

УДК 550.42.47:551.214

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ ОЗЕРА КАРЫМСКОГО И ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ КАЛЬДЕРЫ АКАДЕМИИ НАУК ЗА ПЕРИОД 1996-2015 ГГ.

А.Г. Николаева, Г.А. Карпов, Д.Ю. Кузьмин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006 г.
Петропавловск-Камчатский, e-mail: ocean@kscnet.ru*

Прослежен процесс ощелачивания водной массы озера Карымского со времени произошедших в нем катастрофических событий 1996 г. Выделены две характерные группы компонентов, поведение которых характеризуют гидрохимическую эволюцию воды в озере: простое экспоненциальное сокращение SO_4 , Ca, Mg и медленное – Cl, Na, K. Показаны некоторые изменения в солевом составе термальных источников, разгружающихся по берегам озера. Отмечены признаки угасания участка гидротермальной системы, образованной в 1996 г. в северной части озера.

Введение

Карымское озеро расположено в кальдере Академии Наук (рис. 1), являющейся структурной единицей Карымского вулканического центра, характеризующегося высокой сейсмической, вулканической и тектонической активностью [2].

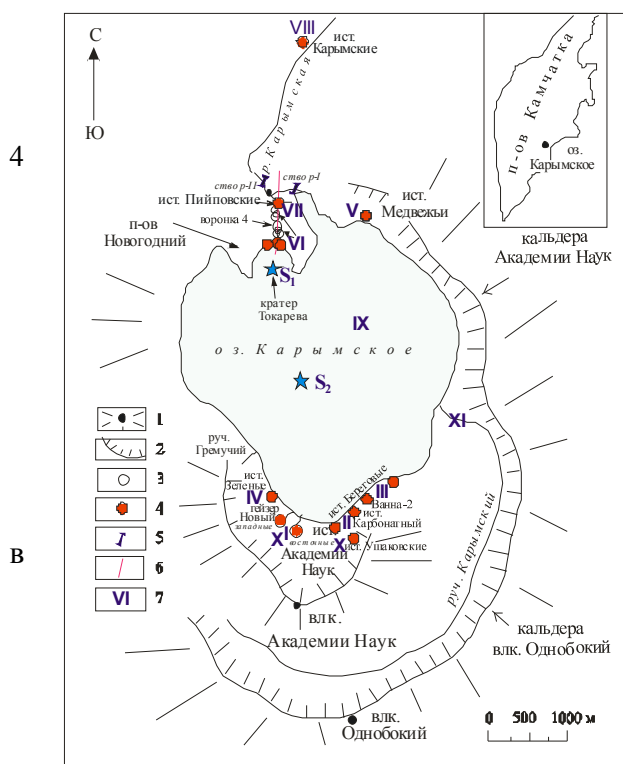


Рис. 1. Схема расположения кальдеры Академии Наук. 1 – вулканические постройки; 2 – кальдеры; 3 – воронки (просадочные и взрывные); 4 – термальные источники; 5 – гидрологические створы в истоке р. Карымской; 6 – направление разрыва 1996 г.; 7 – номера гидрохимических групп вод. На врезке – карта Камчатки с районом работ.

Озеро имеет вулканическое происхождение. Главной отличительной чертой таких озер в своем большинстве может являться наличие их балансе (в той или иной степени) эндогенного тепла и вещества, поступающих из глубин Земли, которые существенным образом могут влиять на гидродинамические и гидрохимические процессы в озерной воде.

Поступление эндогенного тепла и вещества как раз и произошло в процессе подводного фреато-магматического извержения в северной части Карымского озера (1996 г.), что привело к существенным изменениям в химическом со-

ставе озерной воды. Одновременно с извержением в озере происходило извержение из близрасположенного Карымского вулкана [8, 14].

Химическое состояние водной толщи озера и термальных источников, разгружающихся в его обрамлении, изучались после катастрофического события 1996 г. [15, 1, 13, 4, 5, 9, 10].

В настоящей работе показана динамика изменения солевого состава водной толщи Карымского озера и термальных источников кальдеры Академии Наук на протяжении двух десятков лет со времени извержения в озере в 1996 г.

Методика исследований

В течение двух десятков лет с разной степенью детальности проводились режимные наблюдения за химическим составом озерной, термальных, холодных и для фона – дождевых вод кальдеры Академии Наук. Гидрохимическим опробованием была охвачена вся территория кальдеры.

Основным методом исследований являлся комплексный гидрогеохимический мониторинг бассейна Карымского озера, проводившийся большей частью в летнее время, начиная с 1998 г. по 2014 г., за исключением некоторых перерывов.

С помощью оборудованного лебедкой катамарана, с 2000 г. опробовались две режимные станции: S_1 – в центре кратера Токарева и S_2 – в центре акватории озера со стандартных горизонтов: 0-10-20-30-40-50-60 м.

При исследовании химического состава водотоков в обрамлении Карымского озера проводились полевые измерения: $T^{\circ}C$, рН и электропроводности воды “in situ”. Пробы спонтанного газа в источниках отбирались методом вытеснения в стеклянные бутылки. Дебит и расход воды источников и реки определялся посредством объемного и поплавкового метода.

На макроэлементный состав водные пробы отбирались в пластмассовые чистые бутылки емкостью 0.5 или 1.5 л, а на микроэлементный состав - в полиэтиленовые пробирки емкостью 20 (40) мл предварительно отфильтрованные на месте через мембранный фильтр 0.45 мкм. Перед герметизацией пробы воды на анализ микроэлементов подкислялась 0.2 мл 72% HNO_3 “Merk”.

Полные гидрохимические анализы водных проб выполнялись в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН с использованием стандартных методик. Содержание микроэлементов в водных пробах выполнялись с помощью метода ICP-MS в Московском государственном университете.

Основные результаты исследований

1. *Изменения в солевом составе озерной воды.* В результате извержения (1996 г.), помимо изверженного вулканогенного материала в озеро поступило огромное количество растворенных газов и химических компонентов. Это привело к резкой смене состава озерной воды с пресной (рН=7.28) на кислую (рН=3.2) [14, 13, 3]. Она была хорошо перемешана. Минерализация воды в озере достигала 1 г/л.

В составе озерной воды сразу же после извержения 1996 г. минерализация воды достигала 1 г/л. В ней возрос ряд химических элементов (Na, K, Mg, Cl, F, B, Si, S, Fe, Zn, Ni, Mn, Cu, Al и Sr [3]. По общепринятой гидрохимической классификации вода Карымского озера относилась к SO_4 классу (с заметной примесью Cl) и Cl- SO_4 – Na-Ca типу воды (в порядке возрастания их концентраций), который долгие годы сохранялся в озере.

К 1998 г. наметились слабые признаки стратификации в воде по гидрохимическим параметрам. С 2000 г. в озере стал наблюдаться слабый тренд восстановления химического состава.

К 2001 г. стала фиксироваться стратификация воды по общему солевому составу, и наметился слабый тренд его распреснения. В озерной воде отмечалось заметное снижение минерализации (примерно до глубин 40 м) и содержаний Mg, Ca, SO_4 , H_4SiO_4 . Но, это мало коснулось придонных вод водоема. Концентрации химических элементов в них все еще оставались высокими, а в кратере Токарева тем более, с глубиной отмечался даже их рост на 1/3.

Предполагалось, что за период полного цикла смены воды в горном озере, составляющем около 8-10 лет, должно произойти восстановление озерной воды к исходному состоянию (как в 1984 г.). Но, этого не произошло. Наоборот, происходило тянущееся во времени постепенное ощелачивание озерной воды и монотонное повышение pH.

Было отмечено, что в озерной воде, снижение концентраций таких химических элементов как Ca, Mg, SO_4 происходит быстрее, а других (Na, K, Cl) – медленнее.

На треугольных диаграммах Пайпера показан длительный путь эволюции солевого состава воды Карымского озера на протяжении 1996-2015 гг. (рис. 2).

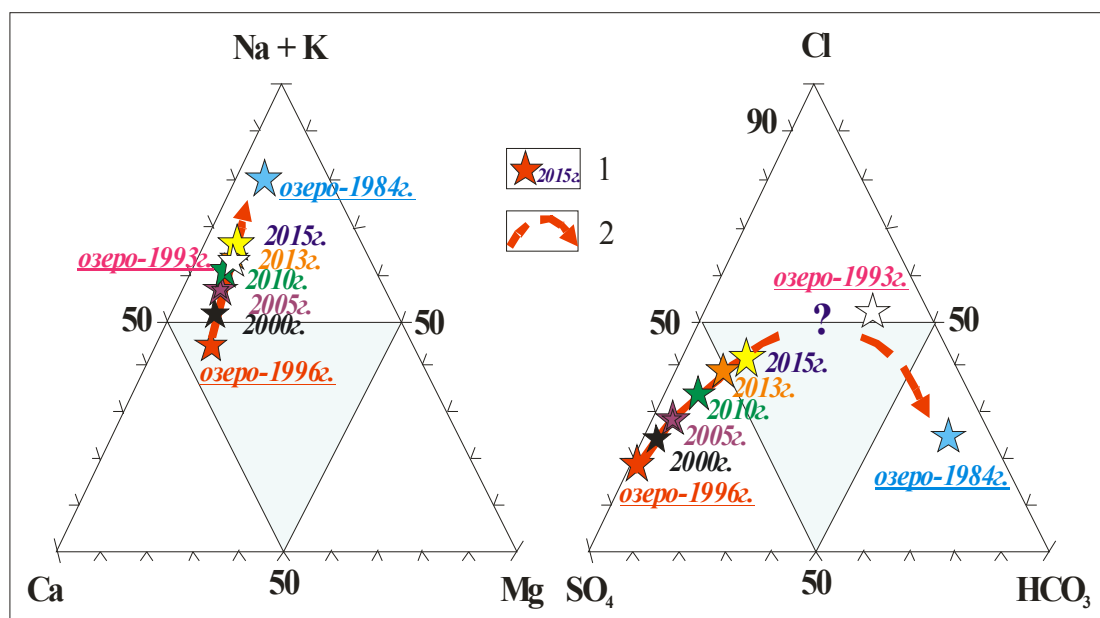


Рис. 2. Диаграмма эволюции солевого состава воды Карымского озера (1984-2015 гг.). 1 – точки отбора проб по годам; 2 – фактически пройденный и предполагаемый тренд возвращения солевого состава воды озера к исходному состоянию (1996 г.).

Спустя почти двух десятилетий озерная вода вступила лишь в начальную фазу интенсивного перемешивания водной массы. Общая минерализация в ней по данным наблюдений на станциях S_1 и S_2 уменьшилась почти вдвое, а концентрации солевого состава сократились в среднем в следующем порядке: Ca, Mg и SO_4 в более, чем в 4 раза; Na и K – в 3 раза, Cl – в 2.

В истоках р. Карымская рН приобрел почти первоначальное значение – 7.2 против 7.28 в 1984 г. (рис. 3). Близки этому значению поверхностные воды озера и кратера. К тому же и в глубинных водах отмечается неукоснительное приближение рН к нейтральным значениям (средние значения рН воды составляли 6.3-6.5).

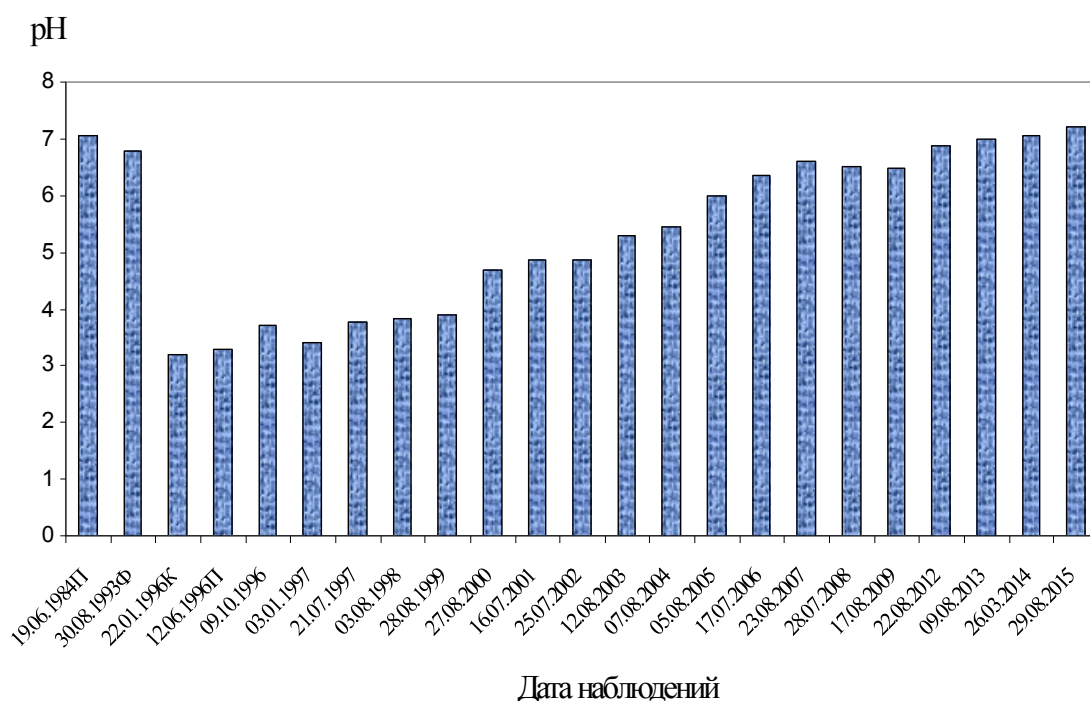


Рис. 3. График рН в истоках р. Карымской (1984-2015 гг.).

В 2012 г. цвет воды в озере поменялся с бирюзово-синего (со времени извержения в нем в 1996 г.) на зеленовато-серый, что связывается с существенным уменьшением в его химическом составе SO_4 .

Наметившийся прогресс ошелачивания озерной воды, возможно, пойдет значительно быстрее (максимум в 5 лет), если не произойдет сильной активизации со стороны близрасположенного к кальдере Карымского вулкана или каких-либо др. катаклизмов.

2. *Изменения в солевом составе термальных источников кальдеры Академии Наук.* До извержения в кальдере Академии Наук существовало два очага разгрузки термальных источников – явный, на южном берегу Карымского озера (мааре вулкана Академии Наук), и, скрытый, маловыраженный у северного берега озера [12, 11]. В связи с событиями в озере 1996 г. возник и третий очаг, самый мощный, в истоках реки Карымской.

В летнее время 1996-1997 гг. Е.А. Вакиным и Г.Ф. Пилипенко [1] проводились гидрохимические исследования по береговой окружности озера с целью обнаружения новых термопроявлений.

По итогам исследований ими были выделены гидрохимические типы вод согласно классификации В.И. Кононова, подразделяющиеся на группы. Первые два типа – термальные источники в береговой зоне кальдеры, третий – термальные источники Карымские в смежной кальдере Карымской и четвертый – вода озера (см. рис. 1):

1) Тип 1 – углекисло-азотные, щелочные (рН до 9.2) Cl–Na термы с минерализацией до 1.5 г/л и температурой до 100°C, приуроченные к молодой эксплозивной воронке полуразрушенной постройки вулкана Академии Наук. По температуре и характеру разгрузки гидротермы данного типа подобны к водам высокотемпературных гидротермальных систем, таких как Узон-Гейзерной, Паужетской, но с меньшей минерализацией. Этот тип вод объединял пять групп источников (I-V) в Ю-Ю-В части кальдеры.

2) Тип 2 - азотно-углекислые (газонасыщенные CO₂, N₂, CH₄, H₂) воды сложного ионного состава Cl(SO₄)-SO₄(Cl) / Na-Ca-Mg на п-ове Новогоднем (новые ист. Пийповские, Пляжные и Провальный). Это газонасыщенные (CO₂, N₂, CH₄, H₂) близнейтральные (рН=6.5) термы с минерализацией до 1.4 г/л, гидрохимических аналогов которых на Камчатке не имелось за исключением некоторой схожести с термами кальдеры-вулкана Ксудаач (Камчатка). К данному типу относились две группы вод (VI и VII).

3) Тип 3 – углекислые (CO₂), сульфатно-гидрокарбонатные (гидрокарбонатно-сульфатные) магниевые SO₄(HCO₃)-HCO₃(SO₄)/Mg-Na(Ca), слабокислые и нейтральные Карымские термы, которые периодически отбирались нами для сравнения, но, специальных исследований там нами не проводилось (VIII).

4) Тип 4 – самостоятельный тип воды, возникший в Карымском озере в связи с извержением в нем в (1996 г.), имевший кислую реакцию (рН=3.2) и Cl-SO₄/Na-Ca состав воды, который нельзя было объяснить простым подмешиванием вод первого и второго типов (IX).

Все указанные типы термальных вод формировались в зависимости от степени разбавления их метеорными водами, магматогенным флюидом и глубины взаимодействия смешанных вод с вмещающими породами.

В последующие годы, вплоть до 2015 г., нами был продолжен ряд гидрохимических наблюдений за всеми термопроявлениями в кальдере Академии Наук.

Нами выделены еще две группы вод в кальдере – кислые (рН≥3) SO₄ – Na-Ca растворы водно-грязевых котлов (группа X), распространенные в южной части озера и нейтральная вода холодных ручьев HCO₃-Cl(SO₄) – Ca-Na, питающихся атмосферными осадками.

Для наглядности и выяснения эволюции основного солевого состава все гидрохимические группы вод в кальдере были вынесены на катионно-анионные диаграммы Пайпера (рис. 4).

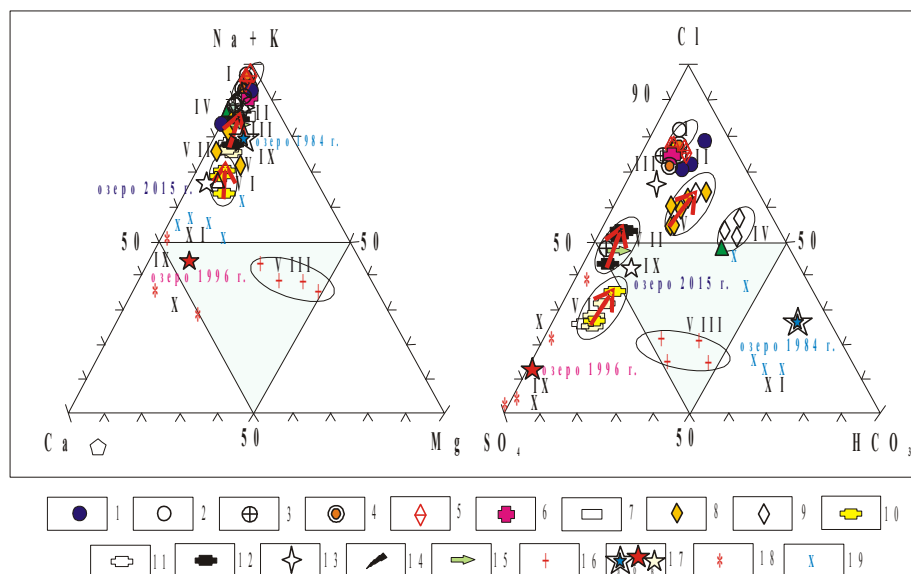


Рис. 4. Диаграмма эволюции солевого состава воды термальных источников кальдеры Академии Наук (1984-2015 гг.). 1-4 – ист. Академии Наук (гидрохимическая группа I); 5,6 – ист. Трехголовый (ист. Береговые-2) (II); 7 – ист. Сердитый (Береговые-1) (III); 8 – ист. Зеленые (IV); 9 – ист. Медвежьи (V); 10,11 – ист. Пляжные (VI); 12-15 – группа ист. Пийповские; 16 – ист. Карымские (VIII); 17 – вода оз. Карымское (а-1984 г., б-1996 г., в-2015 г.) (IX); 18 – водно-грязевые котлы (X); 19 – холодные ручьи (XI).

Можно сказать, что выделенная упомянутыми выше авторами типизация термальных вод, разгружающихся по берегам Карымского озера, в основном, сохранила свою выдержанность во времени. Однако в группах вод произошли немаловажные преобразования следующего характера: значительно понизилась температура в некоторых из них, общая минерализация и дебит, сократились площади их распространения.

В химическом составе источников Академии Наук (группа I) значимых изменений не произошло, за исключением лишь некоторых вариаций в составе ряда элементов (Na, Cl, SO₄, H₃BO₃). В режиме деятельности гейзера Новый, расположенного в западной группе ист. Академии Наук (группа I), наблюдались колебания во времени покоя между его извержениями и расходом воды. В близрасположенном к нему пульсирующем водно-грязевом котле Анна в последние годы (2012-2015 гг.) произошло изменение кислой среды (pH>3) на слабощелочную (pH=7.4-7.6), а также незначительное увеличение дебита (на 1-2 л/сек), что указывает на приток здесь глубинных Cl – Na вод.

В основном на изменения реагировали воды на периферии основной термоаномалии в южной части озера (группа II – IV). В них варьировали температуры, дебиты и незначительно элементы анионного состава. Особо выделялся здесь своим появлением в 1997 г. на берегу небольшого залива новый высокотемпературный (93.0°C) ист. Карбонатный, с общей минерализацией до 1 г/л и дебитом < 0.1 мг/л (группа III). От всех наблюдаемых здесь термопроявлений он отличался необычным составом Cl-HCO₃ – Ca-Na. По данным химического анализа в нем

было обнаружено повышенное содержание В и Si. В месте его выхода со временем сформировался панцирь кальцита.

В пляжной зоне Медвежьей группы источников (группа V), визуально наблюдаемая нами в 1997-2000 г. вытянутая полоса высачиваний термальных вод (протяженностью около 30-50 м) впоследствии стала частично замываться аккумулятивными наносами из озерной террасы I уровня. Температура этих источников сохранила свою выдержанность во времени (50-60 °С).

Значимые изменения коснулись термопроявлений на п-ове Новогоднем. Если сразу после катастрофы в озере 1996 г. здесь бурно проявлялась термальная деятельность, то к 2015 г. она сократилась в 4-5 раз. С 2012 г. не наблюдается никаких признаков разгрузки источников Пляжных, некогда разгружавшихся в северном обрамлении кратера Токарева. Температуры воды здесь фактически сравнялась с температурой поверхностной воды в подводном кратере (16-18 °С).

Обсуждение результатов

Причиной столь длительной гидрохимической эволюции озерной воды к исходному (до извержения 1996 г.) состоянию, на наш взгляд могло послужить: недостаточное перемешивание водных масс (всего два раза в год), отсутствие сильных ветров, способствующих интенсивному перемешиванию, поступление донных минерализованных растворов.

В гидрохимической эволюции Карымского озера, резко изменившего состав воды в связи с подводным извержением 1996 г. прослеживались две группы компонентов: 1) Ca и Mg и SO₄, 2) Na, K и Cl. Источники их поступления и поведение в озерной воде были различными.

Первая группа компонентов с добавлением какой-то части второй группы, появилась в воде озера в результате подводного извержения (1996 г) из растворенных магматических и гидротермальных газов (CO, HCl, HF, SO₂, H₂S, N₂, H₂, CH₄), а также в результате выщелачивания (особенно на первых порах) изверженного пирокластического материала. Затем, не имея постоянных или дополнительных источников поступления, их концентрации стали со временем (с 2000 г.) закономерно сокращаться путем естественного разбавления.

Вторая группа, помимо появления в озере вместе с первой группой в результате извержения, могла иметь какой-то дополнительный источник поступления за счет эманаций по трещинам и за счет подземного стока терм, сходных по составу с горячими водами источников Академии Наук. Этот источник мог появиться в результате произошедших накануне и в ходе извержения взаимосвязанных локальных процессов трещинообразования [Магуськин и др., 1997; Леонов, 1997], которые в какой-то мере нарушили проницаемость кровли гидротермальной системы под кальдерой Академии Наук. Эта группа вела себя иначе. Их содержание уменьшалось гораздо медленнее первой группы. Причем, содержания Na и K уменьшалось хотя и в замедленном темпе, но почти с одинаковой скоростью, чего нельзя сказать по отношению к Cl, где наблюдался буксующий эффект примерно до 2005 г.

В таком случае, очевидно, что первая группа компонентов (SO₄, Ca и Mg) была типична для кислых “фумарольных” терм, а вторая – “термальная” - для типичных термальных вод Cl

- На состава областей развития вулканогенных гидротермальных систем, таких как Узон-Гейзерная, Паужетская, Йеллоустонская и др.

Новообразованные и старые разгрузки Cl – Na состава, с невысокими значениями SO_4^{2-} , Ca и Mg являлись по [16] поставщиками в озеро порядка $0.14 \text{ м}^3/\text{сек}$ горячей Cl - Na воды, что почти в 3 раза было больше, чем до извержения 1996 г. Новообразованные в истоках р. Карымской термальные SO_4 -Cl – Na воды в начале отличались по своему химическому составу от издавна существующих в кальдере гидротерм, так как в первое время на их состав оказывали влияние кислые флюиды (H_2S , S^0), но затем в них стали увеличиваться концентрации хлоридов натрия.

Это предполагало присутствие в них растворов высокотемпературной геотермальной системы, функционирующей под дном кальдеры (или в недрах кальдерной постройки).

Заключение

Прекращение деятельности Пляжных источников, единичные выходы спонтанного газа в районе Пийповских источников и снижение их дебита, сокращение температурного поля и выравнивание в нем температурных значений, уменьшение минерализации воды в термальных источниках и в воде кратера Токарева, следует понимать как продолжение последовательного затухания новообразованной гидротермальной системы на полуострове Новогоднем. Причиной этому, возможно, является постепенное сжатие термовыводящей зоны субмеридионального направления, возникшей в 1996 г. по [Леонов, 1997; Магуськин и др., 1997].

Древняя гидротермальная система, расположенная в южной части озера, продолжает функционировать в прежнем режиме, хотя и с некоторыми вариациями в химическом составе водных растворов.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта CRDF Global – ДВО РАН (№ CRDF-14-006, RUG1-7086-РК-13).

Список литературы

1. Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4. С. 3-27.
2. Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М.: Наука, 1980. 300 с.
3. Карпов Г.А. Некоторые геохимические особенности подводного извержения в кальдере Академии Наук 2-3 января 1996 г. // Вестник Краунц. Серия науки о Земле. 2004. № 4. С. 81-89.
4. Карпов Г.А., Лупкина Е.Г., Николаева А.Г., Бычков А.Ю., Лапицкий С.А., Николаева И.Ю. Динамика изменения гидрогеохимических характеристик, теплового режима и биоценозов пресных и термальных вод бассейна озера Карымское после катастрофического подводного извержения 1996 г. в кальдере Академии Наук (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 17-31.
5. Карпов Г.А., Николаева А.Г., Лупкина Е.Г., Бортникова С.В., Ушаков С.В. Особенности гидрохимического и геохимического состава вещества бассейна озера Карымское в

- посткатастрофический период (1996-2005 гг.) / Сборник докладов по геофизическому мониторингу Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17-18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 207-217.
6. *Леонов В.Л.* Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержениями произошедшими в Карымском вулканическом центре 1-2 января 1996 года // *Вулканология и сейсмология* 1997. № 5. С. 113-129.
 7. *Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтиаров Б.Ф.* Деформации земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 5. С. 97-112.
 8. *Муравьев Я.Д., Федотов С.А., Будников В.А. и др.* Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 году: вершинное извержение Карымского вулкана и фреато-магматическое извержение в кальдере Академии Наук // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 5. С. 38-70.
 9. *Николаева А.Г., Карпов Г.А., Лупкина Е.Г., Ушаков С.В.* Эволюция солевого состава воды термальных источников и Карымского озера после извержения 1996 г. // Сборник докладов материалов ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога 30 марта – 1 апреля 2005 г., Петропавловск-Камчатский. 2005. С. 37-47.
 10. *Николаева А.Г., Карпов Г.А., Кузьмин Д.Ю.* Оценка изменения гидрогеохимического состояния озера Карымского и термальных источников в кальдере Академии Наук за период 2006-2012 гг. // Сборник докладов материалов ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога 28-29 марта 2013 г., Петропавловск-Камчатский. 2013. С. 336-343.
 11. *Пилипенко Г.Ф.* Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // *Вулканология и сейсмология*. 1989. № 6. С. 85-101.
 12. *Троицкий В.Д.* Краткий геоморфологический очерк района Карымского вулкана // *Тр. Камчатской вулканол. станции*. 1947. Вып. 3. С. 49-88.
 13. *Фаздуллин С.М., Ушаков С.В., Шувалов Р.А. и др.* Подводное извержение в кальдере Академии Наук (Камчатка) и его последствия: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические исследования // *Вулканология и сейсмология*. 2000. № 4. С. 19-32.
 14. *Федотов С.А.* Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучение и механизм // *Вулканология и сейсмология*. 1997. № 5. С. 3-38.
 15. *Karpov G.A., Muraviev Y.D., Shuvalov R.A. et al.* A subaqueous eruption from the caldera of Akademii Nauk volcano on January 2-3 1996 // *Newsletter of the IAVCEI Commition on Volcanic Lakes*. 1996. № 9. P. 14-17.
 16. *Yuri Taran, Salvatore Inguaggiato, Carlo Cardellini, Gennady Karpov.* Posteruption chemical evolution of a volcanic caldera lake: Karymsky lake, Kamchatka. *Geophysical research letters*, VOL. 40, 1-5, doi: 10.1002/grl.50961, 2013).