.ru/images/upload/newsfull184/2106.pdf>
27. Савенко В.С. Биофильность химических элементов и ее отражение в химии океана //Вест. МГУ, сер. 5, геогр. 1997. №1. С. 3-7.
28. Уемов А.И. Логические ошибки. М. 1958. 120 с.
29. Устинова Т.И. Камчатские гейзеры. 1955. <http://www.kscnet.ru/ivs/publication/ustinova/predislov.htm>
30. Харкевич А.А. Автоколебания. М. Гос. Изд. Техн. Теор. лит. 1954. 171с.
31. Чечель Л.П. Распределение редких щелочных элементов в водах горнорудных объектов восточного Забайкалья. //Геосферные исследования.2020. № 4. С. 98–107
32. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М. Недра, 1998. 366 с.
33. Эрлих Э.Н., Мелекесцев И.В. Четвертичный кислый вулканизм западной части Тихоокеанского кольца // Кислый вулканизм. Новосибирск: Наука. 1973. С. 4-39.
34. Christoph J. Sahle, Christian Sternemann, Christian Schmidt, Susi Lehtola, Sandro Jahn, Laura Simonelli, Simo Huotari, Mikko Hakala, Tuomas Pyllkänen, Alexander Nyrow, Kolja Mende, Metin Tolan, Keijo Hämäläinen, and Max Wilke. Microscopic structure of water at elevated pressures and temperatures. 2013. Proc Natl Acad Sci. USA 110:6301–6306.