

Катастрофическая деформация и последующая эволюция высокотемпературной геотермальной системы, в как результате фреато-магматического извержения в Карымском кальдерном озере

УДК 551.23 (571.660)

Е.А. Вакин, Г.Ф. Пилипенко, ИВГиГ ДВО РАН

Опубликовано: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, [^](#) Петропавловск -Камчатский, 2001 г., 428с.; УДК 551.21+552+550.34

В терминальной части Карымского вулcano-магматического центра, в расположенных рядом кальдерах Карымской и Академии Наук, под воздействием близповерхностных магматических очагов сформировалась и длительное время функционирует высокотемпературная гидротермальная система, проявившаяся на поверхности в виде мощных термальных источников. Землетрясение и фреатическое извержение на дне кальдерного озера в 1996 г. привели к резким изменениям гидрохимического и теплового режима гидротермальной системы и озера. Активизировались существовавшие ранее источники и появились новые мощные выходы гидротерм. Массированная инъекция магматических и гидротермальных флюидов превратила озеро в бассейн кислой минеральной воды объемом ~500 млн. м³ - природный химический реактор, в котором перерабатываются продукты извержения, донные осадки и , материал, смытый с берегов.

В статье обсуждается генезис и эволюция состава термоминеральных вод и газов кальдер Академии Наук и Карымская, количественно оценивается их относительная роль в выносе и перераспределении тепла и растворенных веществ. Прослеживается динамика гидрохимических процессов, инициированных извержением. Сложившаяся обстановка сравнивается с существовавшей до извержения.

Введение

Современные гидротермы, всегда были объектом исследований, как агент выноса и перераспределения глубинного тепла и вещества, но механизм их связи с процессами, происходящими в магматических очагах, остается неопределенным. Благодаря синхронным извержениям в центре Карымской купольной структуры в 1996 году, впервые в вулканологической практике появилась возможность непосредственно наблюдать возникновение высокотемпературных и высокодебитных термоминеральных источников, как следствие конкретных сейсмических и магматогенных событий, и проследить их дальнейшую химическую и тепловую эволюцию.

Карымская купольная структура (Карымский вулканический центр, в дальнейшем - КВЦ) - одно из звеньев в средней части цепи вулcano-магматических центров, образующих Восточный вулканический пояс Камчатки. Она зародилась в узле пересечения систем трансформных разломов и развивается в течение 2 млн. лет с тенденцией центростремительного сокращения площадей проявления вулканической активности. Это пологий тектонический купол размером 40 x 50 км, свод которого осложнен разновозрастными кальдерными депрессиями и образованными в них стратовулканами. В терминальной, самой молодой, части Карымской структуры расположены две сближенные кальдеры: Академии Наук, заполненная озером, и Карымская, с одноименным действующим вулканом в центре. В этих кальдерах под воздействием близповерхностных магматических очагов сформировалась высокотемпературная геотермальная система, проявившаяся на поверхности в виде термальных источников: кипящих - *Академии Наук* и горячих углекислых - *Карымских*.

В начале января 1996 г. на дне озера в кальдере Академии Наук произошло мощное фреатомагматическое извержение. Одновременно в соседней кальдере началось обычное для вулкана Карымского эффузивно-эксплозивное извержение. Спусковым механизмом извержений послужило сильное землетрясение (магнитуда 6,9) с эпицентром всего в 15 км южнее озера. Гидрологический, гидрохимический и тепловой режим озера претерпел катастрофические изменения. На его берегах активизировались существовавшие ранее термальные источники и появились новые мощные выходы горячих вод. Значительно изменились и условия разгрузки Карымских источников. Подобных явлений в вулканологической хронике Камчатки не отмечено.

В данной статье предпринята попытка описать и количественно оценить наблюдаемые после извержения тепловые и гидрогеохимические феномены, соотнести их с конкретными проявлениями сейсмической и вулканической активности и

сопоставить с гидротермальными процессами, протекавшими здесь ранее.

История исследования

Несмотря смотря на удаленность от населенных пунктов и относительную недоступность, КВЦ в геологическом, геофизическом и вулканологическом отношении изучен значительно лучше других территорий Камчатки. Начало исследованиям было положено экспедицией В.И. Влодавца в 1938 г., давшей первые сведения о геологии, вулканизме и термопроявлениях района. Геологии и вулканизму КВЦ посвящены фундаментальные труды Б.В. Иванова и большой группы геологов под руководством Ю.П. Масуренкова. Ценнейший вклад в понимание глубинного строения КВЦ внесли многолетние сейсмологические и геодезические исследования (П.И. Токарев, М.А. Магуськин и др.).

Термальные источники в кальдерах Карымская и Академии Наук открыты в 1938 году экспедицией В.И. Влодавца [5], но в дальнейшем исследования гидротерм предпринимались редко и были скорее попутными, чем целенаправленными [10]. Лишь в 1984 г. Г.Ф. Пилипенко провела специальные исследования термальных вод кальдеры Карымская и термопроявлений в кальдере Академии Наук, предложила концептуальную модель Карымско-Академической высокотемпературной гидротермальной системы, определила ее энергетическую мощность [17]. Термальные источники в кальдере Академии Наук описаны также при гидрогеологической съемке масштаба 1:200000, выполненной в 1989 г. Камчатским территориальным геологическим управлением.

К моменту сейсмических и вулканических событий 1996 г. был накоплен большой объем знаний по геологическому строению, истории развития, вулканизму, магматизму, гидротермальной активности и сейсмике КВЦ. Исследования процессов извержения и землетрясения и их последствий проводились Институтом вулканологии. Результаты исследований опубликованы в серии статей в журнале "Вулканология и сейсмология" и других изданиях.

В 1996, 97, 99 и 2000 гг. авторы изучали гидрогеологические последствия извержений. В 1996 году было сделано детальное описание и составлены крупномасштабные схемы выходов гидротерм, как существовавших ранее, так и появившихся вновь. В последующие годы прослеживались изменения, происходящие на участках их разгрузки гидротерм. Каждый раз обследовались все термопроявления района, измерялись температуры и дебиты источников и водотоков, проводилось повторное гидро- и газохимическое опробование. По этим данным определены гидрогеохимическая специфика новых и старых групп гидротерм и их относительная роль в выносе тепла и вещества и формировании аномального гидрохимического стока.

Химический анализ водных проб выполнен в лаборатории Института вулканологии, хроматографический анализ газа - в Научно-исследовательском геотехнологическом центре и в Институте вулканической геологии и геохимии ДВО РАН.

Геологическое строение и история формирования КВЦ.

В геолого-структурном плане КВЦ представляет собой тектонический купол, осложненный в сводовой части кальдерными депрессиями и выросшими в них стратовулканами. Морфологически это дугообразный горный массив с отметками 500 --600 м., протянувшийся в субмеридиональном направлении на 50 км при ширине до 30 км. Над его поверхностью, рассеченной оврагами, долинами рек и уступами кальдер, возвышаются конусы действующих и останцы разрушенных вулканов. Кроме крупных, высотой до 1600 м, стратовулканов здесь множество других вулканических построек: шлаковых и лавовых конусов, и воронок взрывов - мааров, не редко заполненных озерами.

Геологический разрез купола полностью состоит из вулканогенных (эффузивных и пирокластических) и вулканогенно-осадочных (кальдерно-озерных) верхнеплиоцен-плейстоценовых отложений от кислого липаритового до основного базальтового состава. Это разнообразные туфы, игнимбриты, агломераты, пемзы, андезитовые и базальтовые лавы, липаритовые и дацитовые экструзивные тела. Характерной особенностью разреза является большое количество кальдерно-озерных отложений: алевриты, песчаники, гравелиты, пески. Основанием для этих образований служат отложения континентальных и прибрежно-морских и вулканогенных (в верхней части) фаций нижнеплиоценового возраста, мощностью до 1 км (шапинская и сторожевская свиты). Они несогласно залегают на пенепленизированном складчатом основании, сложенном кремнисто-вулканогенными, кремнисто-карбонатными, и вулканогенно-терригенными отложениями мел-палеогенового, и олигоцен-миоценового возраста [19]. Метаморфизованный верхнемеловой фундамент здесь приподнят и залегает на глубине ~3,5 км [18].

КВЦ, как звено в цепи подобных структур, составляющих Восточный вулканический пояс Камчатки, возник на пересечении регионального глубинного разлома с более древней системой крупных дислокаций трансформного направления. Земная кора здесь разорвана на всю глубину и на длительное время открыт путь для движения глубинного тепла и вещества к поверхности. Возникла многоэтажная система внутрикоровых магматических очагов. Крупный "промежуточный" магматический очаг диаметром ~30 км с центром давления на глубине ~ 18 км устанавливается вблизи нижней границы коры [25]. Из него (или сквозь него) магма поступает в близповерхностные очаги меньших размеров. Вторжение магм и образование внутрикоровых магматических очагов привело к общему куполовидному подъему поверхности, а игнимбритовые извержения - к частичному опустошению периферических очагов и образованию кальдерных депрессий в своде купола. Становление купола сопровождается развитием сложной системы линейных, дуговых и кольцевых разломов образовавших структуру "битой тарелки". КВЦ начал формироваться 2 млн. лет назад. В современном виде купольная структура образована, в основном, за счет накопления вулканогенного материала и, в меньшей степени, за счет общего подъема поверхности.

Вулканическая активность

Карымского центра имеет преорывный "ритмичный" характер: периоды интенсивных извержений сменяются периодами покоя. Установлено 4 таких ритма, каждый из которых начинался катастрофическими извержениями с выбросом сотен кубических километров кислого, обычно дацитового, пирокластического материала и образованием игнимбритовых покровов. За этим следует обрушение кровли частично опустошавшихся магматических очагов и образование кальдер. Кальдеры заполняются вулканогенными пирокластическими, флювиальными и озерными отложениями, внутри них начинается рост стратовулканов

андезито-базальтового состава. Далее вулканическая активность снижается. Извержения следующего ритма локализируются внутри построек предыдущего, происходит телескопическое вложение молодых структур в более древние [6].

На позднем этапе развития КВЦ, в конце верхнего плейстоцена -- голоцене, в его юго-западной части образовались две сближенные кальдеры: Академии Наук и Карымская. Расстояние между кальдерами всего 3 км, причём четких структурных границ между ними нет.

Кальдера Академии наук возникла на месте вулканов Однобокий и Академии Наук. По мнению Б.В. Иванова [9] и О.Б. Селянгина [19], они представляли собой единое вулканическое сооружение. Формирование кальдеры началось в начале верхнего плейстоцена 110-80¹⁴С тыс. лет назад (л.н.) после катастрофических извержений пирокластических потоков. Кальдерообразующие извержения продолжались десятки тысяч лет. В процессе извержений было выброшено от 8 до 10 км³ туфов и игнимбритов от андезитового до липаритового состава [6]. От вулканов Однобокий и Академии Наук сохранились только фрагменты их южных секторов. Кальдерная депрессия была заполнена озером, но вулканическая деятельность в ее пределах продолжалась. В позднем плейстоцене в южной части озера образовался крупный маар диаметром более 1 км. Уже в голоцене, 6500¹⁴С л.ет н.азад, у северного берега озера произошло извержение с образованием маара диаметром 0,8 -- 0,9 км [2]. По другим данным возраст этого ("туфового кольца") ~4800¹⁴С лет [1]. Одновременно сильное землетрясение, вызвало смещение крупного блока западного борта ущелья реки Карымская, перекрывшего сток из озера. В результате, уровень воды, судя по сохранившейся озерной террасе, поднялся на 80 - 85 м выше современного. Примечательно, что во время этого извержения выбрасывалась ювенильная тефра базальтового состава, аналогичная тефре извержения 1996 г., которое произошло в непосредственной близости [2].

Кальдера Карымская начала формироваться значительно позже - в раннем голоцене. Это небольшая, всего 5 x 6,5 км по верхней кромке, кальдера обрушения с хорошо выраженным уступом, образованная в теле вулкана пра-Карымский. На севере она срезает склоны вулкана Двор, а на юге не имеет четких границ. В кальдере расположен действующий вулкан Карымский, лавы которого перекрыли все дно кальдеры за исключением небольшого участка в юго-западной части - Термальной котловины. Кальдерообразующие извержения (типа Кракатау) начались на вулкане пра-Карымский около 7700 л.ет н.азад и продолжались ~200 лет [6]. За это время было выброшено от 4 до 6 км³ пирокластиков от липаритового до липарит-дацитового состава (пемзовые туфы пирокластических потоков, бомбы, лапилли, отложения палящих туч), что привело к обрушению центральной части вулканической постройки [9]. Далее наступил длительный, более 1000 лет, период ослабления вулканической активности и накопления в кальдере озерных и флювиальных отложений [6]. Судя по гидротермально измененным породам (каолинитам), наблюдающимся в эрозионных врезках юго-западного борта кальдеры, в раннем голоцене здесь открыто разгружались воды, подобные современным парогидротермам кальдеры Узон [16].

Около 5300¹⁴С л.ет н.азад в кальдере начался рост стратовулкана Карымский. Состав продуктов его извержений на самых начальных стадиях формирования отвечал андезито-базальтам, на последующих - андезито-дацитам. Высота конуса вулкана над дном кальдеры ~700 м, объемом ~0,8 км³. 5000¹⁴С лет назад в южной части кальдеры произошло одноактное извержение: образовался лавовый конус "Лагерный" с небольшим потоком андезито-базальтов.

На последних этапах формирования вулканического центра особую роль играет мощная субмеридиональная зона дизъюнктивных нарушений, пересекающая западную часть КВЦ [9]. Зона контролирует линейное расположение вулканов и кальдер - центров наиболее мощных проявлений кислого вулканизма в верхнем плейстоцене -- голоцене. Разломы имеют здесь глубокое заложение и являются магмовыводящими. В границах зоны последовательно во времени возникают близповерхностные "кальдерообразующие" магматические очаги. Субмеридиональная тектоническая зона продолжает активно развиваться, в особенности в средней части, на участке кальдер Карымская - Академии Наук, где фиксируется максимальная деформация (растяжение) поверхности [13]. "В осевой ее (зоны) части закладывается грабен протяженностью 15 км. Наиболее четко он проявлен на участке сближенных кальдер Академии наук и Карымской. Современная гидротермальная деятельность сосредоточена исключительно в пределах этого участка грабена." [Г.Ф. Пилипенко, 1989, стр. 88].

Гидротермальные системы.

Кальдеры Академии Наук и Карымская выделяются среди остальных структур КВЦ мощной современной гидротермальной активностью. В кальдере Академии Наук разгружаются высокотемпературные гидротермы и их менее горячие дериваты, а в кальдере Карымская расположен самый мощный на Камчатке очаг разгрузки углекислых терм. Считается, что эти источники являются поверхностными проявлениями крупной геотермальной системы, заключенной в кальдерных депрессиях].

Молодые кальдерные депрессии благоприятны для формирования гидротермальных систем. С гидрогеологической точки зрения это небольшие наложенные артезианские бассейны с трещинно-пластовыми или трещинными водными резервуарами в погружившихся блоках докальдерных вулканов и породах взрывного генезиса, заполняющих депрессии. Их инфильтрационное водное питание обеспечивается благодаря обильным атмосферным осадкам (на отметках ~600 м не менее 2000 мм/год), и высокой проницаемости кольцевых разломных зон и вулканитов, слагающих борта и склоны кальдер. Водоупорами, изолирующими артезианские резервуары от поверхностных и грунтовых вод, служат кратерно-озерные отложения и гидротермально-измененные породы. Водопроницаемость вулканогенных пород резко возрастает в зонах тектонической трещиноватости, которые играют роль основных, часто единственных, каналов миграции гидротерм. Общие представления о природе гидротермальной активности в кальдерах Карымская и Академии Наук были уточнены по данным, полученным путем исследования естественных термопроявлений. В кальдере Академии Наук до извержения 1996 г. основной участок разгрузки гидротерм находился на южном берегу озера. Здесь, на участке длиной более 1,5 км, наблюдались выходы термальных вод в виде мощных кипящих источников, источников с меньшими температурами, линейного высачивания в каменистом пляже, подводных выходов в прибрежной полосе. В зимнее время вдоль берега наблюдались длинные полыньи шириной до 50 м. Участок максимального прогрева с кипящими источниками и парящими площадками (собственно источники Академии Наук)

протягивался на ~250 м вдоль берега и на ~80 м вверх по склону. Самые мощные выходы термальных вод расположены на высоте 10 -- 12 м над уровнем озера, в 40-50 м от берега. Там на площади порядка 2000 м² насчитывалось до 50 кипящих грифонов и источников с температурой 80-98° С (здесь и далее температура в градусах Цельсия). Два из них работали в пульсирующем режиме и даже получили имена: гейзеры "Сердитый" и "Карлик" [10] . Вода источников собиралась в водоемах -"ваннах", образующих два каскада на ручьях, стекающих в озеро. Ванны большие (28 х 7 м и 15 х 7 м), глубокие (до 1,4 м) и необыкновенно красивые, заполненные прозрачайшей водой, с розовыми гейзеритовыми стенками и дном. В западной ванне из воронки в дне выбивал мощный пульсирующий грифон с температурой 98°, бросающий воду на высоту более метра. У верхней границы термальной площадки наблюдались выходы пара в виде участков парящего грунта, кипящих бессточных грязевых и водных (конденсатных) котлов. [10,17].

Гидрогеологи А.Л. Булыгин и О.В. Куницын во время съёмочных работ 1989 г. описали термальные источники с температурой 41-80° в 500 м восточнее ванн: "высачивание в травертинах" (?) на урезе воды озера (суммарный дебит 1,5 л/с) и "слабые выходы пара" на склоне на высоте ~40 м. над ними. Далее, в 1200 метрах, они обнаружили грязевой котел и высачивание из трещин с температурой до 87° и дебитом 0,3 л/с.

Опубликованные разными авторами анализы воды и свободного газа источников Академии Наук показывают, что по комплексу признаков они близки к водам, типичным для высокотемпературных гидротермальных систем [5, 10, 11]. Это углекисло-азотные хлоридно-натриевые воды с относительно низкой (~1,5 г/л) общей минерализацией. Такой состав имели бы гидротермы Долины гейзеров, вдвое разбавленные пресными водами [20]. Все без исключения анализы свободного газа источников Академии Наук обнаруживают высокое, до 24% объема, содержание кислорода, что является признаком подмешивания насыщенного кислородом воздуха холодных поверхностных вод. По N₂/O₂ отношению в равновесной с воздухом газовой смеси, растворенной в холодной воде (1,79), можно вычислить "воздушную" составляющую спонтанного газа. Выделяющийся при выходе гидротерм Академии Наук на поверхность газ, ~ на 50% состоит из воздуха, а его "глубинная" часть имеет типичный для высокотемпературных гидротерм состав: N₂ - 59, CO₂ - 36, CH₄ - 3,4, Ar - 1,0 % объема. В свободном газе отмечена повышенная концентрация Rn ~960 Бк/л [21], что также обычно для двухфазных (вода и пар) очагов разгрузки гидротерм. Источники Академии Наук выделяются очень высоким содержанием кремниевой кислоты (>0,3 г/л), это также свойство высокотемпературных гидротерм. Опаловые отложения кипящих источников - гейзериты распространяются далеко за пределы участков современной разгрузки источников Академии Наук. Под гейзеритами залегают грубообломочные туфобрекчии, сцементированные кремнеземом и гидроокислами железа. Такие "гидрохимические" брекчии встречаются в береговых обрывах по всему амфитеатру вулкана Академии Наук. Это прямое свидетельство очень продолжительной и существенно более мощной, чем современная, гидротермальной активности в южной части кальдеры. Расход источников Академии Наук в 1984 г., рассчитанный гидрохимическим методом, ~50 л/с, вынос тепла - ~20 МВт. [17]. Глубинная, "базовая" температура термального резервуара по показаниям гидрохимических геотермометров - 240-285°. Восходящие гидротермы здесь примерно на ~50% разбавлены инфильтрационными водами, а вскипание их смеси идеет на поверхности или на глубине всего несколько метров.

На северном берегу озера, в 1 км восточнее истока реки Карымская, на протяжении 200 м были отмечены признаки разгрузки термальных вод: полынья шириной до 50 м, свободная от снега сухая полоса песчаного пляжа шириной 3-7 м, струйки газовых пузырьков, идущие из песчаного дна. У истоков реки также наблюдалась обширная полынья в форме полукруга с радиусом около 100 м. [17]. Эти термоаномалии располагается в непосредственной близости от места извержения, происходившего здесь 6500 - 4700 л.ет н.азад [1, 2].

В кальдере Крымской в конце плейстоцена -- начале голоцена открыто разгружались парогидротермы, и обстановка здесь напоминала современную кальдеру Узон с горячими озерами, кипящими источниками и сольфатарными полями. Кальдерные отложения длительное время подвергались гидротермальной переработке. По мере роста в кальдере конуса вулкана условия разгрузки и инфильтрационного питания подземных термальных вод менялись. Выходы гидротерм были перекрыты лавами и "задавлены" холодными водами, накапливающимися в конусе вулкана.

Современные термопроявления сосредоточились в Термальной котловине, в юго-восточной части кальдеры, на единственном не перекрытом молодыми лавами участке ее дна площадью 2 км². Сюда же направлен сток термальных вод, разгружающихся под лавами современного вулкана, а также грунтовый и поверхностный стоки метеорных вод кальдеры с площади ~ 40 км², поэтому котловина сильно обводнена и заболочена. Через котловину протекает река Карымская, дренирующая сток термальных и холодных вод. Это определило специфику условий разгрузки Карымских терм, большая их часть разгружается в теплых болотах. Преобладают два основных типа источников.

1. Восходящие газлирующие источники с температурой от 25 до 42° С и дебитами 0,15 - 0,51 л/с. На выходе их воды отлагают большое количество гидроокислов железа, образуя лимонитовые конусы с газлирующими грифонами на вершинах, глубокие водяные воронки и озерки с плоским дном. Суммарный видимый дебит таких источников ~75 л/с.

2. Нисходящие источники с температурой 10-20°С, вытекающие из-под лав Карымского вулкана, в виде мощных родников и обильных ручьев. Такие выходы часто сопровождаются истечением углекислого газа (мофетами). Суммарный дебит этих источников очень велик: ~ 500 л/с.

По химическому составу воды восходящих источников углекислые SO₄-HCO₃-Cl / Mg-Na-Ca, с минерализацией до 2,8 г/л и рН 6-7. В повышенных концентрациях в них содержатся растворенный CO₂ (~1г/л), SiO₂, В, F, Li. В составе спонтанных газов доминирует CO₂, ~90 %. Это ярко выраженные углекислые термы. Высокие концентрации Mg²⁺ выделяют эти воды в особый, редко встречающийся в природе и очень ценный в бальнеологическом отношении подтип магниевых углекислых вод. Условно они названы "теплыми нарзанами". Воды нисходящих источников относятся к тому же гидрохимическому типу, но они в разной

степени разбавлены инфильтрационными водами и частично дегазированы. В их газовой фазе повышается содержание N_2 и O_2 , т. е. появляется воздушная составляющая.

Общая разгрузка термоминеральных вод в кальдере Карымская, с учетом скрытого стока, составляла 770 л/с, а вынос тепла ~136 МВт. Удельный вынос тепла (плотность конвективного теплопотока), в Термальной котловине 73 Вт/м², что на три порядка интенсивнее среднего для вулканических областей Камчатки. Такие высокие энергетические параметры типичны для высокотемпературных гидротермальных систем, но не характерны для месторождений углекислых вод.

Г.Ф. Пилипенко была предложена следующая модель формирования Карымских термоминеральных вод. Гидротермы в кальдере Карымская не выходят на поверхность в виде гейзеров или кипящих источников, и не вскипают на глубине, формируя паро-конденсатную зону, как это происходит на многих геотермальных месторождениях. Восходящий поток перегретых вод из основного геотермального резервуара с температурой 200 -- 250° на глубине 150 -- 400 м (при давлении 15 - 40 атмосфер), минуя процесс вскипания, смешивается с инфильтрационными водами. Возникает промежуточный резервуар - реактор, в котором насыщенные CO_2 и H_2S глубинные гидротермы взаимодействуют с обогащенными O_2 инфильтрационными водами. Образовавшаяся агрессивная смесь реагирует с водовмещающими породами, претерпевшими гидротермальную переработку на более ранних, высокотемпературных, этапах гидротермальной активности. Тогда в метасоматитах, особенно в приповерхностной зоне аргиллизации, происходило накопление Mg, Fe, Ca, S. Преобразование их в новые минералы идет при температурах 140-70°. Магнийсодержащие минералы (хлориты, монтмориллониты) образуют разного рода скопления в ассоциации с другими родственными минералами. При температурах ниже 70° в зоне аргиллизации начинается интенсивное выщелачивание минеральных новообразований. В растворы переходят сульфаты и гидрокарбонаты кальция и магния, формируются воды "нарзанного" типа [17].

В составе Карымских нарзанов отчетливо различаются две компоненты: "глубинная", аналогичная высокотемпературной составляющей терм Академии Наук, и "нарзанная", близкая по составу низкотемпературным углекислым водам, формирующимся в толщах метасоматитов. Их макрохимический состав соответственно: М 2,2 г/л; Cl75 SO₄15 / Na95 % мг-экв; SiO₂>300 мг/л и М 2,9 г/л; HCO₃60 SO₄40 / Mg60 Ca25 Na15 % мг-экв; SiO₂<100 мг/л. Эти гипотетические составляющие, смешанные в отношении ~1/4 - 1/5, по составу и по температуре (поскольку все тепло приносится с глубинной составляющей) соответствуют нарзанам Термальной котловины.

Таким образом, в недрах кальдер Академии Наук и Карымская до сейсмических и вулканических событий 1996 г. уже длительное время, шла разгрузка мощной высокотемпературной гидротермальной системы, локализованной в границах субмеридионального грабена, пересекающего обе кальдеры. Огромные массы высокотемпературных газо-водных флюидов и колоссальная тепловая энергия, аккумулированные на относительно небольшой глубине в геотермальных резервуарах, не могли не повлиять на ход фреатоо-магматического извержения.

Извержения и последствия. Ход и результаты извержений.

2 января 1996 г. на дне озера в кальдере Академии Наук произошло фреатомагматическое извержение. Одновременно в соседней кальдере началось извержение вулкана Карымскогояй, которое продолжалось до июля 2000 г. Спусковым механизмом извержений послужило сильное землетрясение (магнитуда 6,9) с эпицентром в 15 км южнее озера. Подводное извержение было коротким, всего 18 - 20 часов, но очень мощным - в сотни раз мощнее одновременного извержения вулкана Карымскогояй. Взрывы в озере, следовавшие с интервалом ~15 минут, выбрасывали магматический материал и газы на высоту 5 - 8 км. Тепловая энергия одиночного взрыва (их было ~100) оценивается в $(5-34) \times 10^{13}$ Дж [25]. Леед на озере полностью растаял, температура воды поднялась до ~25°C. На поверхности, волны цунами смыли рыхлые отложения и уничтожили береговую растительность на берегах на высоту до 15 м. По реке Карымская до самого устья прошла волна катастрофического паводка, оставившего на термальном поле Карымских источников полуметровый грязевой слой. В процессе извержения было выброшено ~40 млн. м³ (~80 млн. тонн) пирокластического материала. В основном это ювенильная базальтовая тефра, состоящая из неспекшихся бомб, размером до 15 см, лапилли, шлаков. На заключительных стадиях извержения выбрасывались пемзовые бомбы от андезитового до риолитового состава. [8]. Продукты извержения полностью перекрыли сток из озера. В результате сброса в акваторию изверженного и смытого с берегов рыхлого материала и талой снеговой воды, а также из-за вертикальных тектонических смещений поверхности, уровень воды в озере поднялся более, чем на 2 м.

15 мая перемычка в истоке реки была размыта, и начался второй экстремальный сброс воды из озера. Термальное поле в кальдере Карымская вновь было залито водой и, после ее ухода, значительная часть минеральных источников оказалась погребенной под принесенным из озера переотложенным пирокластическим и резургентным материалом. После спада воды в озере у северного берега образовался полуостров площадью 0,4 км² (полуостров Новогодний), охватывающий с трех сторон шестисотметровую взрывную воронку (кратер Токарева), заполненную водой (рис.11).

Одновременно шло эффузивно-эксплозивное извержение центрального кратера вулкана Карымскогояй. Оно началось взрывами с выбросом бомб и пепла на высоту более 1 км, а в середине января на юго-западный склон пошел первый поток глыбовой лавы. Излияние лавы продолжалось с перерывами более года, длина потоков достигла 1200 м, объемом превысил 11 млн. м³. Взрывы и газовые продувки с максимальной частотой, более 400 в сутки, продолжались до июля 2000 г., масса пирокластики за первый год извержения - 6,3 млн. тонн. Состав изверженного материала - традиционный для Карымского вулкана: среднекалиевые андезиты [8]. Энергия извержения за 1996 г. оценивается в 3×10^{16} Дж. [14].

Синхронные извержения предварялись и сопровождалась целой серией землетрясений: 31.12.1999 г. с магнитудой 5,8 в Кроноцком заливе, 1.01.2000 г. (М 6,9) вблизи кальдеры Академии Наук, и в течение месяца, мощным роем более слабых землетрясений [25]. Сила землетрясения 1 января в кальдерах Академии Наук и Карымская была >9 баллов. Произошла тектоническая активизация меридиональной разломной зоны. В верховьях р. Карымская на протяжении 2,5 - 3 км заложилась

новые трещины с раскрытием на поверхности до 2,5 м и амплитудой вертикального смещения 0,5 - 1,5 м [12]. На полуострове Новогоднемий на новых трещинах расположились воронки малых фреатических взрывов и выходы высокотемпературных гидротерм. В Термальной котловине вдоль новых трещин появились мощные газифирующие источники и протяженные линейные выходы термоминеральных вод (см. [рис. 1](#)). Главные удары стихии в январе 1996 г. приняло на себя озеро Карымское.

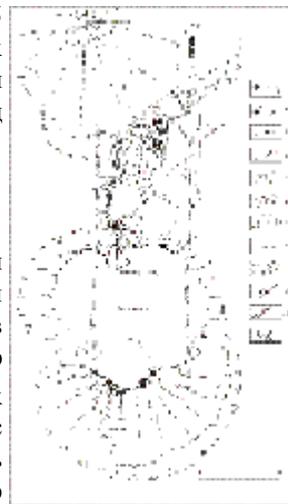


Рис. 1

Карымское озеро после извержения.

Извержение и инициированные им экзогенные процессы привели к катастрофическим изменениям гидрологического, гидрохимического и температурного режима озера. Чистейший абсолютно пресный водоем диаметром 3,5 км и глубиной до 70 м в считанные часы превратился в резервуар кислой ($\text{pH} < 3,2$) минерализованной воды - гигантский природный химический реактор объемом $\sim 0,5 \text{ км}^3$, в котором началась переработка растворившихся летучих и измельченных твердых (включая пеплы вулкана Карымскогый) продуктов извержения, озерных илов, материала смытого с берегов. На берегах озера активизировались существовавшие ранее термальные источники и появились новые мощные выходы горячих вод в истоках р. Крымская, на кромке взрывной воронки (кратер Токарева) и у северного берега [4].

Гидрологические, тепловые и гидрохимические параметры озера после извержения изучались группой исследователей под руководством С.М. Фазлуллина. По их данным озеро в нормальном состоянии имеет следующие основные характеристики: площадь водной поверхности - $9,8 \text{ км}^2$; максимальная глубина - 61 м; объем воды в озере - 460,6 млн. м^3 . Была сделана оценка тепловой энергии, аккумулированной озером во время извержения 1996 г. Учитывалось тепло, затраченное на плавление льда, нагрев воды и тепловая энергия взрывов. Полученную величину - 10^{16} Дж - сами авторы считают заниженной, поскольку не удалось определить теплоотдачу с поверхности озера [23, 24].

Преобразованная в результате извержения вода озера принципиально отличается от вод всех термальных источников, - и существовавших здесь ранее, и появившихся вновь. По гидрохимическим характеристикам она относится к "фумарольным термам поверхностного формирования" [11]. Гидротермы этого типа формируются при прямом контакте вулканических газов с поверхностными водами. Озеро дренируется единственным водотоком - рекой Крымская. Состав воды озера приведен в [таблице 1](#) (NN 1-7). Это кислая минерализованная хлоридно-сульфатная, магний-натрий-кальциевая вода. В ходе извержения вода в озере перемешана и ее состав в первом приближении можно считать однородным повсей глубине [24].

Зримым, поддающимся измерению результатом этих процессов, выходом из "геохимического черного ящика", является состав воды в реке, вытекающей из озера. Попытаемся проследить динамику изменения статических запасов основных компонентов минерализации воды озера и величину их выноса рекой (динамических запасов). В качестве компонентов-индикаторов используем вещества, определяющие гидрохимический тип воды (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Для удобства дальнейших построений пересчитаем SO_4^{2-} в S^0 . Результаты расчета элементов гидрохимического баланса озера за 1996 - 2000 гг. да приводятся в [таблице 2](#).

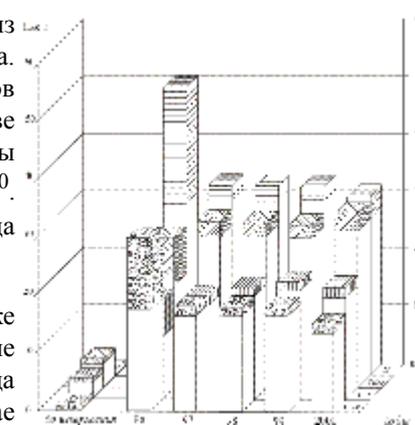


Рис. 2

За усредненную концентрацию компонентов в озере принято их содержание на истоке реки (см. [табл. 1](#), верхний створ). Поскольку регулярные режимные наблюдения не проводились, динамические запасы (годовой сток) рассчитаны по замерам меженного расхода в июле -- августе. В годовом стоке за 1996 г. учтены катастрофические паводки в январе и мае (46 млн. м^3) [14, 24]. Приводимые цифры имеют оценочный характер, поэтому округлены до тысяч тонн. На диаграмме ([рис. 2](#)) показаны масштабы и тенденции изменения статических запасов в озере и выноса растворенных веществ.

Наиболее заметным геохимическим последствием извержения был массивный выброс серы в гидрохимическую систему озера. Статические запасы серы в озере мгновенно возросли в ~ 60 раз. Учитывая величину выноса рекой (динамические запасы) в 1996 г в озеро поступило 69,7 тыс. тонн серы (скорее всего, в виде SO_2). В это же время, запасы Cl возросли в ~ 4 , а Na в ~ 6 раз. Их вынос из озера увеличился соответственно в ~ 10 и 14 раз (6,8 и 10,9 тысяч тонн/год), а поступление в 1996 г. составило 20,4 и 32,0 тыс. тонн. В нормальном режиме до извержения привнос Cl составлял 700 и Na 800 тонн в год. В 1997 г., после резкого снижения запасов и выноса растворенных компонентов, гидрохимическая обстановка в озере временно стабилизировалась, при этом сохранялся положительный баланс привноса-выноса вещества в гидрохимическую систему озера. Статические и динамические запасы по всем основным компонентам изменяются в узких пределах. Идеет постоянное, относительно равномерное поступление и вынос S, Cl, Na, Ca, и лишь в 2000 г. намечается новая тенденция снижения запасов и увеличения выноса (см. [рис. 2](#)). Увеличение транзита этих веществ через озеро объясняется значительным повышением дебита термоминеральных источников на его берегах.

Источники Академии Наук.

Сейсмические и вулканические события 1996 года изменили условия разгрузки гидротерм. В результате резких колебаний уровня озера и приливных волн по всему южному берегу на высоту более 5 м смыт чехол покровных отложений и выработан новый абразионный уступ. Из-за неравномерных тектонических подвижек южный берег озера был приподнят, и на поверхности оказались подводные термальные источники. Термальная активность на берегу резко возросла: выходы источников с температурой кипения прослеживаются с перерывами на протяжении 1500 м, а с температурой выше 40° - на 2100 м. В амфитеатре вулкана Академии Наук обособились четыре группы термопроявлений (см. [рис. 1](#)) [4].

Группа I, собственно термальными Академии Наук, претерпела очень заметные изменения. Обе нижние ванны каскада были срезаны новым абразионным уступом. В уступе обнажился уникальный четырехметровый разрез гейзеритового купола с гейзерными камерами и каналами. Одна из больших верхних ванн (юго-восточная) была заполнена вулканическим пеплом, смытым со склонов при таянии снега. Маленький гейзер "Сердитый" на ее берегу превратился в постоянный кипящий источник. Северо-западная ванна, горячий бассейн размером 20 x 15 метров с мощным пульсирующим грифоном на дне, сохранилась в почти прежнем виде, но заметно увеличила активность. Гейзер "Карлик" принял вид пульсирующего сильно кипящего пароводяного котла. Большой грифон в ванне в двухтысячном году начал работать в ярко выраженном гейзерном режиме (фонтанирование - 1 мин. 110 с; пауза - 50 с) с выбросом воды на высоту до 3 м. На склоне выше ванны появилось множество новых мелких кипящих конденсатных котелков и струек пара. Увеличилась площадь и усилился общий прогрев термального поля. На склоне на 80 м на северо-западу от ванн погибли заросли ольхового стланика и, частично, травяная растительность. Прогрев грунта во многих местах превысил 50° на глубине 20 см.

В 180 м северо-западнее старых ванн в 1996 году возник новый мощный очаг разгрузки парогидротерм, почти удвоивший общую тепловую мощность источников. Раньше берег здесь был задернован и наблюдались только признаки скрытой гидротермальной активности: полынья во льду вдоль берега, теплые ручейки. Приливные волны смыли покровные отложения и, после падения уровня озера, в обнажившемся береговом обрыве появились источники с температурой 72-96°, выходящие из открытых трещин в [туфобрекчиях](#).

Самым эффективным термопроявлением нового участка стал гейзер "Академический". Этот мощный источник с типичным гейзерным режимом появился в 30 м от озера, сразу над береговым уступом на высоте 6 м над водой. Жерло гейзера находится в яме глубиной 1,5 м с разновысокими стенками, выработанной в гидрохимических брекчиях. Устье гейзерного канала - воронка, заваленная крупными скальными обломками. Во время извержения вода заполняет яму, с сильным шумом кипит, выбрасывая фонтан и переливается в озеро обильным ручьем с максимальным дебитом ~20 л/с., Затем, оставшаяся в воронке вода быстро поглощается и начинается период накопления. В глубине воронки слышно кипение, нарастает интенсивность парения и следует новый цикл. В 1996 г. гейзер выбрасывал мутную желтоватую воду, затем система каналов промылась. Полный гейзерный цикл в июле 1996 г. длился 9-14 минут, а фонтанирование на высоту 1,7 м - 6^m 40° - 6^m 50°. В 2000 г. полный цикл остался ~10 минут, а характер извержения усложнился: фонтанирование + излив - 4', накопление - 4', малое фонтанирование - 30", накопление - 1-2". Высота фонтанирования возросла до 4 м. Вода гейзера по составу одинакова с остальными источниками Академии Наук. Наблюдается постепенный рост минерализации за счет кремнекислоты и ионов Cl и Na ([табл. 3](#)).

Все остальные термопроявления этого участка, располагающиеся выше гейзера, являются выходами пара. Это кипящие конденсатные котлы, некоторые - мощные, интенсивно бурлящие, диаметром до 1 м, другие - едва заметные парящие проколы. Там, где кипящие конденсаты успели переработать рыхлую породу, водные котлы превращаются в грязевые. Разнообразных котлов на участке более трех десятков, и все они почти бессточные. Кипящие котлы группируются в небольших плоских котловинах и воронках. Здесь работает обычный для таких условий природный сепаратор: на высоких отметках разгружаются пар и газ - продукты подземного вскипания гидротерм, а отсепарированная вода сливается вниз.

Для I группы источников Академии Наук характерна еще одна форма тепловой разгрузки: сильно прогретые термальные площадки, "сухие" и с рассредоточенным парением. Общая площадь термальных площадок по изотерме 50° на глубине 1 м 18000 м², из них 7000 м² прогреты на этой глубине до ~100°. Дебит основной группы источников Академии Наук в 1996 г. был 55 л/с, кроме этого, через парящие площадки и кипящие водные котлы выносилось ~6 кг/с пара. Вынос тепла составлял ~40 МВт [4]. В последующие годы тепловая мощность нарастала за счет увеличения стока из старых ванн и повышения температуры прогретых площадок при некотором сокращении их размеров. В 2000 г. расход воды достиг 70 л/с, и вынос пара превысил 6 кг/с. Тепловая мощность, соответственно, увеличилась до ~47 МВт.

Восточнее основной группы источников, на южном берегу озера на 650 метров прослеживается прерывистая полоса выходов горячих источников. На всем этом участке крутой, почти без пляжа берег сложен массивными грубообломочными туфобрекчиями, сцементированными отложениями гидротерм (гидрохимические брекчии). Из трещин в туфобрекчиях на уровне озера и под водой выходят горячие и кипящие источники. Выделяются две обособленные группы источников (см. [рис. 1](#)).

Группа II. В 450 м от термопроявлений основной группы, на урзе воды озера вдоль открытой на 10-20 см трещины северо-западного направления, заполненной обломочным материалом, выходят небольшие пульсирующие источники. Отдельные кипящие проколы видны на протяжении 2 м в дне озера и на берегу. Температура источников - 97°. Северо-восточнее на протяжении 30 м берег прогрет, и из мелких трещин в туфобрекчиях высачивается вода с температурой 40° и выше. Суммарный расход источников группы можно оценить в 1,5-2 л/с. Вверх по склону над источниками, на высоте ~40 м, расположена термальная площадка со слабыми выходами пара - проявление подземного вскипания гидротерм. Здесь несколько бессточных кипящих конденсатных котелков, парящий грунт с возгонами солей на площади порядка 15 м², угнетенная растительность на площади ~80 м².

Группа III. В 400 м северо-восточнее, у берега на глубине 30-50 см видны кипящие выходы воды, а на поверхности - пузыри газа и пара. Далее берег перекрыт слоистыми плитами гидротермальных брекчий, сквозь которые пробиваются источники с температурой от 40 до 80°. Затем на берегу появляется плоский уступ и фрагменты валунно-галечного и песчаного пляжа. Из каверн в туфобрекчиях выбивают восходящие источники и струйки пара, слышно подземное кипение. Под водой видны кипящие грифоны и струи газовых пузырей. Протяженность прогретой полосы берега - 110 м. С востока прогретый участок ограничен ручьем, образовавшим конус выноса, сквозь который в виде типичного грязевого котла пробивается кипящий источник с температурой 98°. Суммарный дебит термопроявлений группы - 7-9 л/с.

Группа IV появилась после извержения в 350 м западнее термальной площадки группы I. Здесь на отрезке 80 м прослеживается разгрузка термальных вод из-под вновь образованного трехметрового трехметрового берегового уступа.

Нисходящие источники выходят между глыб у подножья уступа и образуют ручьи, стекающие в озеро или теряющиеся в песчаном пляже. Температура воды источников от 43 до 20° .⁰. Общая протяженность участка разгрузки - 110 м. Максимальные дебиты отдельных источников 0,3 л/с, расход ручьев - до 1 л/с. Суммарный дебит оценивается в 10-12 л/с.

Источники на северном берегу озера, группа V (Медвежьи).

Эти источники появились в 1996 году в 1 км восточнее истока реки . Карымская. Здесь и ранее наблюдались признаки разгрузки термальных вод: полынья во льду вдоль берега, прогретый пляж, пузырьки газа [17]. После извержения характер береговой линии сильно изменился. В отложениях озерной террасы волновой абразией был выработан уступ высотой до 2,5 м. После снижения уровня озера берег отошел от уступа и образовался песчано-галечный пляж шириной 40-60 м. На урете воды пляж прогрет. В 1996 г. высачивание воды в виде струек с температурой 20-50° и линейная разгрузка и теплой воды вдоль берега прослеживались на протяжении 150 м. По приблизительным оценкам расход термальных вод тогда был близок к 5 л/с.

В дальнейшем протяженность участка разгрузки и температура источников прогрессивно нарастали. Осенью 2000 г. длина полосы разгрузки достигла ~700 м при максимальной ширине на берегу 10 - 15 м и на мелководье более 5 м. При этом температура отдельных термопроявлений достигла 64° , а прогрев выше 50° наблюдался на участке 170 м. Суммарный дебит источников, в пересчете на воду с температурой 64°⁰, составляет ~75л/с, из которых 40% приходится на воду с температурой 64-50° , 35% - 50-30° , 25% - 20-30° . Вынос тепла за 4 года увеличился с 300 до 4800 ккал/с (~20 МВт в 2000 г.).

Химический состав воды источников постепенно меняется (см. [табл. 3](#), NN 13, 14). С 1996 года ее минерализация увеличилась в 1,5 раза. Теперь воду Медвежьих источников можно отнести к минеральным слабощелочным высококремнистым гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридным, натриевым.

Источники на кромке кратера Токарева (группа VI).

Источники расположены на северном вогнутом берегу полуострова Новогодний (см. [рис. 1](#)). Термальные воды разгружаются в озеро на полутора километровой дуге северной кромки взрывной воронки. Берег здесь низкий и очень пологий. Вдоль береговой линии идет неравномерный, местами интенсивный, до 0,3 л/с с погонного метра, сток термальных вод в озеро. Есть признаки прибрежного подводного стока. Хорошо сформированных сосредоточенных источников здесь нет. Общая длина полосы разгрузки в 1996 г. была 580 м, участков с температурой выше 50° - 240 м, максимальная температура - 86° . К осени 2000 г. протяженность участка разгрузки увеличилась до ~700м, а максимальная температура упала до 72° . Наиболее интенсивный сток наблюдается на высокотемпературных участках. В пересчете на воду с максимальной температурой 86° , суммарная разгрузка 1996 г. оценивается в 105 л/с, 2000 г., в пересчете на 72° , - 110 л/с. Вынос тепла при этом сократился с ~38 МВт в 1996 г. до ~33 МВт в 2000 г.

В отличие от вод Карымского озера, гидротермы, разгружающиеся на кромке кратера Токарева, не несут следов прямого вулканического воздействия. Они почти нейтральные, содержат высокие концентрации хлорида натрия, и кремнекислоты ([табл. 4](#) N 1 - 5). Не отмечается и выделение спонтанного газа. Скорее всего это высокотемпературные гидротермы, которые разгружаются в рыхлые отложения на некотором удалении от кромки кратера, смешиваются с приповерхностными сульфатно-кальциевыми водами выщелачивания вулканогенных пород и стекают в воронку в виде нагретого грунтового потока.

На север от кратера Токарева по полуострову протягивается цепочка более поздних взрывных воронок. Они прорывают отложения первых взрывов. Эти воронки трассируют зону трещиноватости, по которой после землетрясения высокотемпературные гидротермы поднялись к поверхности.

Гидротермы у истока р. Карымская (группа VII).

Выходы термальных вод появились в истоке реки Карымская после прорыва перемычки, перекрывшей сток из озера во время извержения в январе 1996 г. В нижнем бьефе этой плотины уже в апреле пробивались струйки теплой воды. После прорыва перемычки и падения уровня озера, в новой пойме появились термальные источники с температурой от 20 до 94° .

Первые сочащиеся выходы термальных вод с температурой 20-25° появляются в левобережной пойме на расстоянии 20 м от озера. Они образуют узкую теплую лагуну, переходящую в ручей. В 70 м от истока ручья на его левом берегу начинается полоса разгрузки термальных вод в виде линейного высачивания и небольших нисходящих источников. Их температура, возрастает на протяжении следующих 70 м с 40° до 90° .⁰. Далее гидротермы разгружаются между подножием новой озерной террасы и ручьем и на плоской поверхности поймы. Ширина прогретой, сильно парящей площадки до 8 м, длина ~50 м. Источники здесь имеют облик небольших слабо газифицируемых грифонов, температура воды повышается до 94° , расход горячего ручья в конце площадки достигает 68 л/с. Перед впадением в реку горячий ручей разветвляется на рукава. Источники с температурой 71-85° выходят на островках в устье и из трещин в туфах коренного склона на левом берегу. К середине лета 1996 г. в истоках реки Карымской сформировался очень мощный очаг разгрузки высокотемпературных гидротерм с суммарным дебитом источников более 70 л/с. [4].

В последующие годы очаг разгрузки продолжал развиваться. Парящие площадки по берегам горячего ручья покрылись плотными корками возгонов. На дне реки, в излучине ниже основной термальной площадки появились два мощных грифона с температурой на выходе 98° и площадью бурления на поверхности более 5 м². Рядом на правом берегу образовалась новая термальная площадка с множеством мелких кипящих выходов на берегу и в русле реки. В 180 м ниже, на левом берегу непосредственно из трещины в коренных отложениях, открывшейся при землетрясении, в 1997 г. начался излив воды с температурой 85° .⁰. Общий расход источников почти удвоился за счет появления мощных грифонов на дне реки и

высокотемпературных выходов на правом берегу и достиг в 2000 г. 100-110 л/с. Вынос тепла при этом возрос с 27,6 до ~45 МВт. Глубинная температура по силикатному и Na - К геотермометрам 220 - 230°.

По гидрохимическому типу воды источников нейтральные азотно-углекислые сульфатно-хлоридные натриевые высококремнистые (см. [табл. 4](#)). Сопутствующие газы существенно отличаются от газов источников Академии Наук высоким содержанием CO₂ и отсутствием O₂. В отдельных источниках наблюдаются ураганные всплески содержания метана (до 53%) и гелия до 0,02%, что не имеет пока удовлетворительного объяснения.

Состав источников еще не стабилизировался и видоизменяется с тенденцией приближения к типичным высокотемпературным гидротермам. Расположение и конфигурация выходов позволяют предполагать, что данная группа источников, воронки фреатических взрывов на полуострове, очаг разгрузки гидротерм в кромке кратера Токарева связаны с единой термовыводящей зоной субмеридионального направления, активизированной при землетрясении.

Карымские источники (группа VIII).

Подводное извержение в озере и землетрясение привели к катастрофическим последствиям не только в кальдере Академии Наук, но и в кальдере Карымская. Мощными паводками, огромная масса пирокластического и резургентного материала была вынесена по реке в Термальную котловину. Река Карымская изменила русло. Отложения грязевых потоков нарушили или полностью заглушили многие минеральные источники и появились новые выходы гидротерм. При паводках тонкие глинистые илы осели слоем мощностью до 0,5 м в центральной части котловины, в местах максимального скопления горячих грифонов. Грубые пески мощностью до 1,5 м, перекрыли южную половину котловины ([рис. 3](#)). Изменения в характере разгрузки прослежены по всем основным термальным участкам. В августе 2000 г. были определены дебит и тепловая мощность по всем этим участкам. Результаты сравниваются с данными 1984 г. ([табл. 5](#)).

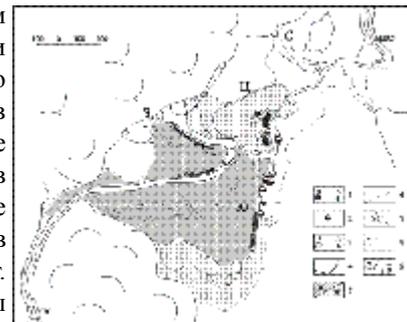


Рис. 3

На *Западном участке* песком были забиты восточная часть Теплого озера вместе с Главным грифоном и Теплая протока, соединявшая озеро с рекой. Две группы источников с температурой 39 - 41°, ранее существовавшие на северном берегу озера оказались под селевыми осадками и исчезли в болоте, образованном вдоль новой протоки из озера в реку Карымская. Нисходящий источник Нарзан I, у западного обрывистого берега озера, работает в прежнем режиме. В озере и в новой протоке температура воды понизилась до 10°. Новая протока и ручей Н 3, дренирующие термальный участок, выносят, по сравнению со старыми водотоками, вдвое меньше термальной воды. Возможно, часть воды погребенных источников фильтруется в реку Карымскую под наносами.

На *Центральном участке*, на площадке в форме треугольника со сторонами 350 м, наблюдалось максимальное сосредоточие горячих источников. Форма источников необычная: конусообразный "лимонитовый бугор", высотой 0,5 - 0,8 м и диаметром основания до 2 м., с округлым отверстием - газифицирующим грифоном сверху, из которого вытекает горячая вода, высаживая железистые осадки. Таких источников с температурой 36 -- 42° и дебитом до 0,5 л/с насчитывалось не менее 60. После паводков западная половина участка превратилась в обширное поле, покрытое глинистыми илами. Никаких признаков возрождения гидротермальной активности на этой площади нет. Восточная половина участка, примыкающая к реке, после паводков превратилась в топкое болото с теплыми озерами и множеством водяных воронок, возникших на месте смытых лимонитовых конусов. На болоте через травяной настил с тонким покровом илов местами просачивалась горячая вода, высаживая железистые осадки (температура 42 -- 45°). К 2000 г. на термальном болоте сформировалось несколько хорошо выраженных лимонитовых грифонов с дебитом до 0,3 л/с и температурой 42-44° (грифоны Горячий, Двойной).

На юго-востоке Центрального участка, на сухой покрытой зарослями ольхового стланика площадке, ранее разгрузки гидротерм не наблюдалось. В 1996 г. на площадке, выходящей к обрыву реки, среди погибшего после паводков стланика, из почвы пробилась фонтанчики горячей воды высотой до 20 см с температурой 37°. Собираясь в ручейки, вода стекает к реке. К 2000 г. на этом месте сформировалась хорошо выраженная термальная площадка размером 10 x 15 м с обильными железистыми осадками на поверхности. Выделяются мощный грифон (Новый) и множество малых грифонов вокруг. Температура воды 38 - 43°. Видимый дебит стекающих к реке ручьев около 8 л/с.

На Центральном участке появившиеся вновь и возрожденные после паводков 1996 года источники выводят воду с максимальной минерализацией 2,8 г/л. Это эталонный для Карымских терм тип воды: углекислая, высококремнистая хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатная натриево-магниевая. Площадка, занятая лимонитовыми грифонами, имеет размеры 100 x 200 м. Она тянется параллельно р. Карымская и трассируется той же системой водовыводящих трещин, что и Гнилая протока. В целом, по Центральному участку наблюдается некоторое увеличение дебита и, соответственно, возрасла тепловая мощность гидротерм - с 38 МВт в 1984 г., до 50 МВт в 2000 г. (см. [табл. 5](#)).

Южный участок протягивается вдоль Гнилой протоки от истоков до устья. В 1984 г. здесь отмечались только слабые высачивания теплой воды в болотах в истоках протоки и по обоим берегам в среднем течении. На Гнилой протоке, вскоре после январских событий, началось усиление гидротермальной деятельности. В дне протоки открылись газифицирующие трещины, на правому берегу, на высокой пойме, в нескольких местах забили грифоны с температурой воды 27°, образовались ручьи с дебитом до 5 л/с., сбрасывающие термальную воду в протоку. К 2000 г. характер разгрузки гидротерм на этом участке сильно изменился. Основная разгрузка терм переместилась под береговые обрывы и в русло протоки, где в дне образовались открытые трещины и воронкообразные углубления. Из них выбивают сильные газифицирующие струи воды с температурой 36 - 37°. По химическому составу новые грифоны отличаются от Карымских терм большей газонасыщенностью и более высоким содержанием Mg²⁺ и HCO₃. Отличительной особенностью спонтанных газов Гнилой протоки является высокое содержание He - 0,002 - 0,02%. В 1984

г. дебит термальной воды, стекающей в Гнилую протоку, был 30 л/с, вынос тепла 5 МВт. В 2000 г. приток увеличился до 240 л/с, тепловая мощность до 46 МВт (см. [табл. 5](#)).

Простираение термовыводящих трещин Гнилой протоки субмеридиональное, в устьевой части при слиянии с р. Карымская - субширотное. Общая протяженность нового участка разгрузки вдоль Гнилой протоки 300 м. На отрезке в 150 м ниже устья Гнилой протоки на р. Карымская под береговыми обрывами и на правобережной пойме на продолжении трещинной зоны появились, такие же источники- грифоны как продолжение трещинной зоны Гнилой протоки. На правобережье образовался мощный грифон Новая ванна с дебитом ~10 л/с (см. [рис. 3](#)). По температуре и химическому составу эти источники аналогичны нарзанам Гнилой протоки .

На Северном участке наблюдается частичное заилиение термальных площадок, понижение дебита и температуры источников (с 30° до 25° и ниже) В пойме, в излучине р.Карымская, на выходе из Термальной котловины источники полностью замыты..

Высокодебитные нарзанные источники, выходящие из-под лав вулкана в 800 м от Термальной котловины ниже по течению р.Карымская, не изменились и работают в прежнем режиме.

Речной гидрохимический сток.

Температура воды в реке ниже выходов гидротерм на истоке из озера в августе 2000 г. поднялась до 24°, и она приняла облик экзотического термального водотока. Русло окрасилось выпавшими гидроокислами в ярко оранжевый цвет, бурно развились колонии термофильных водорослей - пестрых возле горячих источников и изумрудно-зеленых, в виде длинных тонких нитей, в русле.

Река Карымская собирает воду всех термоминеральных источников обеих кальдер. Периодические наблюдения за расходом и составом воды в реке на фиксированных створах дают возможность количественно оценить и сопоставить гидрохимический сток кальдер до и за 5 лет после событий 1996 г. Наблюдения велись на трех створах: Верхнем (ВС) на истоке реки, среднем (СС) - на входе в кальдеру Карымская, и нижнем (НС) - ниже Термальной котловины (см. [рис. 1](#)). Верхний створ показывает химический сток из озера, формирующийся при участии гидротерм I -- VI групп, СС - то же с приращением за счет гидротерм VII группы, и "финишный" НС - включает вынос водами Термальной котловины. Химические анализы вод приведены в таблице 1. Наблюдения в 1984 г. сделаны в период весеннего паводка. Данные остальных лет получены в июле - августе, т. е. в межлетний период и могут быть приняты за среднегодовые. По этим данным легко посчитать "ионный сток" из озера и на двух отрезках реки. Результаты таких расчетов показаны на [рис. 4](#). Размер заштрихованных прямоугольников отвечает выносу вещества в единицу времени. Концентрации компонентов даны в эквивалентной форме, что позволяет получить представление о составе растворенных солей. Диаграммы отражают интегральную картину гидрохимических процессов и содержат большой объем информации. Отметим только главное. Во все годы вынос вещества в кальдере Карымская кратно превосходит вынос в кальдере Академии Наук. Новые гидротермы в истоках реки выносят больше хлорида натрия, характерного компонента парогидротерм, чем все источники на берегах озера. В экстремальном 1996 году в кальдере Карымской вынос Na был в 9 раз, SO₄ в 4, Cl в 2 и Mg в 4 раза больше, чем в кальдере Академии наук, где шло подводное извержение. Особенно велик был вынос сульфата натрия, по-видимому, за счет вымывания продуктов ионно-обменных реакций из тонкодисперсных отложений грязевых потоков. В последующие годы идет относительная стабилизация гидрохимического стока.

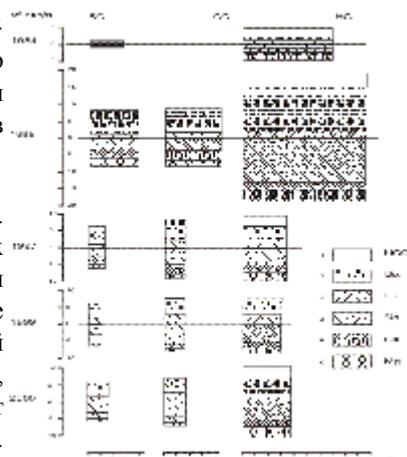


Рис. 4

Обсуждение

В недрах кальдер Академии Наук и Карымской длительное время функционирует геотермальная система. Ее возраст, судя по датам фреато магматических взрывов в кальдере Академии Наук, превышает 6500 лет [2]. В кальдере Академии Наук до последнего времени существовало два очага разгрузки гидротерм: явный, в мааре вулкана Академии Наук, и скрытый, у северного берега. В 1996 г. возник третий, самый мощный, в истоке реки Карымская. В кальдере Карымская на пути восходящего движения высокотемпературных гидротерм возник промежуточный водонапорный резервуар. В нем, в результате взаимодействия глубинных и инфильтрационных вод с метасоматитами, формируются углекислые термоминеральные воды, разгружающиеся в виде мощных нарзанных источников. Все очаги разгрузки гидротерм, как и сама геотермальная система, связаны с вулканотектоническими структурами субмеридионального грабена. Через систему трещин этого грабена, которые играют роль основных каналов миграции гидротерм, осуществляется гидравлическая связь между резервуарами термальных вод кальдер Академии Наук и Карымской. Эти резервуары можно рассматривать как автономные *гидротермальные* системы, объединенные общим источником теплового питания в единую *геотермальную* систему. Источниками нагрева гидротерм служат тепло и высокотемпературные флюиды приповерхностных магматических очагов, обусловивших возникновение кальдер, или менее глубинный и более активный очаг или система очагов, образовавшихся в недрах грабена. В обоих случаях, трещины растяжения, формирующие грабен, являются и каналами для подъема высокотемпературных теплоносителей, нагревающих современные гидротермы.

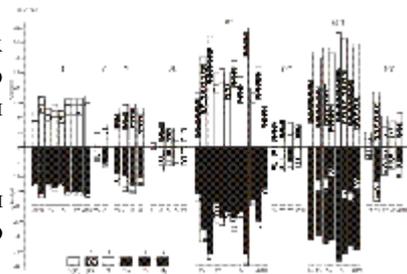
Сейсмические и вулканические события 1996 г. оказали сильнейшее воздействие на геотермальную систему. В свою очередь, массы подвижных высокотемпературных газо-водных флюидов и колоссальная тепловая энергия, аккумулированные на относительно небольшой глубине в геотермальных резервуарах, не могли не повлиять на подготовку и ход этих событий

Химический и газовый состав вод несет большой объем информации о процессах, протекающих в недрах, и может служить чувствительным индикатором состояния гидротермальной системы. В таблицах [1](#), [3](#), [4](#) собраны наиболее

представительные анализы термоминеральных вод и газов кальдер Академии Наук и Крымской за 1996 -2000 гг. и некоторые предыдущие годы, отражающие гидрохимические различия между группами источников и временные изменения внутри групп. Они уже комментировались при описании термопроявлений. Отчетливо выделяются три основных химических типа гидротерм: 1) - углекисло-азотные, хлоридно-натриевые щелочные (pH>9), высококремнистые ($H_4SiO_4 > 400$ мг/л) источников Академии Наук (см. [табл. 3](#)); 2) - азотно-углекислые, сульфатно-хлоридные, натриевые слабо щелочные и нейтральные, высококремнистые ($H_4SiO_4 > 300$ мг/л) новых источников (см. [табл. 4](#)); 3) - углекислые, хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатные, натриево-магниевые, высококремнистые ($H_4SiO_4 > 200$ мг/л), слабокислые (pH 6 - 7) Карымских источников .

Воды Карымского озера также превратились в минеральные, типа "фумарольных терм": кислые (pH<3,3), сульфатные со сложным катионным составом. Они постепенно нейтрализуются (в 2000 г. pH 4,7) и видоизменяются в сторону увеличения концентрации хлорида натрия и снижения сульфатности (см. [табл. 1](#), NN 3 - 7).

На диаграмме эволюции химического состава ([рис. 5](#)) хорошо видны сходства и отличия вод основных групп термальных источников и изменения их макрокомпонентного состава за 4 года.



[Рис. 5](#)

Очевидно, что за период с 1938 года значимых изменений в составе вод основного участка разгрузки гидротерм в кальдере Академии Наук (гр. I) не произошло. Изменялись лишь воды периферийных групп (II - IV). На сейсмоструктурные события 1996 г. источники отреагировали только резким увеличением дебита. По-видимому, каких либо качественных преобразований в глубинном тепловом и флюидном питании здесь не происходит.

Важнейшим гидрогеохимическим последствием катаклизма 1996 года надо считать возникновение мощного очага разгрузки высокотемпературных термоминеральных вод на северном берегу озера и в истоках реки Карымская. Новые сульфатно-хлоридные, натриевые гидротермы отличаются по составу от всех существовавших здесь ранее (см. [табл. 3](#) и [4](#)). Воды источников V, VI и VII групп различаются между собой не по гидрохимическому типу, а по величине минерализации, т. е. по степени смешения с пресными водами. Их состав к 2000 г. еще не стабилизировался, особенно в VII, самой большой и неоднородной группе, и еще рано говорить о тенденциях перемен (см. [рис. 5](#)). По большим, выше, чем в источниках Академии Наук, концентрациям хлоридов натрия в гидротермах VII группы можно заключить, что в них наиболее высоко присутствие флюида высокотемпературного геотермального резервуара. По гидрохимическим данным именно здесь, а не в эксплозивной воронке, вскрылись основные каналы разгрузки глубинных вод высокотемпературной геотермальной системы. Благодаря высокой минерализации и очень большим дебитам, новые гидротермы играют главную роль в процессах выноса и переотложения вещества в геохимической системе кальдеры Академии Наук.

В кальдере Карымская гидрохимические условия разгрузки гидротерм сложнее. Из-за приповерхностного смешения с инфильтрационными водами появляются "разбавленные" источники. Сильнейшее влияние на конфигурацию участков разгрузки оказали грязевые потоки катастрофических паводков, залившие большую часть термального поля и, сейсмические процессы, напротив, раскрывшие новые водовыводящие трещины. Несмотря на это, гидрохимический тип воды основных источников уже 35 лет остается прежним, а наблюдаемые незначительные перемены являются скорее колебаниями, чем изменениями. Небольшое, ~10%, увеличение минерализации отмечалось только в 1997 г. Следовательно, извержение вулкана Карымскогогоий, у подножия которого находятся источники, не отразилось на составе гидротерм. Вода высокодебитных источников на трещинах, открывшихся у восточной границы термального поля, гидрокарбонатная и менее кислая с высоким содержанием магния . Наблюдаемые здесь высокие концентрации He (до 0,2%) являются признаком разломных зон глубокого заложения.

Карымские термоминеральные воды, безусловно, являются лечебными. Они относятся к группе редко встречающихся углекислых высококремнистых магниевых вод, очень ценных в бальнеологическом отношении. Они содержат в повышенных концентрациях и биологически активные микрокомпоненты: Fe, As, Sb, Sr и др. Благоприятное сочетание состава и комфортной температуры с очень высокими дебитами (>700 л/с) делает месторождение термоминеральных вод кальдеры Карымская уникальным. Это самое большое на Камчатке и в России месторождение углекислых термоминеральных вод.

Механизм одновременной инъекции в озеро почти 70 тысяч тонн серы заслуживает специального обсуждения. Самым простым объяснением этого явления может быть привнос в виде SO_2 эруптивными газами. В большинстве опубликованных анализов высокотемпературных вулканических и теоретически рассчитанных "магматических" газов весовая концентрация соединений серы ($S+SO_2+SO_3+H_2S$) составляет $n \cdot 10^{-4}$ и, очень редко, 10^{-3} . Более 0,95 массы газов приходится на H_2O , остальное - CO_2 , H_2 , галогеноводороды и т. п. [15, 22]. Если эруптивные газы извержения 1996 г. имели аналогичный состав и также более чем на 95% состояли из H_2O , то вместе с $7 \cdot 10^7$ кг серы в озеро должно было поступить (сконденсироваться) $n \cdot 10^{10} - 10^{11}$ кг водяного пара ($10^7 - 10^8 m^3$ конденсата), что сопоставимо с объемом озера ($4,6 \cdot 10^8 m^3$). Тепловая энергия этого количества пара, принимая минимально возможную энтальпию $\sim 2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг, будет составлять $n \cdot 10^{16} - 10^{17}$ Дж. С.М. Фазлуллин оценил поглощенную озером энергию в 10^{16} Дж [24]. Казалось бы, что эта величина близка к вычисленной нами по геохимическим данным, но, в отличие от нашей, она "по умолчанию" включает тепло, отданное твердыми продуктами извержения. При сопоставлении оценок это тепло надо приплюсовать и к нашим цифрам и тогда разница далеко выходит за пределы одного порядка. Не решенной остается и проблема водной составляющей (конденсата) гипотетического эруптивного газа: из его объема $n \cdot 10^7 - 10^8 m^3$ только $n \cdot 10^6 m^3$ можно было бы "списать" на эруптивные облака ($1,3 \cdot 10^6 m^3$ [14]) и катастрофический паводок ($1,1 \cdot 10^4 m^3$ [24]). Следовательно, либо концентрация серы в газе была в десятки раз больше принятой нами, либо привнос серы одновременно осуществлялся и другим агентом.

Одновременно с 70 тыс. тонн серы в 1996 году в озеро поступило 20,4 тыс. тонн Cl. Это в ~30 раз больше, чем в предыдущие годы, и в ~20, чем в последующие (см. [табл. 2](#), [рис. 2](#)). Концентрации хлора в магматических газах обычно на 1 - 2

порядка ниже концентрации серы, поэтому его вынос в газовой фазе в больших количествах мало вероятен. Для транспортировки такого количества хлорида в растворе потребовалось бы $(2-4)10^7 \text{ м}^3$ воды (0,1 - 0,2 объема объема озера), аналогичной по составу парогидротермам Академии Наук.

Приходится предполагать, что при извержении в озере в транспортировке серы и хлора участвовала какая то высококонцентрированная субстанция, возможно, высоко минерализованный флюид глубинных околомагматических зон геотермальной системы.

Тепловая мощность является самым объективным показателем состояния гидротермальной системы, а тепло остается единственно бесспорно глубинным компонентом гидротерм. В таблице 8 показаны итоговые величины выноса тепла естественными термопроявлениями Карымско-Академической геотермальной системы. Цифры округлены до мегаватт, поскольку точность измерений не велика. Тем не менее, масштабы и тенденции изменений для всех очагов разгрузки проявляются весьма отчетливо.

Основной вынос тепла (~85%) раньше происходил в кальдере Карымская. В этой кальдере гидротермальная система отреагировала на извержение и землетрясение несущественным, на 20%, увеличением выноса тепла с последующим сокращением почти до начального уровня в 2000 г. И это несмотря на продолжающееся извержение вулкана Карымскогий, от кратера которого до источников меньше 3 км. При этом кардинально перераспределились участки разгрузки: большая часть тепла выносится теперь водами через систему трещин, вскрывшихся у восточной границы термального поля. Гидротермические и гидрохимические показатели позволяют уверенно утверждать, что на данном этапе развития магмовыводящая система вулкана не оказывает заметного влияния на состояние гидротермальной системы в кальдере Карымская и, следовательно, не является для нее поставщиком тепла и вещества.

В Кальдере Академии Наук в 1996 г. действующие источники резким скачком вдвое нарастили и продолжают увеличивать вынос тепла. Одновременно у северного берега озера и в истоках реки Карымская феноменальные сейсмо-вулканические явления привели к возникновению новых мощных очагов разгрузки парогидротерм. В результате общая тепловая мощность гидротерм в кальдере Академии Наук увеличилась в 5 раз, с 21 до 113 МВт, и продолжает расти. За 4 года источники Академии Наук усилились на 7 МВт, а новые источники - на 28 МВт. Повсюду, кроме кратера Токарева наблюдается рост температуры выходов и количества кипящих источников. Карымско-Академическую геотермальную систему можно было и раньше относить к "крупным" (157 МВт)1. После событий 1996 г. ее общая тепловая мощность стабилизировалась на новом высоком уровне - 290 МВт. Напомним естественную тепловую мощность крупнейших гидротермальных систем Камчатки: Узонская - 270, Кошелевская - 314, Мутновская - 130 МВт. [3, 77].

Выводы

1. В кальдерах Академии Наук и Карымскаяий в течение тысяч лет функционирует мощная высокотемпературная геотермальная система. Эксплозивное извержение произошло при внедрении магмы в ее геотермальный резервуар. Огромная масса газо-водного флюида и его тепловая энергия, аккумулированная в геотермальном очаге на относительно небольшой глубине, неизбежно повлияли на подготовку и ход извержения. Извержение 1996 года правильнее относить к типу гидротермально-магматических, а не фреатомагматических.

2. Судя по соотношению количеств серы, хлора и тепловой энергии, поступивших в Карымское озеро во время подводного извержения, в эксплозивном процессе участвовал высокоминерализованный теплоноситель с энтальпией ниже, чем у водяного пара.

3. Извержение вулкана Карымскогий не повлияло на состав и тепловую мощность источников у его подножия. Следовательно, промежуточный магматический очаг и магмовыводящая система вулкана не связаны непосредственно с гидротермальной системой и не являются для нее поставщиками тепла и вещества.

4. Феноменальным гидрогеологическим результатом сейсмо-вулканических событий 1996 г. стало появление нового мощного очага разгрузки высокотемпературных гидротерм в истоках реки Карымская.

5. В результате событий 1996 года суммарная тепловая мощность геотермальной системы почти удвоилась, при этом вынос тепла в кальдере Карымскойая остался на прежнем уровне, а в кальдере Академии Наук возрос в 7 раз, в основном, за счет новых источников на северном берегу озера и в истоках реки Карымская. По естественному выносу тепла геотермальная система кальдер Академии наук и Карымская относится к категории крупных и стоит в одном ряду с самыми мощными месторождениями парогидротерм Камчатки.

6. Во все годы, включая экстремальный 1996, вынос вещества (макрокомпонентов минерализации вод) гидротермами кальдеры Карымскойая был в 2 - 4 раза выше, чем в кальдере Академии Наук.

7. В кальдере Карымская заключено крупнейшее на Камчатке и в России месторождение ценных и редких по составу углекислых термоминеральных вод, заслуживающее специального бальнеологического исследования.

Авторы глубоко признательны дирекции Природных парков Камчатки и всем остальным, кто способствовал, или хотя бы не мешал, проведению исследований на КВЦ.

- Вакин Е.А., Кирсанов И.Т., Кирсанова Т.П.* Термальные поля и горячие источники Мутновского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 85-114. *Белоусов А.Б.* Комментарий к статье О.А. Брайцевой "Фреатомагматическое извержение в озере Карымское (Восточная Камчатка) приблизительно 6500 ¹⁴C-лет назад и импульсы подачи базальтового вещества в районе Карымского вулкана в голоцене" // Вулканология и сейсмология. 1998. N2. С. 107-109.
- Брайцева О.А.* Фреатомагматическое извержение в озере Карымское (Восточная Камчатка) приблизительно 6500 ¹⁴C-лет назад и импульсы подачи базальтового вещества в районе Карымского вулкана в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 138 - 134.
- Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.* Мутновский геотермальный район на Камчатке // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука, 1979. 267 С. 36 - -46.
- Вакин Е.А., Пилипенко Г.Ф.,* Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996г // Вулканология и сейсмология. 1998. N 2. *Пономарев В.В. и др.* Возникновение новой группы термальных источников на вулкане Алаид (Северные Курилы) // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1977. С. 73-84. С. 3 - 27.
- Влодавец В.И.* Вулканы Карымской группы // Тр. Камчатской вулканол. Станции., 1947. Вып. 3. С. 3-46.
- Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М.: Недра., 1974. 260 с.
- Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. 282 с.
- Гриб Е.Н.* Петрология продуктов извержения 2 - 3 января 1996 г. в кальдере Академии Наук. // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 71 - -96.
- Иванов Б.В.* Извержение Карымского вулкана в 1962 - -1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука., 1970. 135 с.
- Иванов Б.В.* Современная гидротермальная деятельность в районе вулканов Карымской группы Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука., 1974. С. 32-37.
- Иванов В.В.* Основные закономерности распространения и формирования термальных вод Дальнего Востока // Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР. М.: Минздрав СССР., 1960. С. 171-262.
- Леонов В.Л.* Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержениями, произошедшими в Карымском вулканическом центре 1 - -2 января 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 113 -- 129.
- Магуськин Н.А., Федотов С.А., Левин. В.Е., Бахтиаров В.Ф.* Деформация земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 97 - -112.
- Муравьев Я. Д., Федотов С.А. Будников В.А. и др.* Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 38 - -70.
- Мицо С.* О происхождении вулканических газов.// Гохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир, 1965. С. 61 - -77.
- Пилипенко Г.Ф.* Парогидротермы кальдеры Узон // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 237 -- 266.
- Пилипенко Г.Ф.* Гидротермы Карымского вулканического центра на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1989. N 6. С. 85-101.
- Попруженко С.В., Апрельков С.Е., Ольшанская О.Н.* Восточно-Камчатский вулканический пояс в свете геофизических данных // Вулканология и сейсмология. 1987. N2. С. 14.-.24.
- Вулканология и сейсмология. 1984. N 5. С. 49-60. *Селянгин О.Б.* Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулcano-структур // М.:Наука., 1987. 148 с.
- Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г.* Особенности разгрузки высокотемпературных подземных вод в Долине гейзеров // Вопросы географии Камчатки. 1989. N10. С. 81 --89.
- Сугробов В.М, Чирков А.М.* О распределении радона в современных гидротермальных системах Камчатки // Гидротермальное минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука., 1974. С. 22 - -24.
- Уайт Д.Е. Уоринг Г.А.* Вулканические эманации // Гохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир., 1965. С. 9- - 21.
- Ушаков С.В., Фаздуллин С.М.* Морфометрические характеристики Карымского озера в связи с подводным извержением. // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С. 130 - -137.
- 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. N4. С. 19 - -32.

Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. N5. С.3 --37.

Фирстов П.П. Чирков А.М. Радон в спонтанном газе термального источника вулкана Карымского (1966 - 1975 гг.) // Бюл. вулканол. станций. 1978. N54. С. 35 --40.

Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН

Catastrophic deformation and following evolution of the high-temperature geothermal system as a result of phreato-magmatic eruption in Karimsky caldera lake

Vakin E. A., Pilipenko G.F.

Within the terminal part of Karimsky volcano-magmatic center in the nearby Karimsky and Akademiya Nauk calderas a high-temperature hydrothermal system has been formed under the effect of the near-surface magmatic chambers. The system manifests itself on the surface in the form of intense thermal springs and has been operating for a long time. Earthquake and phreatic eruption of 1996 at the caldera lake bottom caused a drastic change in hydrochemical and heat regime of the hydrothermal system and lake. Previously existed springs stirred to a greater activity and new intense hydrotherm outlets appeared differing by water composition from the ever known ones in this region. Massed injection of magmatic and hydrothermal fluids caused the lake to become a basin of acid mineral water with a volume of ~500 mln m³ - a natural chemical reactor in which solid eruptive products, bottom sediments, and material washed away from the shores are processed. In this paper is discussed genesis and evolution of the thermomineral water and gas composition from Akademiya Nauk and Karimskaya calderas. Quantitative assessment is given to their relative role in transportation and redistribution of heat and dissolved matter. Dynamics of the hydrochemical processes initiated by the eruption is traced. Prevalent situation is compared with the one existing prior to the eruption.