

**ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД СОВРЕМЕННЫХ
АКТИВНЫХ ВУЛКАНОВ НА ПРИМЕРЕ КАЛЬДЕРЫ ГОЛОВНИНА
(О. КУНАШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)**

Е.П. Шевко¹, М.П. Гора¹, С.П. Коханова², Г.Л. Панин²

¹ФГБУН Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т ак. Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090; e-mail: liza@igm.nsc.ru

²ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, пр-т ак. Коптюга 3, г. Новосибирск, 630090

Поступила в редакцию 9 августа 2022 г.

В статье представлены результаты многолетних комплексных геохимических и геофизических исследований по материалам, собранным в кальдере вулкана Головина. Обсуждаются особенности химического состава термальных растворов и конденсатов. Представлена интерпретация геофизических разрезов, включающих зоны разгрузки активных газогидротерм, с точки зрения формирования химического состава фумарольных газов и термальных растворов. На основе всего фактического материала подобран количественный состав взаимодействующих сред, построены физико-химические модели. На основании моделей и результатов изучения подповерхностного пространства термальных полей предложены наиболее вероятные физико-химические условия подъема флюида на поверхность.

Ключевые слова: геохимия, вулканология, термальные поля, электроразведка, физико-химическое моделирование, влк. Головина, о.Кунашир, Курильские о-ва.

ВВЕДЕНИЕ

Термальные воды, разгружающиеся на склонах и в кратерах активных вулканов, часто представляют собой контрастные типы растворов как по физико-химическим параметрам, так и по содержанию широкого круга элементов. Большая разница указанных параметров характерна не только для разных вулканов, но обнаруживается в пределах одного вулкана и даже на локальных термальных полях. Эта разница, по нашему мнению, объясняется путями миграции флюидов, степенью их взаимодействия с вмещающими породами, разбавлением метеорными водами, а также наличием во флюидоподводящей системе вулканической постройки зон фазовых переходов и, как следствие, геохимических барьеров, на которых будут отлагаться различные компоненты [10, 13, 32].

Вулкан Головина выбран как один из типичных вулканов Курильских островов, представляющий возможность наблюдать и опробовать широкий спектр процессов и объектов современной газогидротермальной деятельности.

Вулкан-кальдера Головина на юге острова Кунашир — самый южный активный вулкан Курильских

островов. Диаметр кальдеры более 10 км в основании и 4.5 км по гребню. Стенки кальдеры сложены преимущественно туфогенно-осадочными образованиями. В центре ее находятся два экструзивных купола андезидацитового состава: Центральный Восточный и Центральный Западный. Похожие куполы располагаются в северо-западной части кальдеры (купол Подушечный) и в ее юго-восточной части (купол Крутой) [3, 8]. Последнее проявление эруптивной деятельности в кальдере связано с фреатическим взрывом, в результате которого образовался кратер диаметром около 350 м, заполненный озером Кипящее. Образование этой воронки взрыва, по разным оценкам, произошло от 640–680 [7] до 1000 [4] лет назад. В настоящее время активность вулкана проявлена действием нескольких фумарольных полей. Наибольшее число выходов фумарол и термальных источников на поверхность расположено на дне и берегах оз. Кипящего (рис. 1). Температура воды в озере и прилегающих источниках варьирует от 20 до 100°C.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач был использован комплекс различных методов. При опробовании

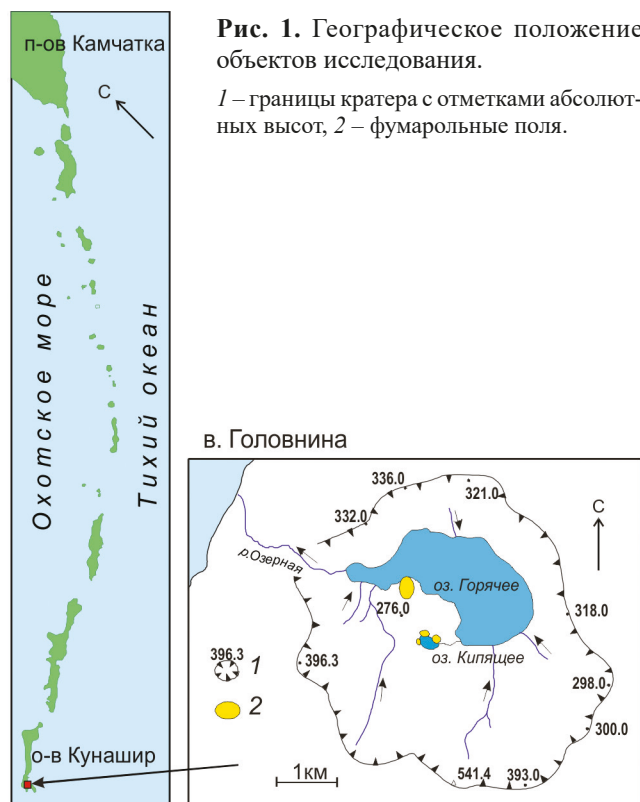


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования.

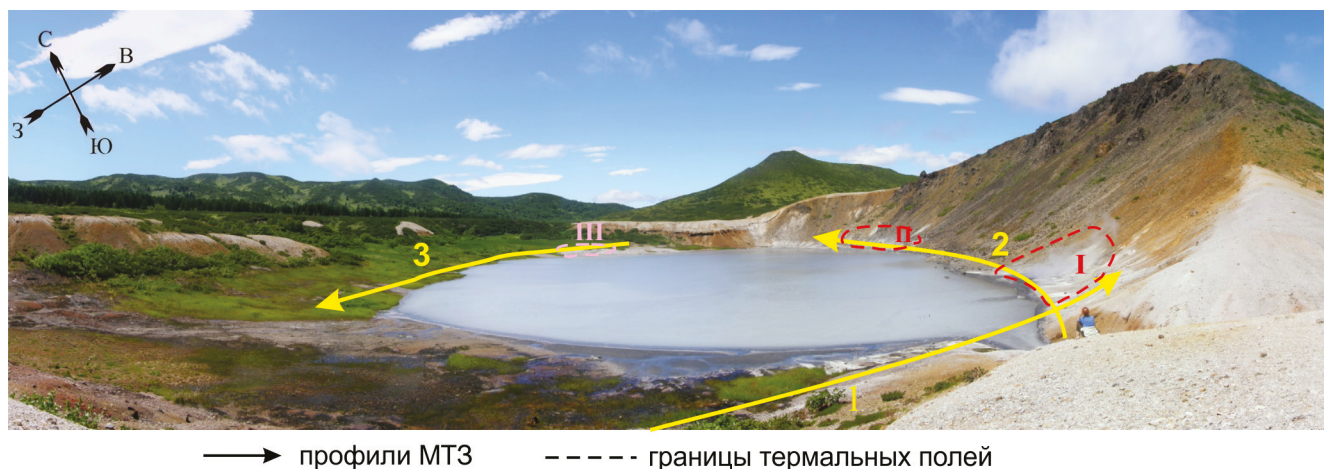
1 – границы кратера с отметками абсолютных высот, 2 – фумарольные поля.

водных растворов в полевых условиях замерялись рН, Eh, T °C после отстаивания взвеси, если таковая имела. В дальнейшем, в лабораторных условиях, основной ионный состав растворов определялся в ИВиС ДВО РАН стандартными методами [5]: колориметрии, пламенно-фотометрическим, потенциометрическим, объемным с ошибкой определения не более 5 % (аналитики А.А. Кузьмина и С.В. Сергеева), в ИНХ СО РАН методом ионной хроматографии (отв. исп. к.х.н.

Б.С. Смоляков), в испытательной лаборатории ДВ филиала ФГУ НПП «Росгеолфонд», г. Южно-Сахалинск (аналитик В.Д. Чугунова). Многоэлементный состав растворов анализировался методом ICP-AES, прибор IRIS фирмы Jarell Ash Corporation. Работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск (аналитики Л.Б. Трофимова, С.Ф. Нечепоренко).

Геофизические исследования подповерхностного пространства термальных полей проводилось для глубин от 7 до 50 м. Данные для геоэлектрической модели получены двумя методами: электромагнитным индукционным частотным зондированием (ЧЗ) в реализации прибора НЕМФИС (электромагнитный сканер) и методом электротомографии многоэлектродной установкой СКАЛА-48 (разработка ИНГТ СО РАН). Кроме определения геометрии подземных резервуаров и гидрогеохимической зональности среды электромагнитное зондирование позволяет проследить изменение фазового состояния поднимающегося флюида в верхних частях разреза. В береговой зоне оз. Кипящее на трех участках было выполнено 3 профиля электротомографии, которые обозначены линиями на (рис. 2), каждый из них – двумя расстановками. Разнос между крайними электродами был максимально возможным и составлял 235 метров. Шаг между электродами – 5 м. На первом профиле были выполнены исследования расстановками Шлюмберже + диполь-диполь; прямая + обратная поль-диполь. На втором и третьем профилях электротомография выполнялась с помощью расстановок Шлюмберже и мультиградиентной (фокусирующей).

На берегу оз. Кипящее было выполнено несколько профилей частотным зондированием аппаратурой



—→ профили МТЗ

----- границы термальных полей

Рис. 2. Схема отбора проб и проведения геофизических исследований на термальных полях оз. Кипящее.

Термальные поля: I – Юго-Восточное, II – Северо-Восточное, III – Северо-Западное.

НЕМФИС с позиционированием при помощи GPS-приемника. Средний шаг между точками измерений соответствовал 1 м. Поскольку рельеф не позволял выполнить площадные зондирования, было решено использовать профилирование. Аппаратура электромагнитного зондирования НЕМФИС представляет собой трехкатушечный индукционный зонд с вертикальными магнитными моментами, расположенными в одной плоскости. Диапазон измерений входного сигнала приемника от 1 до 500 мкВ, с неопределенностью ± 0.02 мкВ при $P = 0.95$. База прибора 2.75 м, шаг измерений ~ 1 м. Информация о геоэлектрическом разрезе в параметрах кажущегося удельного электрического сопротивления вычисляется на основании данных о токе и амплитуде сигнала для измерения на каждой из частот. В процессе зондирования в реальном времени контролируется получаемый в виде карт или разрезов первичный материал о распределении геоэлектрических параметров среды. В основе интерпретации данных частотного зондирования лежала программа ISystem, которая разработана в ИНГТ СО РАН для аппаратуры НЕМФИС [1].

При физико-химическом моделировании используются традиционные методы и собственные новейшие разработки авторов. В представляемом исследовании основные расчеты проведены с помощью ПК Селектор, который разрабатывался в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН под руководством Карпова И.К. с начала 80-х годов, а новейшая версия описана в [9]. В настоящее время ПК Селектор включает стандартные базы данных компонентов водного раствора, газов, расплавов, твердых веществ и минералов [6, 12, 14, 17–19, 29–31, 33].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ОСНОВНОЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РАСТВОРОВ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА БЕРЕГАХ ОЗЕРА КИПАЩЕГО

Исследованные термальные источники характеризуются большим разбросом физико-химических параметров. Это разнообразие проявляется и в пределах отдельных термальных полей. Так и на Северо-Западном, и на Юго-Восточном поле фиксируются источники с кислыми (рН около 3) и щелочными (рН более 7) растворами. Окислительно-восстановительный потенциал также для каждого поля варьирует в широком диапазоне (от -325 до 113 мВ.). Прослеживается очевидная зависимость между кислотностью и окислительно-восстановительным потенциалом растворов. (табл., рис. 3). В целом следует отметить, что особенностью растворов является относительно низкий окислительно-восстановительный потенциал растворов от -200 до 100 мВ. Это существенно ниже

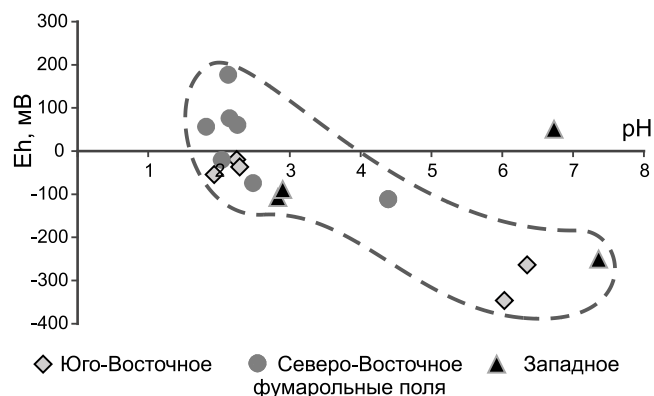


Рис. 3. pH-Eh параметры растворов термальных источников в кальдере Головнина.

среднего состава дождевой воды (200–300 мВ). Котлы по берегам озера имеют более высокую кислотность. Окислительно-восстановительный потенциал вод озера от -20 до 50 мВ.

В анионном составе сульфат является преобладающим, вторым по значимости идет хлорид. В нейтральных-субщелочных источниках с низким окислительно-восстановительным потенциалом немаловажное значение принадлежит гидрокарбонату (КГ-1, КГ-4, КГ-17). В растворах некоторых источников обнаружены в значительных количествах нитрат (на Северо-Восточном фумарольном поле) и фторид. Такое разнообразие анионного состава свидетельствует о сложных путях разгрузки и, видимо, разных соотношениях глубинной и метеорной составляющей в источниках.

По катионному составу растворы термальных источников могут быть разделены на несколько типов (рис. 4):

I. Кальций-натрий-магниевый тип низкоминерализованных вод. К этому типу относятся почти все источники с субнейтральной-слабощелочной средой. Во всех калий составляет несколько процентов, при этом содержания Fe и Al низкие ($< 1\%$). К этому же типу можно отнести растворы пяти котлов, в которых алюминий и железо могут считаться макрокомпонентами (Al 8–20 мг-экв %; Fe 1–4 мг-экв %). Эти кислые котлы сформированы, видимо, из поверхностных вод, но при заметном участии глубинных гидротерм.

II. Натриево-кальциевый тип. Содержания катионов в растворах этого типа наиболее высоки из всех (особенно выделяется натрий), хотя общая минерализация по уровню близка к среднему значению среди изучаемых растворов. Это один кислый котел, озеро и один субнейтральный котел. Доля железа и алюминия составляет целые проценты в кислых растворах

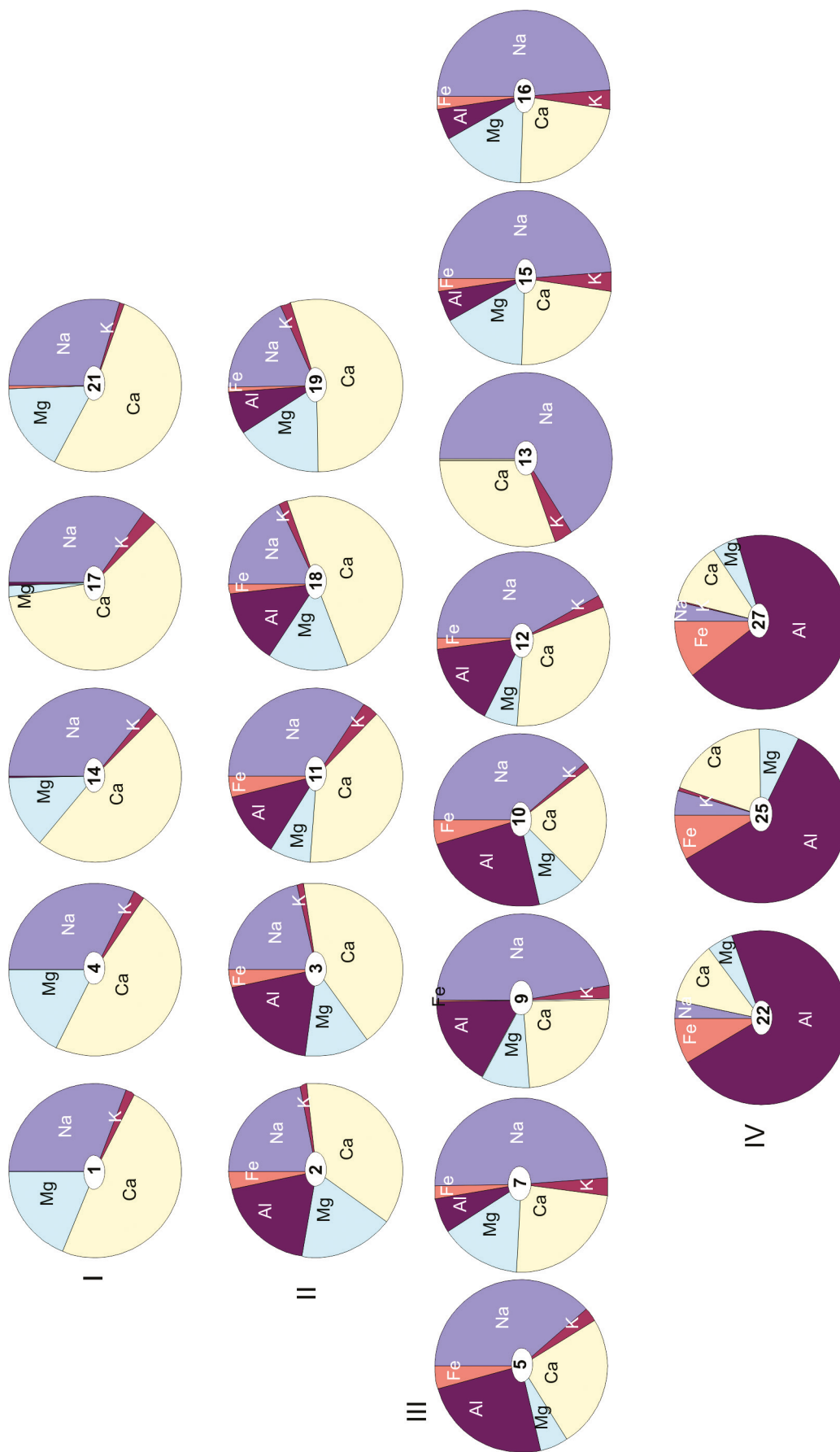


Рис.4. Основной катионный состав растворов термальных источников, четыре типа (римские числа). Подписи диаграмм соответствуют номеру анализа в таблице.

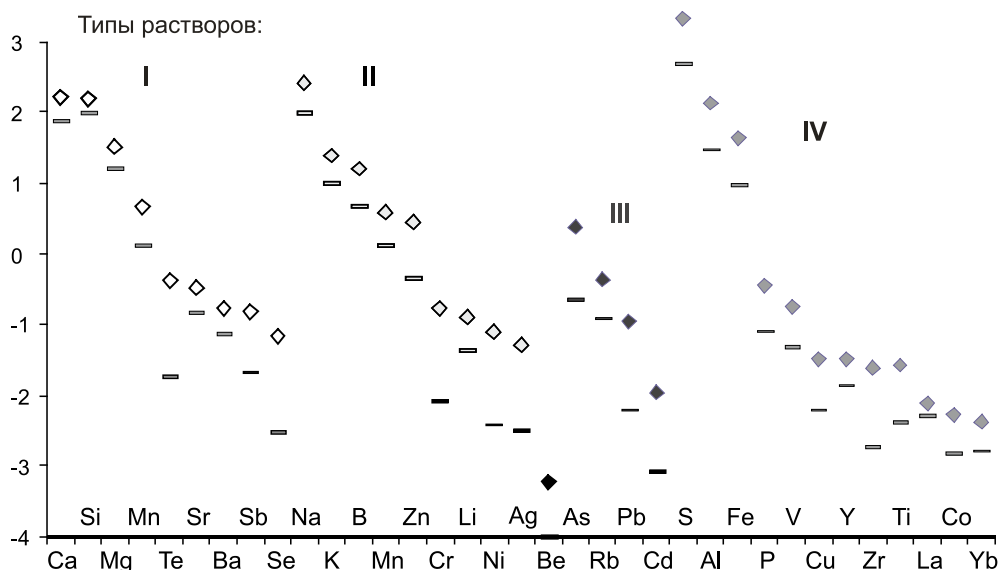


Рис. 5. Логарифм концентраций (максимальные – ромбы; среднее по выборке – горизонтальные штрихи) элементов в термальных растворах различных типов.

этого типа, но эти компоненты практически отсутствуют в субнейтральном котле.

III. Натриево-кальциево-глиноземный тип. В растворах этого типа количество алюминия составляет 16–24 мг-экв % с заметным участием в катионном составе железа (0.4–4 мг-экв %).

IV. Глиноземно-кальциево-железистый тип. К нему принадлежат котлы Центрального фумарольного поля на берегу оз. Горячее. Судя по отличиям в катионном составе, котлы сформированы иными гидротермами, чем в системе оз. Кипящее.

Типы растворов довольно четко различаются и по набору микроэлементов, в них преобладающих. Для типа I характерны сравнительно повышенные концентрации примесных породообразующих: Mn-Ba-Sr и аниогенов: Sb-Se-Te-As (рис. 5). Поскольку предположительно этот тип вод формируется из поверхностных резервуаров, выщелачивание примесей из породообразующих минералов может происходить при длительном взаимодействии «раствор – вмещающая порода», тем самым переводя в раствор некоторые химические элементы. Подвижные аниогены способны поставляться в поверхностные воды с паро-газовой фазой. Их миграция с отделяющимися парами приводит к некоторому обеднению остающихся растворов этими элементами.

Для II типа выделяются ассоциации: B-Li-Be и металлы: Cr-Ni-Zn-Ag. Высокое содержание натрия в водах этого типа, возможно, связано с прониканием морских вод в подземные резервуары, а вместе с ними – в поверхностные разгрузки. Повышенные кон-

центрации лития и бериллия, как правило, указывают на присутствие во вмещающих породах ореолов метасоматитов, обогащенных слюдами (мусковитом-серицитом) – основными минералами-концентраторами этих элементов. Ассоциация металлов, включающая хром и никель, свойственна гидротермалитам со значительной долей магматического флюида.

Тип III растворов содержит сравнительно повышенные концентрации Pb-Cd и Rb-As.

IV тип, представленный наиболее высокоминерализованными растворами на Центральном фумарольном поле, характеризуется следующими ассоциациями: Cu-Co; Ti-V; Zr-Y-Yb-La; S-P. Повышенные концентрации указанного списка элементов в глиноземно-кальциевых растворах могут быть обусловлены подъемом кислых магматических флюидов из глубоких горизонтов, где взаимодействие с вмещающими породами происходило с разрушением породной матрицы и переходом в растворы даже таких геохимически инертных элементов, как цирконий, иттрий и иттербий.

Наибольшая контрастность в распределении характерна для таких аниогенов, как: As, Sb, Te, Se и металлов: Cr, Ni, Ag, Cd, Pb, разница в максимальных концентрациях и средних по выборке составляет более, чем 10 раз.

Большое разнообразие в катионном составе указывает на сложные процессы формирования поверхностных термальных разгрузок с участием растворов, отличающихся по составу, генезису и механизму транспорта к поверхности.

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ НА ФУМАРОЛЬНЫХ ПОЛЯХ ОЗЕРА КИПЯЩЕЕ

Задачей геофизических исследований было определение геометрии флюидоподводящих каналов, объемной глубинной структуры газо-гидротермальных зон и геотермальных резервуаров методами электротомографии. Основным источником сигнала естественного электрического поля на вулканах генерируется электрокинетическими связями [15]. Течение грунтовых вод создает электрический ток и электрическое поле, называемое направленной естественной поляризацией, которую можно измерить с поверхности [23, 26, 27]. Как следствие, направленная поляризация, связанная с вертикальным транспортом флюида в вулканических гидротермальных системах, проявляется в положительных аномалиях [16, 25, 28]. Еще 40 лет назад Keller and Rapolla [22] показали, что применение данных электроразведки для этих целей оправданно, поскольку электропроводность поровых растворов резко возрастает с ростом солености при растворении вулканических газов в воде. Фактически электромагнитное зондирование вулканов используется для обнаружения высокопроводящих (низкоомных) аномалий, относящихся к вулканической и гидротермальной активности [11, 20, 21, 24].

Интерпретация материалов электротомографии позволила установить структуру подповерхностного пространства на термальных полях оз. Кипящее. Рассмотрим Профиль № 1, выполненный расстановками Шлюмберже + диполь-диполь; прямая + обратная поль-диполь (рис. 6). В зависимости от выбранной расстановки варьируется глубина зондирования. Удельное электрическое сопротивление пород на рабочем участке изменяется в очень широких пределах. По результатам количественной интерпретации данных электротомографии УЭС составило от 0.5 Ом·м до 10000 Ом·м. Высокое УЭС приурочено к консолидированным вмещающим породам, а низкое – к высоко минерализованным растворам и насыщенным этими растворами пористым породам.

Исследование глубинного строения термальных полей оз. Кипящее методом электротомографии продемонстрировало наличие мощных каналов, поставляющих гидротермальные флюиды к поверхности (рис. 6). Конфигурация каналов довольно сложна, она определяется наличием горизонтов или блоков слабопроницаемых пород. Разнообразие составов в поверхностных разгрузках можно объяснить внутренней структурой полей: наличие трещинных каналов позволяет подъем к поверхности растворов из низкоомной зоны. Этим механизмом формируются

кислые и ультракислые котлы с высоким содержанием химических элементов, привносимых магматическими флюидами. Участки под изолирующими блоками вмещающих пород можно трактовать как зоны образования смешанных растворов с большей долей поверхностных вод. Выход таких растворов на поверхность может происходить в виде кислых субнейтральных источников, в которых содержание «глубинных» компонентов существенно ниже, чем в соседних котлах, питаемых непосредственно из низкоомных зон.

Профиль № 1 интересен тем, что, помимо положения питающего канала, на нем определились несколько небольших зон в близповерхностном пространстве, которые, по нашему мнению, могут быть зонами сконденсированных растворов, поступающих в виде паро-газовой фазы от геохимического барьера, расположенного на глубине около 20 м от поверхности, а затем конденсирующихся на близповерхностном барьере, каковым являются небольшие блоки вмещающих пород, препятствующие подъему конденсата непосредственно на поверхность. Поскольку породы термального поля представляют собой метасоматически измененные разновидности, которые предшествующая гидротермальная проработка превратила в рыхлые, хорошо проницаемые образования, постепенно сконденсированные растворы находят пути и поднимаются, образуя разгрузки разного геохимического состава и с различающейся средой.

На вертикальных разрезах, полученных частотным зондированием, в большинстве случаев отчетливо проявлено субгоризонтальное строение внутренних зон (рис. 7). Нижние зоны с низким сопротивлением (ок. 4–6 Ом·м), а, следовательно, с высокой электропроводностью соответствуют зонам, в которых поровое пространство вмещающих пород заполнено электролитом – относительно высокоминерализованным раствором. Распределение электролита в среде довольно равномерно. К поверхности зоны с увеличивающимся сопротивлением постепенно сменяют одна другую.

В некоторых участках (очевидно, ослабленных проницаемых структурах вмещающих пород) низкоомные зоны подходят к поверхности в виде сравнительно узких «языков», что и приводит к появлению поверхностных кипящих разгрузок (грязевых или водных котлов). Важно, что на всех профилях отрисовалась поверхностная очень узкая зонка с сопротивлением более низким, чем подстилающие слои. Аналогичная ей, но более мощная зона расположена на глубине ~3–4 м от поверхности.

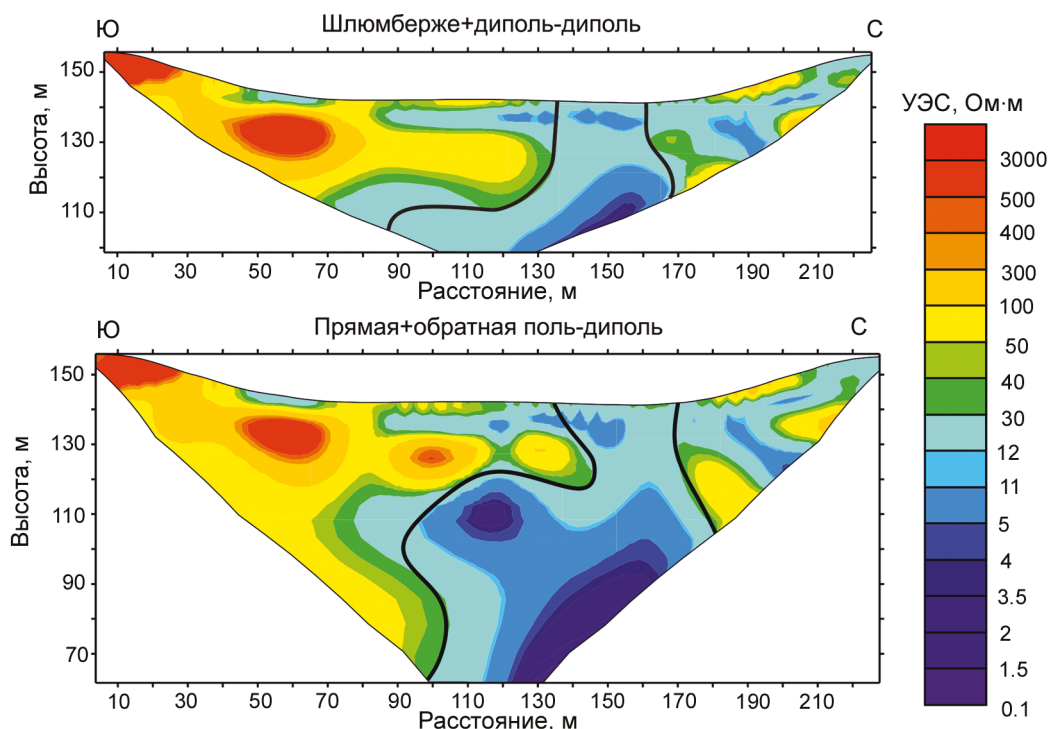


Рис. 6. Профили электротомографии на термальных полях оз. Кипящее.

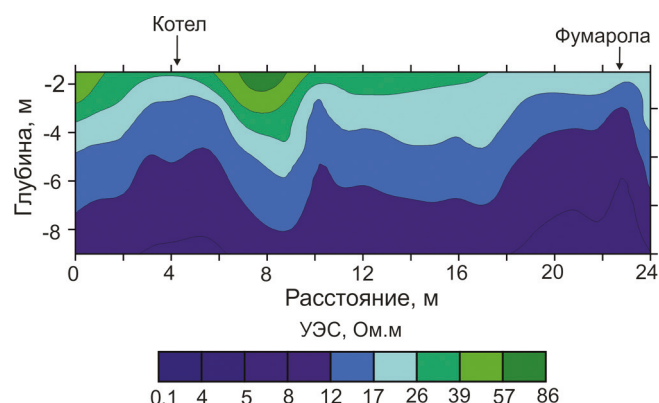


Рис. 7. Профиль частотного зондирования на Юго-восточном термальном поле оз. Кипящее, проходящий в непосредственной близости с фумаролой и термальным котлом.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Термодинамическое моделирование в наше время является одним из наиболее используемых методов при описании гидрогеологических систем. После долгих лет исследований в данной области сложился подход равновесно-динамического моделирования, в котором в качестве аналога безразмерного времени используется соотношение вода/порода. Имитация эволюции самой системы в этом случае моделируется

как последовательное достижение равновесия в каждом резервуаре с всё новыми порциями поступающего флюида [2].

Большая часть постройки вулкана Головнина сложена туфами андезидацитового состава. Для понимания возможностей изменения составов растворов в ходе взаимодействия с породами постройки на первом этапе были проведены термодинамические расчеты равновесия при взаимодействии 1 кг флюида с разным количеством андезита при разных температурах. Результаты расчетов демонстрируют, что всего несколько грамм андезита, вступившего в реакцию, достаточно для нейтрализации ультракислых растворов (рис. 8). Температура взаимодействия, безусловно, влияет на интенсивность процесса, но не имеет определяющего значения.

Для группы растворов вулкана Головнина были рассчитаны равновесные состояния при разных температурах. Расчеты проводились при атмосферном давлении и температурах, которые могут фактически моментально меняться в одном термальном источнике в процессе подъема на поверхность от 110 °С до 25 °С. Показано что при определенных условиях из растворов могут отлагаться в том числе и минералы рудных компонентов. Важно отметить, что основным параметром, влияющим на состав осадка, является фазовое состояние флюида: при вскипании естествен-

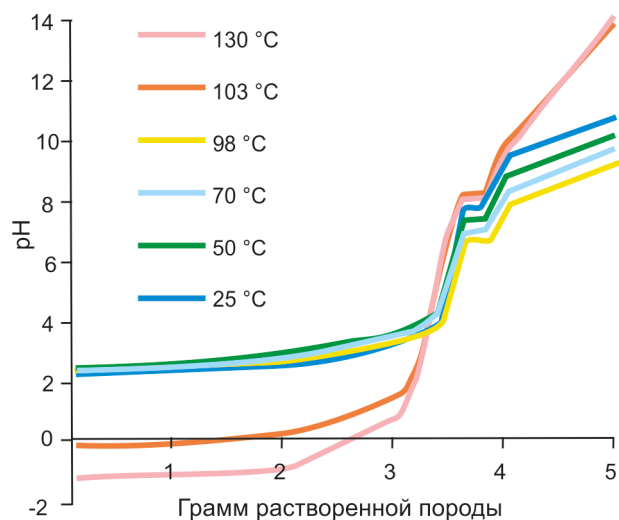


Рис. 8. Расчетная зависимость кислотности термальных растворов от количества растворенной породы и температуры.

но повышается минерализация растворов и осадение идет более интенсивно с большим разнообразием минералов.

Наиболее интересный и обсуждаемый вопрос – пути насыщения термальных растворов элементами, в том числе рудными. Была построена модель с проточными реакторами, целью которой было выявить различия в изменении состава флюидов и пород в зависимости от фазового состава флюида (рис. 9). Целью при создании модели было определение роли приповерхностных фазовых барьеров на перенос/переотложение элементов. В подповерхностном пространстве термальных полей происходят активные процессы изменения магматогенного флюида, про-

является множество геохимических барьеров, связанных как с изменением структуры разреза, так и со смешением с грунтовыми водами и атмосферным кислородом. В модели принято, что, прогрев разреза уже произошёл, и в подповерхностном пространстве (20 м) установились постоянные ТР условия. Как показывают предыдущие мониторинговые исследования, в термальных источниках в течение нескольких десятков лет сохраняются устойчивые физико-химические характеристики растворов, реагирующие лишь на сезонное разбавление атмосферными водами. Однако для предсказания переотложения элементов и, как следствие, образования эпитеpmальных месторождений необходимо понять динамику развития системы в течение нескольких сотен лет. Рассмотрены два варианта выхода на поверхность газогидротерм: а) подъем магматогенного флюида в виде высокотемпературного раствора с последующим вскипанием; б) подъем высокотемпературных магматогенных газов и конденсация в приповерхностном пространстве. Расчетное распределение содержания фаз (газ – раствор) во флюиде для рассматриваемых случаев показано на рисунке 9.

Пути миграции магматогенных флюидов и, как следствие, фазовые переходы в них определяют состав термальных растворов и фумарольных газов, которые фиксируются на поверхности термальных полей. В зависимости от условий миграции магматогенного флюида, отсутствия или наличия флюидопоров, в приповерхностном пространстве активных гидротермальных систем могут формироваться различные эпитеpmальные месторождения, связанные не с особенностями системы, поставляющей флюид, а с фазовыми барьерами, встречающимися на его пути (рис. 10).

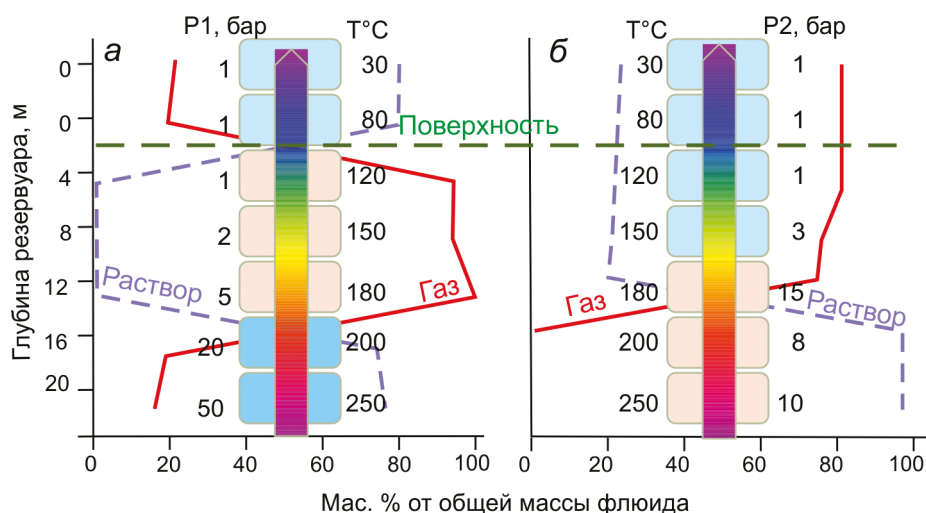


Рис. 9. Фазовый состав модели в зависимости от глубины для двух вариантов распределения температуры и давления.

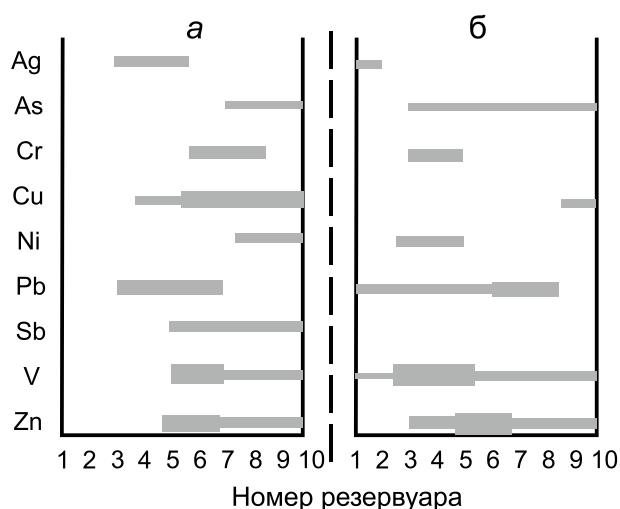


Рис. 10. Накопление рудных элементов в подповерхностной зоне (см. рис. 9) в зависимости от времени существования гидротермальной системы (соотношения вода/порода) и типа пути миграции (а, б).

По результатам термодинамических расчетов можно с уверенностью заключить, что подъем на поверхность ультракислых термальных растворов проходит без взаимодействия с вмещающими породами, по хорошо проработанным каналам. Таким образом, можно сделать вывод, что состав кислых растворов, разгружающихся на берегах озера, в значительной степени определяется магматической составляющей. Об этом также свидетельствует высокая минерализация этих растворов и наличие в них таких элементов, как Fe, Al, Zn, Ti, V, As, практически отсутствующих в нейтральных источниках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокая неравномерность в распределении элементов в растворах различных (хоть и рядом расположенных) котлов свидетельствует о действии механизма дифференциации, когда происходит избирательное концентрирование тех или иных элементов. В отношении анионогенов основным фактором, ответственным за уровень концентраций этих элементов в растворах, видимо, можно считать такие их геохимические свойства, как большую подвижность и способность отделяться совместно с серой в паро-газовую фазу. Содержание металлов в растворах регулируется процессами их осаждения и концентрирования на определенных геохимических барьерах с последующим вовлечением металлов в миграционный путь с поднимающимися растворами. Большой диапазон окислительно-восстановительного потенциала в растворах даже на поверхности (табл. 1) обусловлен, очевидно, еще большей контрастностью в значениях Eh

в глубоких частях системы. Наличие восстановительных условий способствует формированию минеральных фаз металлов, не устойчивых в условиях агрессивных кислых флюидов. Тем самым концентрации этих элементов будут определяться совокупностью факторов: физико-химическими условиями в той или иной части гидротермальной системы, наличием геохимических барьеров и активностью комплексов, связывающих металлы в минеральные фазы.

Взаимодействие флюида с породой приводит к защелачиванию флюида и насыщению его по всем компонентам. Важно подчеркнуть, что даже при больших соотношениях вода/порода = 20/1 на поверхность не будут подниматься кислые растворы. Происходит перераспределение вещества в разрезе – выносимые из нижней части элементы осаждаются выше и продолжают давать щелочную реакцию термальным растворам. Несмотря на высокую минерализацию и повышенное содержание всех макрокомпонентов, по микрокомпонентам растворы не достигают содержаний, фиксирующихся в термальных источниках. Так содержания хрома ниже на два порядка, никеля – на три, а по магнию содержание превышено на 2 порядка. Это в очередной раз подтверждает, что формирование ультракислых термальных растворов невозможно при взаимодействии с вмещающими породами. Для образования подобных терм необходимо наличие высокопроницаемого химически инертного канала, по которому флюиды поднимутся от приповерхностной магматической камеры до поверхности Земли.

Ещё одним из механизмов смены типа раствора могут быть геохимические барьеры, и наиболее эффективные из них – фазовые. До недавнего времени была возможность оценить их местоположение и принципы действия лишь на основе численного моделирования. В проведенных исследованиях с помощью методов бесконтактного геофизического зондирования построены карты, демонстрирующие геоэлектрическую зональность подповерхностного пространства термальных полей и подводных термальных выходов (рис. 6, 7). На разрезе отчетливо определены контрастные границы электропроводности среды, которые отражают изменение химического и фазового состава флюида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам термодинамических расчетов можно с уверенностью заключить, что подъем на поверхность ультракислых термальных растворов проходит без взаимодействия с вмещающими породами, по хорошо проработанным каналам.

В подповерхностном пространстве термальных полей фиксируются фазовые барьеры, которые, очевидно, не только способствуют смене химического состава растворов, но и представляют собой зоны концентрации химических элементов, в том числе и рудных.

Строение флюидопроводника определяет проявление газо-гидротермальной деятельности на поверхности и формирование геохимических аномалий внутри вулcano-гидротермальных систем. Важной особенностью является возможность формирования контрастных систем в пределах одной вулканической постройки.

Работа выполнена при финансовой поддержки РНФ, грант № 22-27-00618

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балков, Е. В., Манштейн А.К. Трехкатушечный индукционный зонд в частотном зондировании // Геофизический вестн. 2001. № 12. С. 17–20.
2. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Науч. мир, 2000. 304 с.
3. Мархинин Е.К. Вулканы острова Кунашир // Труды лаб. вулканологии. 1959. Вып. 17. С. 43–51.
4. Разжигаяева Н.Г., Ганзей Л.А. Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцен-голоцене. Владивосток: Дальнаука, 2006. 247 с.
5. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. 488 с.
6. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справочное пособие. Л.: Химия, 1982. 592 с.
7. Фазлуллин С.М., Батоян В.В. Донные соадки кратерного озера вулкана Головнина // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 44–55.
8. Федорченко В.И. Основные этапы послекальдерного периода формирования вулкана Головнина (о. Кунашир) // Тр. СахКНИИ. 1962. Вып. 12. С. 127–141.
9. Чудненко К.В. Теория и программное обеспечение метода минимизации термодинамических потенциалов для решения геохимических задач: Автореф. дис. ... док-ра геол.-минер. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 54 с.
10. Aiuppa A., Allard P., d'Alessandro W. et al. Mobility and fluxes of major, minor and trace metals during basalt weathering and groundwater transport at Mt. Etna volcano (Sicily) // Geoch. Cosmoch. Acta. 2000. V. 64. P. 1827–1841.
11. Aizawa K., Ogawa Y., Ishido T. Groundwater flow and hydrothermal systems within volcanic edifices: Delineation by electric self-potential and magnetotellurics // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. B01208.
12. Berman R.G. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ // J. Petrol. 1988. V. 29. P. 445–522.
13. Bortnikova S.P., Bortnikova S.B., Gora M.P. et al. Boiling Mud Pots: Origin and Hydrogeochemistry (Donnoe and North-Mutnovsky Fumarolic Fields, Mutnovsky Volcano; South Kamchatka, Russia) // Proceedings World Geothermal Congress, 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010. 1480. pdf – 7 p.
14. Chase M.W., Jr., Davies C.A., Downey J.R., Jr. et al. JANAF Thermodynamical Tables Third Edition // J. Phys. and Chem. Reference Data. 1985. V. 14. Supplement 1. Part 1. 926 p.; P. 2. 1856 p.
15. Corwin R.F., Hoover D.B. The Self-Potential Method in Geothermal Exploration // Geophysics. 1979. V. 44. P. 226–245.
16. Finizola A., Llinat J.F., Macedo O. et al. Fluid circulation and structural discontinuities inside Misti volcano (Peru) inferred from self-potential measurements // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004. V. 135. P. 343–360.
17. Ghiorsio M.S., Sack R.O. Chemical mass transfer in magmatic processes. IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1995. V. 119. P. 197–212.
18. Holland T.J.B., Powell R. An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{MnO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{C}-\text{H}_2-\text{O}_2$ // J. Metamorphic Geol. 1990. V. 8. P. 89–124.
19. Johnson J.W., Oelkers E.H., Helgeson H.C. SUPCRT92: software package for calculating the standard molal thermodynamic properties of mineral, gases, aqueous species, and reactions from 1 to 5000 bars and 0° to 1000 °C // Computers Geosci. 1992. V. 18. P. 899–947.
20. Kagiya T., Utada H., Ueshima M. et al. Resistivity structure of the central and the southeastern part of Kirishima Volcano // Bull. Volcanol. Soc. Jpn. 1996. V. 41. P. 215–225.
21. Kanda W., Tanaka Y., Utsugi M. et al. A preparation zone for volcanic explosions beneath Naka-dake Crater, Aso Volcano, as inferred from magnetotelluric surveys // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2008. V. 178. P. 32–45.
22. Keller G.V., Rapolla A. Electrical prospecting methods in volcanic and geothermal environments // Physical Volcanology / L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo, A. Rapolla (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 1974.
23. Lorne B., Perrier F., Avouac J.P. Streaming potential measurements. 1. Properties of the electrical double layer from crushed rock samples // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 17857–17877.
24. Mogi T., Nakama S. Magnetotelluric interpretation of the geothermal system of the Kuju Volcano, Southwest Japan // J. Volcanol. Geotherm. Res. 1993. V. 56. P. 297–308.
25. Pribnow D.F.C., Schütze C., Hurter S.J. et al. Fluid flow in the resurgent dome of Long Valley Caldera: implications from thermal data and deep electrical sounding // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2003. V. 127. P. 329–345.
26. Revil A., Pezard P.A., Glover P.W.J. Streaming potential in porous media. 1. Theory of the zeta potential // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 20021–20031.
27. Revil A., Leroy P. Hydroelectric coupling in a clayey material // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 1643–1646.
28. Revil A., Finizola A., Sortino F., Ripepe M. Geophysical investigations at Stromboli volcano, Italy: implications for ground water flow and paroxysmal activity // Geophys. J. 2004. Int. 157, 426–440. doi:10.1111/j.1365-246X.2004.02181.x.

29. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (105 Pascals) pressure and at higher temperatures // U.S. Geol. Survey Bull. V. 2131. Washington, 1995. 461 p.
30. Shock E.L., Sassani D.C., Willis M., Sverjensky D.A. Inorganic species in geologic fluids: Correlations among standard molal thermodynamic properties of aqueous ions and hydroxide complexes // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61, N 5. P. 907–950.
31. Sverjensky D.A., Shock E.L., Helgeson H.C. Prediction of the thermodynamic properties of aqueous metal complexes to 1000 °C and 5 kb // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61, N 7. P. 1359–1412.
32. Varekamp J.C., Ouimette A.P., Herman S.W. et al. Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina // Appl. Geochem. 2009. V. 24. P. 208–220.
33. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // J. National Chemical Lab. Industry. 1988. V. 83. P. 27–121.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым
после доработки 21.09.2022 г.
принята к печати 27.09.2022 г.

E.P. Shevko, M.P. Gora, S.P. Kokhanova, G.L. Panin

Thermal water formation in present-day active volcanoes: a case study of the Golovnin caldera (Kunashir Island, Kuril Islands)

The article presents the results of multi-year comprehensive geochemical and geophysical studies concerned with the caldera of the Golovnin volcano. The chemical composition of thermal solutions and condensates are discussed. Geophysical data within sections including discharge zones of geothermal waters associated with gas from hot springs were interpreted to examine the formation of chemical composition of fumarole gases and thermal solutions. The quantitative composition of the interacting media was identified and physicochemical models were built based on the actual data. Considering these models and the results of studying the subsurface area of thermal fields, the most probable physicochemical conditions for fluid ascent from depth to the surface are proposed.

***Key words:* geochemistry, volcanology, thermal fields, electrical survey, physical and chemical modeling, Golovnin volcano, Kunashir Island, Kuril Islands.**