

УДК 551.21/23

ВЕРХНЕ-ЮРЬЕВСКИЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ: ЭВОЛЮЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА (1952–2022 гг.) В СВЯЗИ С ПЕРИОДАМИ АКТИВИЗАЦИИ ВУЛКАНА ЭБЕКО (О. ПАРАМУШИР)

© 2025 г. Е. Г. Калачева*, Т. А. Котенко, Е. В. Волошина,
Д. Ю. Эрдниева, Д. В. Мельников

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9,
Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия*

**e-mail: keg@kscnet.ru*

Поступила в редакцию 16.04.2024 г.

После доработки 29.07.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Представлен химический состав термальных вод, разгружающихся на северо-западном склоне действующего вулкана Эбеко в долине р. Юрьева. На основании многолетних режимных наблюдений за эволюцией химического и изотопного состава дается оценка отклика вулканических событий на состояние гидротермальной системы. Показано, что фреато-магматические извержения вулкана предвещают изменение химического и изотопного составов термальных вод за счет увеличения потока магматических летучих, поступающих в систему. В источниках наблюдается увеличение концентраций анионогенных компонентов (хлорид-, сульфат- и фторид-ионов) с единовременным утяжелением изотопов кислорода и водорода (дейтерия) в направлении “андезитовых” вод. Учитывая, что изменения были выявлены за несколько месяцев до начала извержения, подобные геохимические эффекты могут служить прогностическими маркерами при слежении за состоянием вулкана.

Ключевые слова: река Юрьева, остров Парамушир, гидрогеохимия, термальные воды

DOI: 10.31857/S0203030625010023, EDN: HGXQDO

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее активных вулканов Курильских островов является вулкан Эбеко, находящийся в северной части о. Парамушир. К его постройке приурочена локальная гидротермальная система. Основной геотермальный резервуар находится на глубине ~300 м от краевой зоны и содержит кипящий ультракислый хлоридно-сульфатный раствор с температурой >200–210°C [Kalacheva et al., 2016]. Латеральный сток осуществляется преимущественно в северо-западном направлении. Разгрузка вод происходит в 2.5 км от активного кратера вулкана в долине р. Юрьева в виде серии нисходящих высокодебитных Верхне-Юрьевских источников.

Верхне-Юрьевские источники — один из ярких представителей ультракислых термальных

вод (ASC-воды (Acid Sulfate-Chloride) [Taran, Kalacheva, 2020]), основной механизм формирования которых сводится к конденсации вулканических паров в близповерхностных условиях и/или растворение “кислых” магматических летучих (SO₄, Cl, HF) в аэрированных подземных водах с образованием смеси кислот [Giggenbach, 1997; и др.]. Большинство ASC-вод обнаружены и описаны в Японии [Kimbara, Sakaguchi, 1989; Sasaki, 2018] и на Курильских островах [Мархинин, Стратула, 1977; Калачева, Котенко, 2013; Калачева, Волошина, 2022; Калачева и др., 2021, 2022, 2023; Kalacheva et al., 2016; и др.], встречаются подобные воды в Индонезии [Delmelle et al., 2000; Mazot et al., 2008; Caudron et al., 2018; и др.], Аргентине [Varekamp et al., 2009], Колумбии [Sturchio et al.,

1988; Torres-Ceron et al., 2019] и других странах, расположенных вдоль Тихоокеанского побережья. Наиболее полный обзор по ультракислым вулканическим водам мира, разгружающимся в виде термальных источников, сделан в работе [Taran, Kalacheva, 2020].

Химический и изотопный составы, температура ультракислых вод чрезвычайно непостоянны. Помимо сезонных и краткосрочных вариаций, вызванных изменением количества осадков и таянием снега, т.е. различной степенью разбавления, эти воды испытывают значительные изменения в соотношениях между компонентами, связанные с периодами активности вулканов, постройки которых вмещают гидротермальные системы. Как показано в ряде случаев, индикаторами активности могут служить отношение SO_4/Cl и изотопный состав серы растворенного сульфата (см. обзор [Taran, Kalacheva, 2020] и ссылки в нем). Так, увеличение отношения SO_4/Cl наблюдалось в источниках вулкана Копануэ одновременно с извержением 2000 г. [Varekamp et al., 2009], что связывалось с внедрением новой магмы в систему с дегазацией глубинного флюида во время подъема. Увеличение концентраций сульфат- и хлорид-ионов, наряду с другими факторами, зафиксированное в 2018 г. в кратерном озере вулкана Малый Семячик, свидетельствовало о наступлении нового периода его активизации после длительного периода покоя, выраженном в увеличении поступления магматических летучих (в первую очередь HCl и SO_2) в гидротермальную систему вулкана [Taran et al., 2021]. Вместе с тем, на примере кипящих источников Обуки, геохимический мониторинг которых осуществляется уже 70 лет, показано, что отклик гидротермальной системы может произойти не только до или в период повышенной активности вулкана, но и спустя много лет после окончания события [Ueda et al., 2021].

Ввиду своей труднодоступности, постоянные режимные наблюдения за Верхне-Юрьевскими источниками не проводятся. Авторы, по мере возможности, проводят исследования в долине р. Юрьева с 2003 г., в результате чего накоплен значительный массив данных, частично использованных в публикациях разных лет [Калачева, Котенко, 2013; Калачева, Волошина, 2022; Kalacheva et al., 2016].

В 2016 г. началось извержение вулкана Эбеко, продолжающееся и в 2024 г. Опубликованных данных о том, как отреагировала гидротермальная система на события, происходящие на вулкане, до настоящего времени нет. Только в работе [Калачева, Таран, 2019] отражено изменение изотопного состава (δD , $\delta^{18}\text{O}$) Верхне-Юрьевских источников, произошедшее в период 2016–2017 гг. в сравнении с 2014 г. Кроме того, в сентябре 2017 г. по долине р. Юрьева сошел селевой поток, изменивший русло реки [Котенко, Котенко, 2018]. Изменения коснулись и района разгрузки термальных вод [Котенко и др., 2020].

Учитывая вышесказанное, целью данной работы является изучение эволюции химического состава воды Верхне-Юрьевских источников в связи с изменением состояния вулкана Эбеко, используя данные многолетних режимных наблюдений. Основные задачи включают: а) описание местоположения и условий разгрузки термальных вод по состоянию на август 2022 г.; б) детальное изучение изменения химического и изотопного составов вод источников, как по площади распространения, так и во времени; в) выявление возможных причин колебаний концентраций макрокомпонентов и их соотношений во времени; г) поиск геохимических индикаторов отклика гидротермальной системы на извержения вулкана Эбеко.

В основу данной работы легли результаты собственных многолетних наблюдений авторов (с 2003 по 2022 г.), а также все доступные опубликованные данные и фондовые материалы за весь период наблюдения за вулканом (с 1952 г.).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВУЛКАНА ЭБЕКО

Вулкан Эбеко, расположенный в северной части хребта Вернадского (рис. 1), имеет сложное строение. Основными морфологическими элементами являются несколько слившихся в единый вулканический хребет конусов разного возраста и сохранности с крупными кратерами наверху [Мелекесцев и др., 1993]. Согласно цитируемой статье, формирование постройки вулкана началось ~2400 лет назад. На первом этапе происходили излияния лавовых потоков и поступление пирокластического материала, сменившиеся впоследствии эксплозивными извержениями (фреатическими /

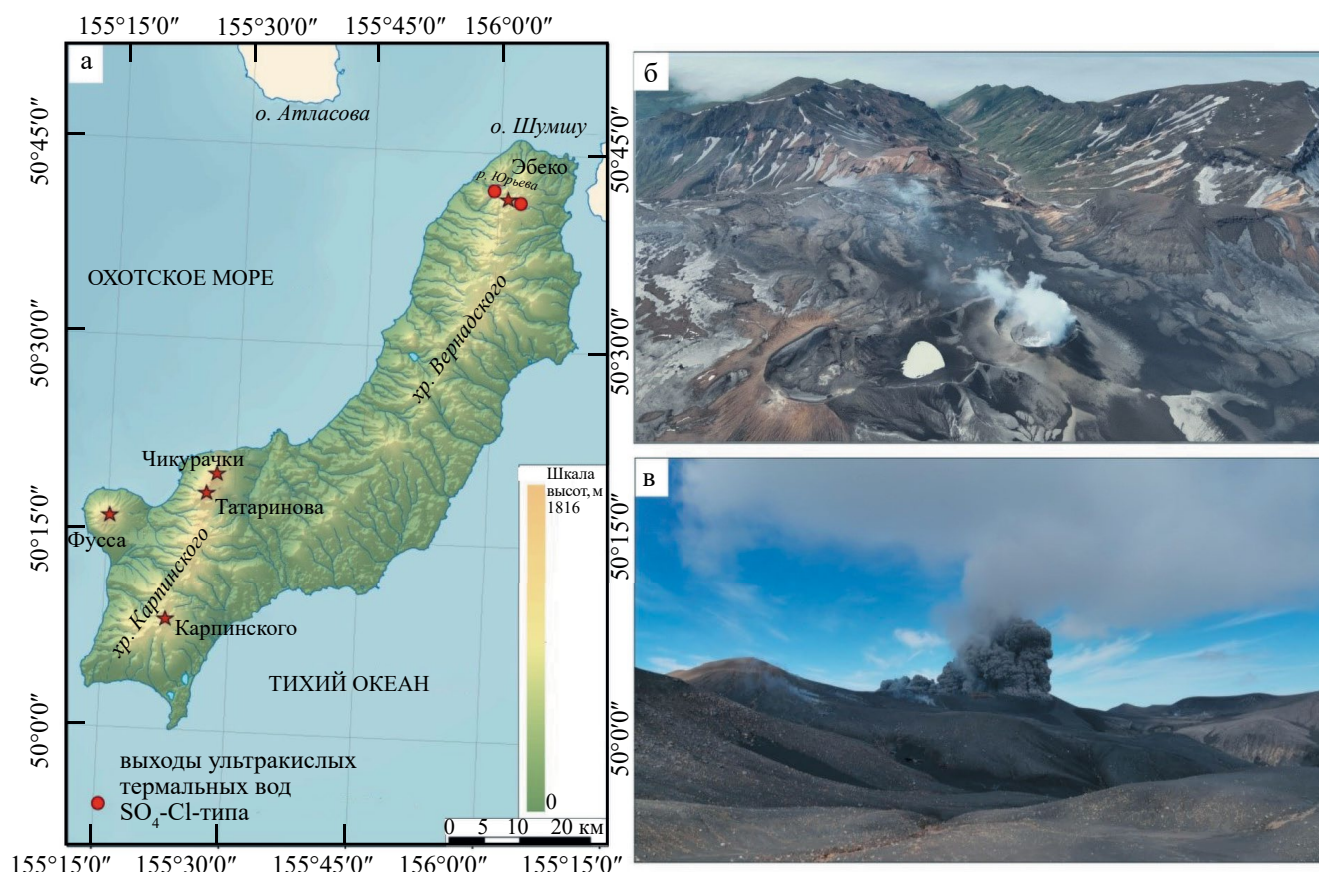


Рис. 1. Остров Парамушир (а) и вулкан Эбеко: вид на кратеры вулкана и долину р. Юрьева (б). Фото Т. Котенко. Привершинная часть вулкана, начало пеплового выброса из кратера Корбута и фумаролы восточного склона (в). Фото Е. Калачевой.

фреато-магматическими). Современный этап вулканической активности начался с сильно-го фреато-магматического извержения 1934—1935 гг. Эксплозии происходили из меридиональной трещины на дне Среднего кратера с выбросом пепла и крупных бомб андезитового состава [Горшков, 1954]. Следующие крупные периоды активизации происходили в 1963—1967 гг., 1987—1989 гг., 2005—2011 гг. [Belousov et al., 2021]. Текущее извержение началось осенью 2016 г. и продолжается в настоящее время [Котенко и др., 2018, 2019, 2022, 2023; Belousov et al., 2021; Walter et al., 2020]. Продукты извержения представлены пеплами и бомбами андезитового состава [Котенко и др., 2023].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕРХНЕ-ЮРЬЕВСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Источники расположены в верховьях р. Юрьева, дренирующей крупную (диаметром

до 2 км) эрозионную кальдеру, возникшую в период оледенения на месте плейстоценового вулкана Влодавца [Родионова и др., 1966] (рис. 2). В настоящее время кальдера представляет собой открытый в западном направлении амфитеатр, расчлененный глубокими барранкосами. Высота обрывов кальдеры составляет около 300 м. Сохранившиеся части постройки вулкана, вскрывающиеся в бортах, сложены толщей гидротермально измененных опализированных агломератов, переслаивающихся лавовыми потоками, представленными двупроксеновыми андезибазальтами [Опыт ..., 1966]. Общая площадь измененных пород составляет более 15 км² при видимой мощности 200—250 м [Зеленов и др., 1965].

Начало исследований Верхне-Юрьевских источников относится к середине XX века. Они были открыты в ходе геологических поисковых работ в 1952 г., первое упоминание и первые данные о химическом составе вод приводится

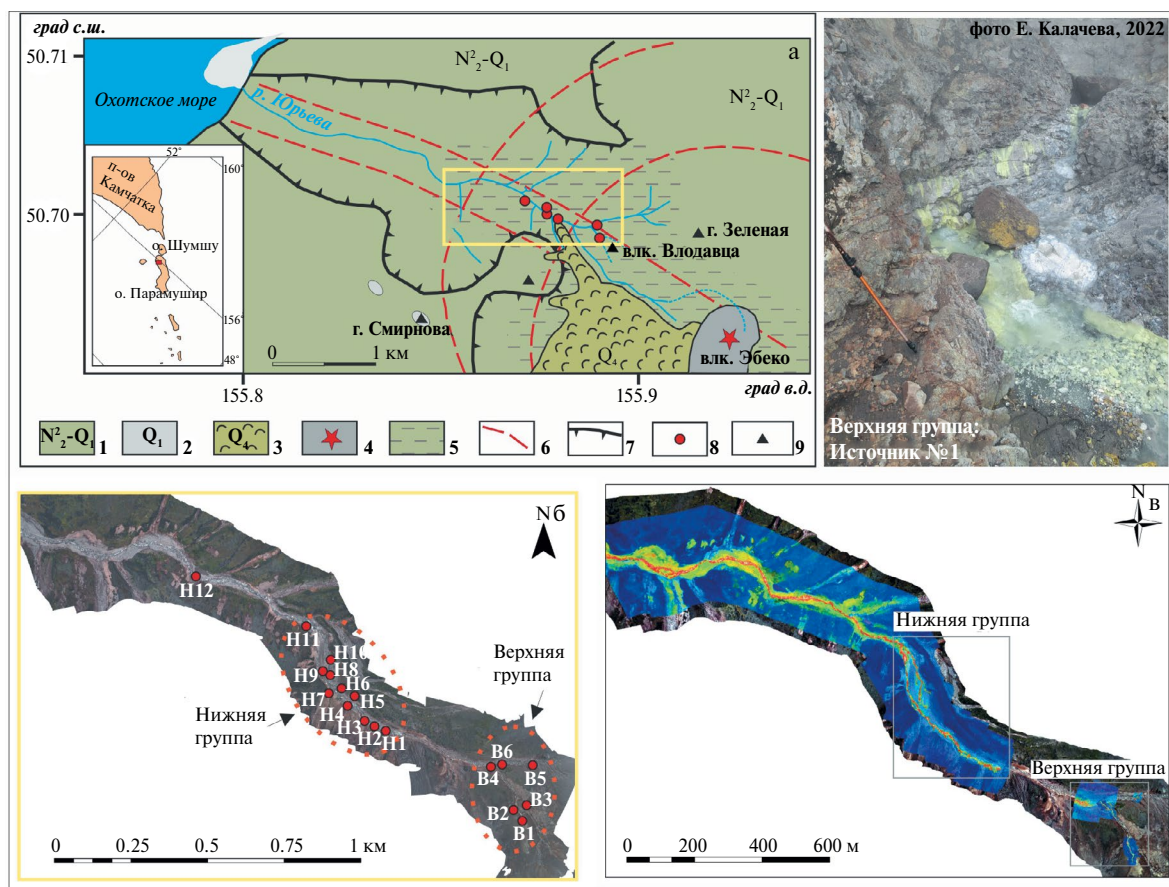


Рис. 2. Схема геологического строения долины р. Юрьева [Калачева, Котенко, 2013] (а). На врезке местоположение о. Парамушир. Ортофотоплан верховья р. Юрьева с точками отбора водных проб (б) и инфракрасная съемка долины р. Юрьева (в). 1 – лавово-пирокластические покровные образования андезитов, андезибазальтов, базальтов (N_2-Q_1), 2 – экструзии андезитов (Q_1), 3 – лавы андезитового и андезибазальтового состава (Q_4), 4 – современный лавово-пирокластический конус вулкана Эбеко (Q_4), 5 – область распространения гидротермально-измененных пород, 6 – тектонические нарушения (линейные и кольцевые), 7 – границы вулкана Влодавца, 8 – Верхне-Юрьевские источники, 9 – потухшие вулканы.

в Геологическом Отчете¹. Источники ежегодно посещались исследователями в период с 1955 по 1961 г., результаты опробований этого периода представлены в работах [Иванов, 1957; Сидоров, 1966; Родионова и др., 1966; и др.]. В.В. Ивановым [1957 г.] впервые были определены условия образования Верхне-Юрьевских источников как “фумарольных терм глубинного формирования” за счет взаимодействия подземных вод, циркулирующих в постройке вулкана, с вулканическими газами. Их геохимическая роль в выносе порообразующих элементов в акваторию Охотского моря рассматривалась в работах [Зеленов и др., 1965; Никитина, 1978;

Фазлуллин, 1999; Калачева, Котенко, 2013], объемы выноса магматических летучих представлены в статье [Kalacheva et al., 2016]. В работах последних десятилетий [Бортникова и др., 2006; Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016] приводятся данные по широкому кругу микроэлементов, рассматриваются условия формирования данных термальных вод.

Несмотря на значительный интерес к Верхне-Юрьевским источникам, детального их описание до настоящего времени не было сделано, во всех публикациях дана только краткая информация. Наиболее полная схема расположения выходов по состоянию на 1980-е гг. показана в работе [Фазлуллин, 1999]. На основании собственных многолетних наблюдений авторов, с учетом данных аэрофото- и инфракрасной съемки, в этой работе представлена

¹ Власов Г.М. Основные черты геологического строения и серные месторождения острова Парамушир (Большой Курильской дуги) // Отчет о поисковых работах Парамуширской партии № 17 в 1952 г. Петропавловск-Камчатский, 1953. 281 с.

детальная характеристика выходов термальных вод в долине р. Юрьева по состоянию на 2022 г.

Выходы термальных вод локализованы двумя отдельными группами на пересечении широтного разлома вдоль долины реки с разрывными нарушениями северо-западного простирания, представляющими собой часть кольцевых разрывных нарушений². Первая группа сосредоточена на небольшом участке вдоль левого притока р. Юрьева — руч. Горячий. Вторая группа начинается ниже по течению р. Юрьева вблизи фронта молодого лавового потока вулкана Эбеко, спустившегося в долину реки (см. рис. 2).

В первую группу входят шесть основных выходов и серия мелких источников с незначительными дебитами. Самым верхним является “Источник № 1” (см. рис. 2б, т. В1), расположенный на высоте 560 м над уровнем моря в устье русла (“сухого” в летне-осеннюю межень) небольшого руч. Горячий. Разгрузка горячих ($T > 80^{\circ}\text{C}$) вод осуществляется из трещины в гидротермально-измененных породах и сопровождается осаждением коллоидной серы, формирующей желтый налет на камнях вниз по течению ручья. До недавнего времени основной выход термальных вод располагался у уреза воды на покатом ложе водотока, что вносило определенные трудности при опробовании в летний период. Во время весенне-летнего паводка 2022 г. произошло обрушение части борта ручья с формированием уступа в районе расположения источника. В результате термовыводящая трещина расширилась, источник сместился вправо, за пределы влияния поверхностных вод. Вблизи источника порода покрыта сетью мелких трещин, из которых также сочится термальная вода (см. рис. 2). “Источник № 1” выбран в качестве режимного объекта наблюдений благодаря: 1) местоположению (самый гипсометрически высоко расположенный выход); 2) максимальным в верхней группе источников физико-химическим параметрам (наибольшие температура и минерализация, наименьший pH) и концентрациям целого ряда элементов. Зона разгрузки прослеживается серией источников с малыми дебитами, вытекающими из трещин по обоим бортам ручья.

² Леонов В.Л. Оценка перспективности района г. Северо-Курильска на термальные воды // Отчет. Петропавловск-Камчатский, 1990. 33 с.

Следующие крупные выходы находятся уже в устьевой зоне ручья. Здесь, на разном удалении от русла расположено несколько источников с более низкой, чем у “Источника № 1” минерализацией (4–6 г/л) и температурой ($35\text{--}40^{\circ}\text{C}$) и более высоким pH (1.6–1.8). Один из них находится в каменном развале непосредственно вблизи устья (ист. “Устьевой”, см. рис. 2б, т. В4). Источник “Дальний” (см. рис. 2б, т. В5) представляет собой два рядом расположенных выхода во фронтальной части осыпных отложений, формирующих единый ручей, впадающий непосредственно в р. Юрьева. Еще один (ист. “Ближний”, см. рис. 2б, т. В6) вытекает из-под сцементированных отложений старого селевого конуса выноса. В руслах сформированных ручейков источников “Дальний” и “Ближний” развиваются зеленые термофильные водоросли. Абсолютная высота выходов 500–517 м.

Вторая, более мощная и протяженная группа источников начинается у окончания лавового потока вулкана Эбеко (см. рис. 2б, 2в), спускающегося к руслу р. Юрьева. Расстояние между устьем руч. Горячий и первым источником “У лавового потока” (см. рис. 2б, т. Н1) составляет 350–360 м. Высотная отметка этого выхода — 430 м. Разгрузка осуществляется из трещин в измененных породах, частично перекрытых свежей осыпью. Ниже по течению находятся более 20 однотипных локальных выходов с дебитами от 1–2 до 5 л/с у уреза воды или непосредственно в русле р. Юрьева. Все они высокотемпературные ($T < 75^{\circ}\text{C}$), высокоминерализованные (M до 14 г/л) с низкими значениями pH (< 1.2). Разгрузка осуществляется по обеим сторонам реки из гидротермально проработанных лав, слагающих ее борта и ложе. Выход термальных вод сопровождается осаждением водорастворимых, преимущественно серосодержащих минералов, выступающих на пропаренных участках по краям сформированных ручейков и на камнях, расположенных рядом. В периоды дождей и паводков эти отложения смываются в русло р. Юрьева. Протяженность выходов этой группы составляет 400 м, перепад высот от верхнего источника до нижнего достигает 70 м. Река Юрьева, собирающая весь термальный сток нагревается. Повышенная температура реки прослеживается на большое расстояние и ниже расположения источников (см. рис. 2в).

До осени 2017 г. нижние источники второй группы, включая т. Н11, находились на расстоянии ~30 м от уреза воды. Они характеризовались более низкой температурой ($<50^{\circ}\text{C}$), более высоким рН (до 1.6) и меньшей минерализацией (7–9 г/л) по сравнению с источниками, расположенными вблизи уреза воды. После схода в 2017 г. по долине реки селевого потока [Котенко, Котенко, 2018], “пропахавшего” долину до самого устья, часть рыхлого материала с берегов была снесена вниз по течению. На отдельных участках русло реки углубилось более чем на 1 м, в других — переместилось на несколько метров. В результате этого вскрылись некоторые источники, которые ранее находились под водой и определялись только по повышенной температуре водотока. Снос осадочного чехла по левому борту реки в районе нижних источников позволил определить истинные выходы некоторых источников. Обнаружилось, что их разгрузка также осуществляется из трещин в гидротермально измененных породах выше по течению (до 100 м) от прежнего места выхода. То есть, часть источников была перекрыта аллювиальными отложениями, а уменьшение их температуры и минерализации определялось охлаждением воды в процессе дренажа под осадочным чехлом и возможным смешением с грунтовым стоком. Самый крупный такой источник (ист. “У увала”, см. рис. 26, т. Н10) дебитом 8–10 л/с разгружается на правом берегу реки из-под увала, сложенного отложениями старых селевых потоков. За все время наших наблюдений этот источник демонстрировал самый большой разброс значений температуры и минерализации, что будет более детально рассмотрено ниже.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАБОТ

Опробование вод р. Юрьева и Верхне-Юрьевских термальных источников (далее в тексте ВЮ-источники) проводилось в летне-осеннюю межень на протяжении последних 20 лет (в 2003, 2005, 2010, 2013, 2014, 2016, 2017, 2019, 2020, 2022 гг.). Результаты 2010 и 2014 гг. частично использованы в работах [Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016]. В точках отбора проб с помощью портативных мультипараметровых анализаторов измерялись физико-химические

параметры воды (рН, Eh и температура, $^{\circ}\text{C}$). Для отделения растворенной части и тонких коллоидов от взвеси, пробы воды фильтровались на месте отбора через мембранный фильтр 0.45 μ . Для последующего общего химического анализа водные пробы помещались в специальную пластиковую тару объемом 0.5 л, а для анализа микрокомпонентов — в отдельные контейнеры объемом 15 мл. Поскольку природный рН воды источников имеет значение менее 2, дополнительного подкисления не проводилось.

Аэрофотосъемка долины р. Юрьева проводилась 05.08.2022 г. при помощи БПЛА DJIMavic 2 Enterprise Advanced. На данном аппарате установлена двойная фотокамера (модель FC2403), которая позволяет делать снимки в видимом и тепловом инфракрасном диапазонах. На основе проведенной съемки были построены два (в видимом и инфракрасном диапазоне) ортофотоплана долины реки на участке расположения источников.

Анализ макрокомпонентов в водных пробах выполнялся авторами в Лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН. Определение концентраций Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , F^- , Cl^- , SO_4^{2-} производилось на ионном хроматографе Metrohm 883. Содержание SiO_2 и бора определялось фотоколориметрическим методом, Al, Fe — методом атомной адсорбции. Для графического отображения геохимических данных и интерпретации результатов использован программный пакет OriginPro 2024.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав термальных вод

В табл. 1 приведен макрокомпонентный состав вод ВЮ-источников по состоянию на 2022 г. Среди анионов обеих групп ВЮ-источников преобладают серосодержащие ионы ($\text{SO}_4^{2-} + \text{HSO}_4^-$) и Cl^- . Основными компонентами катионной части являются Al^{3+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} . Как в Верхней, так и в Нижней группах есть два вида выходов термальных вод, отличающихся по физико-химическим показателям и минерализации. Источники, приуроченные к трещинным измененным лавам, характеризуются высокими температурами, большей минерализацией и самым низким значением рН (1.2–1.4).

Таблица 1. Химический состав Верхне-Юрьевских источников по данным опробования 2022 г. (мг/л)

Проба	Место отбора	Шифр	T, °C	pH _{лаб}	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe _{общ.}	Al ³⁺	SiO ₂	Минерализация, г/л
Верхняя группа															
Ос-75/22	“Источник № 1” (л/б)	B1	88	1.25	54.3	2232	6517	168	75.5	307	127	180	329	315	10.32
Ос-76/22	источник ниже “Ист. № 1” (л/б)	B2	84	1.28	50.2	2061	5798	162	74.6	302	125	180	334	316	9.42
Ос-78/22	Источник (л/б)	B3	56	1.64	32.1	1123	3554	134	63.3	245	93.2	177	300	222	5.96
Ос-80/22	ист. “Устьевой” (л/б)	B4	65	1.40	41.1	1535	4703	131	64.8	246	100	162	302	264	7.56
Ос-74/22	ист. “Дальний” (л/б)	B5	38	1.76	24.2	796	2560	84.1	53.6	147	51.7	76.6	219	162	4.18
Ос-79/22	ист. “Ближний” (л/б)	B6	43	1.76	23.4	775	2429	81.1	49.5	141	55.8	77.6	214	172	4.03
Нижняя группа															
Ос-82/22	ист. “У лавового потока 1” (л/б)	H1	85	1.25	53.3	1988	5850	164	80.9	302	126	188	343	319	9.43
Ос-81/22	ист. “У лавового потока 2” (л/б)	H2	85	1.26	51.9	1954	5832	161	82.4	296	123	194	356	312	9.38
Ос-83/22	Источник (л/б)	H3	77	1.34	48.6	1737	5153	151	80.0	275	115	185	358	275	8.39
Ос-84/22	Источник (л/б)	H4	74	1.38	51.4	1873	5688	166	82.6	313	122	234	431	404	9.38
Ос-85/22	Источник (п/б)	H5	88	1.29	56.4	1903	5592	165	83.4	303	125	186	374	282	9.08
Ос-86/22	Источник (п/б)	H6	81	1.38	54.5	1819	5512	168	83.7	303	126	183	425	320	9.01
Ос-87/22	Источник (л/б)	H7	67	1.58	38.6	1375	3853	134	64.3	266	107	132	366	253	6.60
Ос-88/22	Источник (п/б)	H8	71	1.47	44.3	1590	4634	154	77.7	286	117	157	388	294	7.76
Ос-89/22	Источник (л/б)	H9	75	1.56	43.6	1636	4818	150	73.6	297	119	144	388	305	7.99
Ос-90/22	ист. “У увала” (п/б)	H10	48	1.64	22.9	1104	3237	120	64.4	200	83.7	116	299	209	5.44
Ос-91/22	ист. “Крайний” (л/б)	H11	53	1.76	32.0	1153	3287	133	64.1	261	96.7	139	339	239	5.75
Ос-92/22	Ист. “Лимонитовая стенка” (л/б)	H12	19	3.33	4.3	183	669	48.9	17.3	96.0	30.4	1.61	61.5	131	1.25

Примечание. п/б — правый берег р. Юрьева, л/б — левый берег р. Юрьева.

Средний диапазон температур таких выходов составляет 80–90°C, минерализация колеблется в пределах 9–10 г/л. Концентрации SO_4^{2-} и Cl^- достигают 6.5 г/л и 2.2 г/л соответственно. Максимальные содержания Al^{3+} (425 мг/л), Ca^{2+} (312 мг/л) и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ (234 мг/л), а также SiO_2 (404 мг/л) обнаружены в источниках Нижней группы. Для всех источников характерно повышенное значение бора (2–5.3 мг/л) и марганца (3–7 мг/л). Источники, вытекающие среди каменных развалов или из-под отложений старых селевых потоков, имеют более низкие температуры, меньшую минерализацию и более высокий pH (см. табл. 1).

Как уже отмечалось нами ранее [Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016], содержания анионов и общая минерализация ВЮ-источников напрямую связаны с их температурой. В наиболее горячих источниках наблюдаются самые высокие концентрации Cl^- и SO_4^{2-} , а также максимальное количество растворенных солей в целом (рис. 3). В распределении точек по группам нет отличий, все точки попадают в одно поле и формируют единый тренд, отражающий положительную корреляцию между компонентами. Подобное распределение указывает на существенное влияние процессов разбавления термальных вод холодными грунтовыми водами в зоне разгрузки без изменения исходного гидрохимического типа вод. Следует отметить, что точки составов вод в 2003–2020 гг., находясь в границах общего тренда, в большинстве своем располагаются на графиках выше данных 2022 г., что связано с более высокими концентрациями анионов и большей минерализацией в этот период.

В соотношениях между катионами и анионами в обеих группах ВЮ-источников также наблюдается высокая корреляция (рис. 4). Кроме того, распределение точек указывает на то, что источники Нижней группы не являются дериватами Верхней группы, а представляют собой индивидуальный выход термальных вод. В дополнение к полученной температурной зависимости от степени разбавления грунтовыми водами, в пределах каждой группы также хорошо отбивается влияние грунтовых вод на снижение концентрации элементов. Соотношения макрокомпонентов остаются постоянными

во всех источниках, указывая на единые условия формирования.

Как показано в обзоре [Taran, Kalacheva, 2020], многие ASC-воды имеют высокие концентрации фтора и низкие отношения Cl/F , что служит одним из показательных индикаторов непосредственного магматического вклада в их формирование (рис. 5а, зона “магматических вод”). Вблизи этой зоны находится область составов высокотемпературных вулканических газов (относительных концентраций HCl , $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S}$ и HF). Составы Верхне-Юрьевских источников занимают единую компактную область в зоне “магматических вод” со средним молярным отношением $\text{SO}_4/\text{Cl} = 1$ и концентрациями $\text{F}^- = 50\text{--}60$ мг/л. Расположение точек вдоль единой линии $\text{SO}_4/\text{Cl} = 1$ (см. рис. 5б) указывает на простое смешение метеорных вод с единым исходным водным флюидом с высокими содержаниями сульфат- и хлорид-ионов.

Для Верхне-Юрьевских источников характерно суммарное распределение катионов ($\text{Al} + \text{Fe}/\text{Ca} + \text{Mg}/\text{Na} + \text{K}$) близкое к породному (см. рис. 5в). В качестве исходной породы взяты недавно опубликованные [Котенко и др., 2023] составы разновозрастных андезитов вулкана Эбеко. Хорошо видно, что точки, отражающие составы Верхне-Юрьевских источников концентрируются вблизи более древних пород плейстоценового возраста.

Изменение химического и изотопного состава термальных вод во времени

Верхне-Юрьевские источники имеют продолжительную историю исследований с начала 1950-х гг. Сравнительный анализ гидрохимических данных за длительный период наблюдений может помочь выявить особенности в общей изменчивости компонентного состава источников и определении отклика на эруптивную активность вулкана Эбеко. Основными процессами, контролирующими изменение химического состава ультракислых термальных вод во времени, могут быть: а) сезонные колебания, вызванные изменением метеорного питания; б) трансформация условий формирования вод в питающем резервуаре в ответ на изменение состояния вулкана-хозяина.

Как показали наши исследования, сезонным колебаниям наиболее подвержены источники

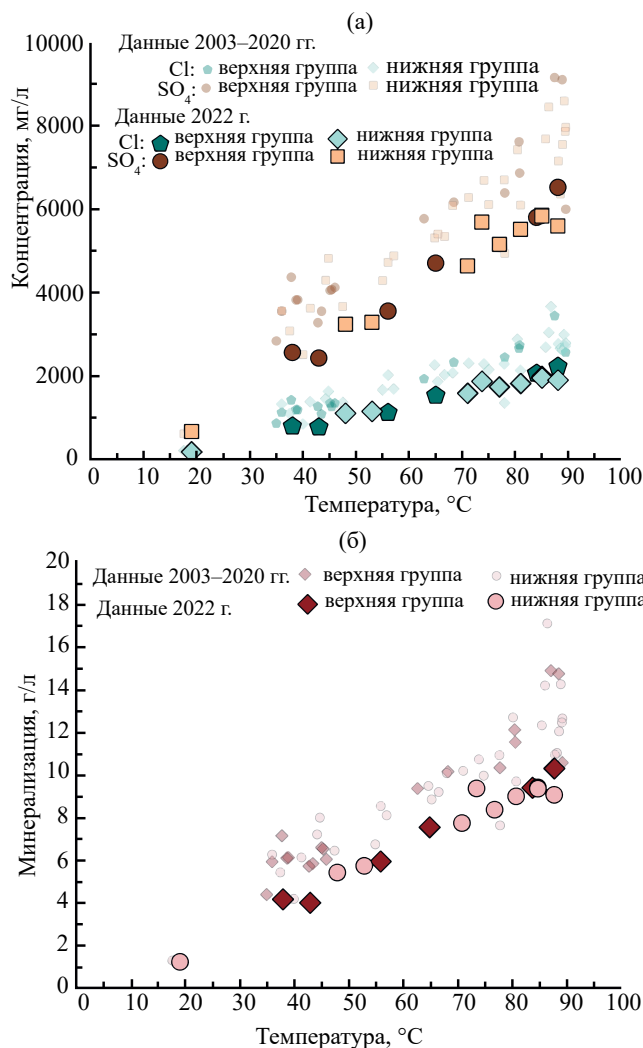


Рис. 3. Корреляция содержания Cl^- и SO_4^{2-} (а), минерализации (б) с температурой воды источников.

с более низкой температурой и минерализацией. Все они приурочены к рыхлому осадочному чехлу, в результате чего взаимодействуют с грунтовыми водами. Наиболее показательным примером изменения физико-химических параметров источника за счет разной степени разубоживания приповерхностными водами является источник “У увала” (см. рис. 26, т. Н10). В период с 2005 по 2022 г. содержание хлор-ионов в воде этого источника менялось от 800 до 2250 мг/л, температура изменялась от 40 до 63 $^{\circ}\text{C}$, минерализация — от 4 до 10 мг/л (табл. 2). К сожалению, в периоды опробования не фиксировался дебит источника, но визуальная оценка фото- и видеоматериалов прошлых лет указывает на увеличение объема воды в периоды фиксирования самых низких температур.

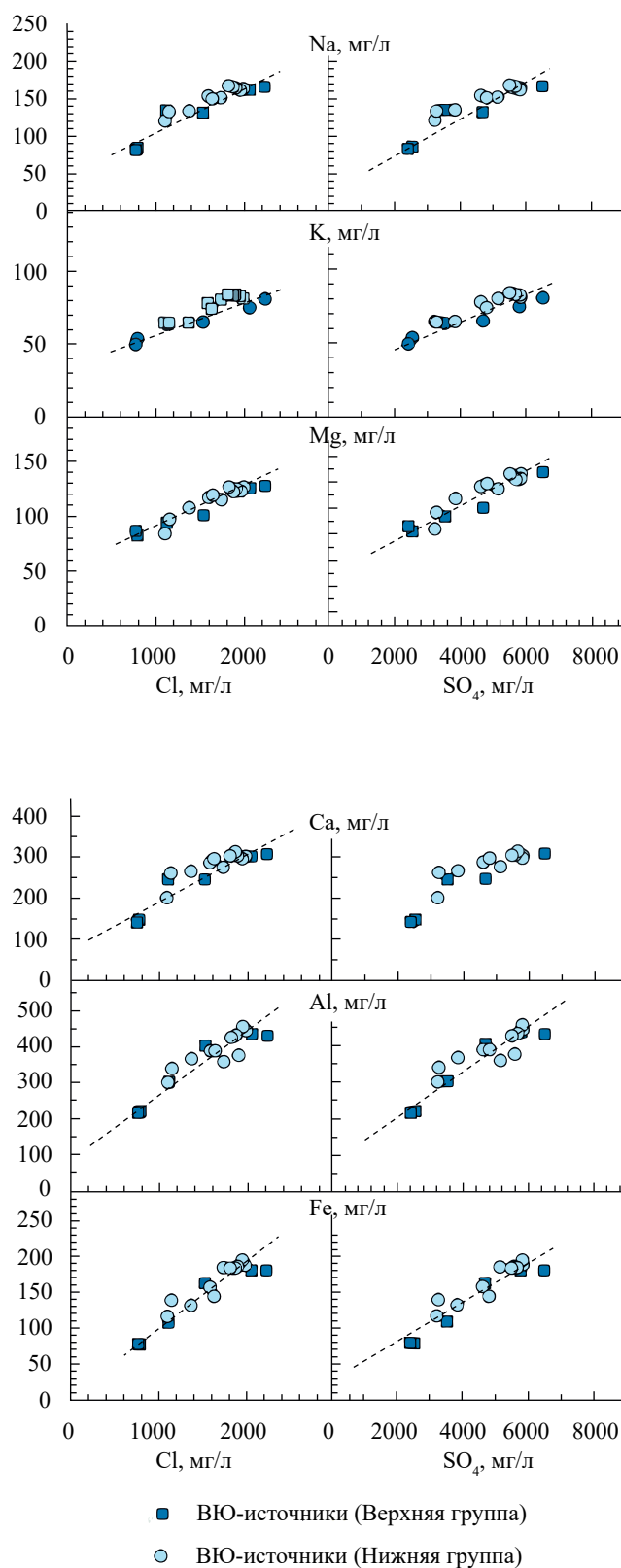


Рис. 4. Соотношение анионов и катионов в Верхне-Юрьевских источниках.

Таблица 2. Химический состав источника “У увала” по данным опробования 2005–2022 гг.

Год	Дата отбора	T, °C	pH _{лаб}	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe _{общ.}	Al ³⁺	SiO ₂
2005	17.09.2005	40.0	1.57	30.2	851	2509	64	56.6	124	53	148	187	181
2010	18.09.2010	64.8	1.53	н.д.	2269	5307	238	135	417	131	237	508	261
2014	13.08.2014	41.4	1.44	н.д.	1383	3622	130	36.5	200	82.7	142	227	325
2016	31.07.2016	44.8	1.63	34.1	1449	4363	148	105	234	90.2	268	438	234
2017	13.07.2017	36.0	1.67	35.0	1352	4131	131	95.2	199	82.5	142	334	372
2019	13.08.2019	66.7	1.61	57.1	2026	6340	209	134	325	138	249	540	197
2020	07.08.2020	68.2	1.61	58.0	2056	6207	200	115	431	136	223	545	217
2022	05.08.2022	48.0	1.64	22.9	1104	3237	120	64.4	200	83.7	116	299	209

Примечание. н.д. — нет данных.

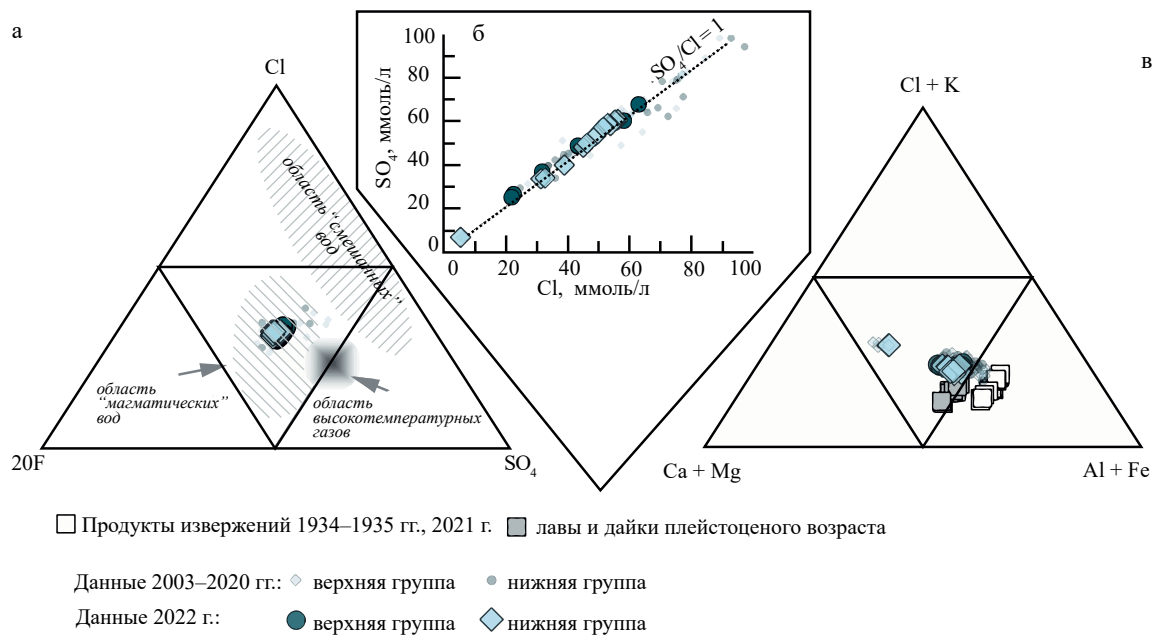


Рис. 5. Диаграммы относительных содержаний макрокомпонентов в термальных водах (мольные концентрации): анионы (а), соотношение SO₄/Cl (б), катионы (в). Состав пород — по данным [Котенко и др., 2023].

Как менялся состав воды источника в разные годы опробования наглядно продемонстрировано на рис. 6а. В качестве нормирующего показателя, в отношении которого выполнены все сравнения, используется хлор-ион как наиболее консервативный элемент, не формирующий вторичных минеральных комплексов при смешении кислых термальных и поверхностных вод. Наблюдается положительная линейная корреляция между температурой,

минерализаций, содержаниями макрокатионов и концентрацией Cl⁻ при такой же зависимости между минерализацией и температурой (см. рис. 3б). Некоторый разброс концентраций Ca²⁺ (см. рис. 6б) может быть связан как с потерей при смешении вод за счет формирования солей по пути фильтрации в рыхлых отложениях, так и с повторным растворением при увеличении доли термальных вод в более “сухие” годы.

В источниках с высокими температурами ($>80^{\circ}\text{C}$) при достаточно стабильной температуре и pH наблюдается вариативность в концентрациях анионов и некоторых катионов, которую нельзя объяснить простым смешением с грунтовыми/поверхностными водами (см. рис. 3, 4). Рассмотрим произошедшие изменения в содержании макрокомпонентов на примере двух источников, имеющих наиболее длинные ряды геохимических данных: “Источник № 1” (Верхняя группа) и источник “У лавового потока” (Нижняя группа). Впервые эти источники были опробованы в 1952 г.¹ За весь период наблюдения (см. табл. 3, 4), содержания Cl^- и SO_4^{2-} , растворенного алюминия и железа в 1950-е гг. были заметно выше, чем в последующий период наблюдения. Колебания содержаний остальных катионов (Ca^{2+} ,

Mg^{2+} , Na) не так значительны. В начальный период (1955–1961 гг.) была отмечена максимальная температура воды ($94\text{--}95^{\circ}\text{C}$) и самый низкий pH (0.86). Упоминания о низкотемпературных фумаролах в верховьях р. Юрьева также относится к этому периоду [Зеленов и др., 1965].

На рис. 7 приведено изменение содержания основных анионов и их соотношений в режимных источниках во времени и в сопоставлении с периодами активизации вулкана Эбеко. Подобная корреляция изучалась нами ранее [Калачева, Котенко, 2013; Kalacheva et al., 2016], но однозначного вывода сделать не удалось, так как использовался неполный набор данных, который должен был включать период подготовки к извержению вулкана, время извержения и период после него. За последние

Таблица 3. Химический состав воды “Источник № 1” (1952–1922 гг.), мг/л

Год	Дата отбора	T, °C	pH _{лаб}	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe _{общ.}	Al ³⁺	SiO ₂	Ссылка
1952		н.д.	н.д.	н.д.	4677	9116	н.д.	н.д.	540	225	500	н.д.	н.д.	Власов, 1953 (Отчет)
1955		95.0	0.86	52.0	4928	8854	287	268	344	267	417	608	н.д.	Иванов, 1957
1957		90.0	1.32	н.д.	4346	12407	395	190	478	230	595	1023	256	Зеленов, 1972
1959		90.0	1.15	н.д.	4380	12895	385	260	251	204	599	996	326	Зеленов, 1972
1960		94.0	1.08	79.9	4042	12482	351	230	463	210	461	994	273	Родионова и др., 1966
1961	Август 1961	95.0	1.25	н.д.	3220	11861	278	248	404	196	526	989	260	Мархинин, Стратула, 1977
1969		85.5	1.26	11.3	3305	8224	327	156	421	179	392	612	270	Никитина, 1978
1984	Август 1984	85.0	1.48	52.8	2252	5595	166	95	341	134	376	475	284	Фазлуллин, 1999
1987	Сентябрь 1987	84.0	1.14	86.6	3008	8067	220	125	376	140	314	636	242	Фазлуллин, 1999
2005	10.09.2005	78.0	1.20	40.0	2446	6386	129	95	192	90	257	474	247	Эта работа
2010	17.09.2010	87.4	1.27	н.д.	3440	7149	297	147	481	190	349	522	330	Калачева, Котенко, 2013
2013	24.08.2013	90.0	1.34	н.д.	2769	6278	276	98	411	173	227	480	286	Эта работа
2014	13.08.2014	80.8	1.20	н.д.	2736	6861	187	128	230	150	228	526	502	Kalacheva et al., 2016
2016	31.07.2016	80.4	1.12	61.0	3284	9454	255	159	305	159	224	572	263	Эта работа
2017	13.07.2017	84.8	1.18	64.0	3461	9101	219	144	332	138	252	466	584	Эта работа
2019	13.08.2019	89.5	1.19	68.5	2561	7995	250	136	379	172	312	520	197	Эта работа
2020	07.08.2020	85.7	1.21	75.0	2661	7610	220	106	317	159	341	472	176	Эта работа
2022	05.08.2022	89.1	1.25	54.3	2232	6517	166	75.5	307	127	180	329	315	Эта работа

Примечание. н.д. — нет данных.

Таблица 4. Химический состав источника “У лавового потока” (1957–2022 гг.), мг/л

Год	Дата отбора	T, °C	pH _{лаб}	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe _{общ}	Al ³⁺	SiO ₂	Ссылка
1957		90.0	1.12	н.д.	4674	13492	328	220	543	241	673	1200	274	[Зеленов, 1972]
1959		90.0	1.19	н.д.	4330	13259	310	295	253	178	591	1079	314	[Зеленов, 1972]
1960	10.09.1960	90.0	1.25	6.0	3284	8245	143	154	248	111	177	453	281	[Сидоров, 1966]
1969		84.0	1.3	12.5	3184	8193	317	162	409	176	383	627	271	[Никитина, 1978]
1984	Август 1984	90.0	1.26	98.0	3404	8206	273	166	421	195	447	769	348	[Фазлуллин, 1999]
1987	Сентябрь 1987	89.0	1.14	86.6	3089	8212	219	112	396	132	324	630	227	[Фазлуллин, 1999]
1988	Август 1988	81.8	1.1	80.3	2788	9469	191	128	356	160	360	629	214	[Фазлуллин, 1999]
2001		87.0	0.98	н.д.	3140	9310	198	198	270	130	250	630	200	[Бессонова и др., 2006]
2003	26.08.2003	81.0	1.41	51.0	2135	6094	119	116	208	114	225	432	219	Эта работа
2013	24.08.2013	84.0	1.16	н.д.	3018	6811	294	104	470	183	246	634	288	Эта работа
2014	13.08.2014	71.2	1.30	н.д.	2308	6277	168	134	226	132	80	468	418	[Kalacheva et al., 2016]
2016	31.07.2016	86.7	1.03	79.1	3659	10670	312	180	436	172	553	580	480	Эта работа
2017	13.07.2017	86.3	0.99	76.4	3153	9465	258	178	393	171	339	632	677	Эта работа
2019	13.08.2019	88.1	1.39	70.1	2725	7849	256	143	394	176	292	520	192	Эта работа
2020	07.08.2020	86.4	1.41	73.2	2787	7957	229	109	384	165	285	494	184	Эта работа
2022	05.08.2022	85.0	1.26	51.9	1954	5832	161	82.4	296	123	194	356	312	Эта работа

Примечание. н.д. — нет данных.

восемь лет (с 2016 г.) нам удалось получить геохимическую информацию, подтверждающую отклик гидротермальной системы на события, происходящие на вулкане Эбеко.

Следует отметить, что в начальный период наблюдения за ВЮ-источниками выявлены самые высокие содержания основных анионов, что могло быть связано с более высокой гидротермальной активностью вулкана Эбеко в целом. В этот период в Среднем кратере вулкана находилось термальное оз. Горячее диаметром до 200 м и глубиной до 20 м. Средняя температура воды была 30–35°C, достигая в местах расположения подводных парогазовых выходов 90°C. Вода в озере была ультракислой с pH до 1.3, SO₄–Cl–Na состава с минерализацией до 4.7 г/л. По периметру озера наблюдалась мощная фумарольная и гидротермальная

активность [Горшков, 1954; Иванов, 1957; Зеленов и др., 1965]. На южном берегу озера, почти на уровне воды, располагался крупный интенсивно газифицирующий источник с pH <1 и температурой 77°C [Иванов, 1957]. Вода (Q ~1–2 л/с) вытекала из широкой трещины (сечением до 10 см) и вливалась в озеро. С начала 1960-х гг. гидротермальная активность в Среднем кратере стала спадать [Опыт ..., 1966] и к середине 1960-х гг. практически исчезла [Скрипко и др., 1966]. При этом активность других фумарольных полей не прекращалась: суммарная фумарольная разгрузка вулкана Эбеко, инструментально измерявшаяся начиная с 1959 г. [Котенко и др., 2022; Меняйлов и др., 1988; Нехорошев, 1960] составляла 0.9–2 тыс. т/сут в межэруптивные периоды. В сравнении с этими данными вулканический приток, необходимый для

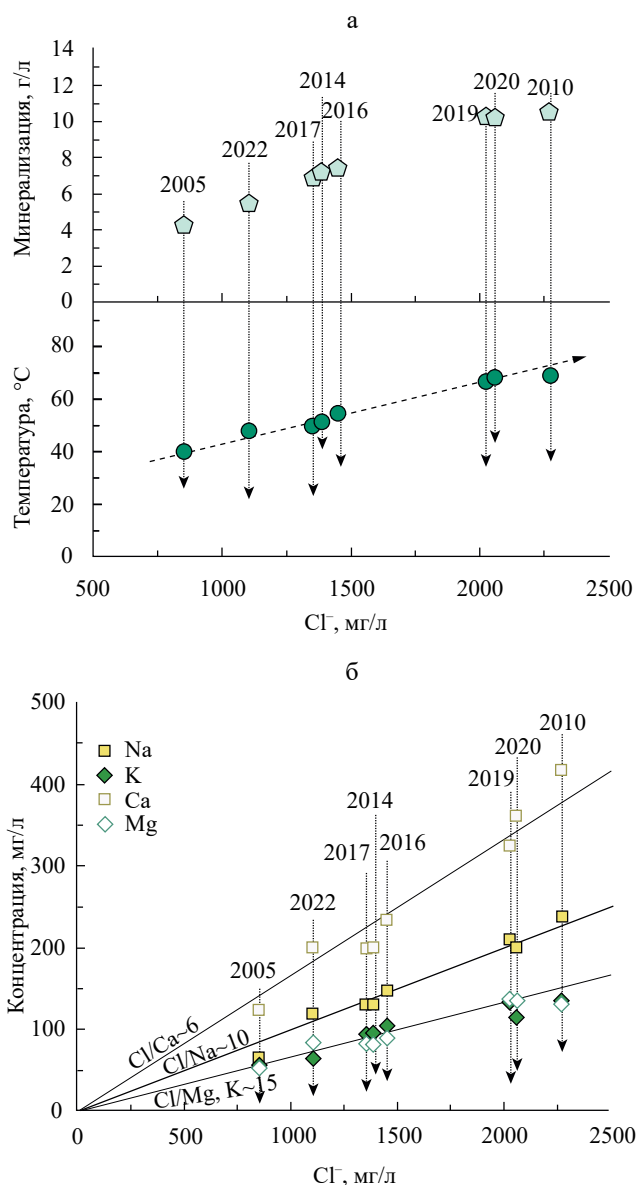


Рис. 6. Соотношения Cl^- (температура, минерализация, катионы) для источника «У увала». Цифрами на графиках показан год опробования.

равновесного состояния оз. Горячее ~ 1.4 тыс. т/сут, полученный масс-балансовыми и энергетическими расчетами для 1952 г. [Pasternack, Varekamp, 1997], представляется очень значительным. Суммарная газовая эмиссия вулкана по самой низкой оценке могла превышать 2.3 тыс. т/сут.

С другой стороны, если обратить внимание на рост отношения SO_4^{2-} к Cl^- в период 1957–1960 гг., сменившийся затем падением, то по аналогии с нашими наблюдениями современного извержения (2016–2024 гг.)

можно предположить вслед за авторами работы [Belousov et al., 2021], что предвестники подъема магмы были, но магма не достигла поверхности, извержение не произошло, а ореол с аномальными тепловыми и геохимическими свойствами достиг гидротермальной системы. Последствия выразились в высоком содержании SO_4^{2-} и Cl^- , понижении pH и, как следствие, усилении взаимодействия раствора с вмещающими породами и переход в раствор большего количества породообразующих элементов, в первую очередь алюминия и железа (см. табл. 2).

Причиной дальнейшего ослабления гидротермальной деятельности в кратерах вулканов могли стать изменения в системе питающих каналов фумарол [Никитина, 1978] и смещение основной разгрузки флюида на другие участки. В частности, зарастание флюидопроводящих каналов и трещин в результате каптирования их минералами гидротермального генезиса. Как свидетельствуют данные наблюдений 1950–1960 гг. [Иванов, 1957; Сидоров, 1966], ослабление термальной активности, особенно в Среднем кратере, происходило постепенно, на протяжении длительного (более 10–15 лет) периода, при этом наблюдалось увеличение фумарольной разгрузки на Северо-Восточном поле [Меняйлов и др., 1988]. Масштабное ослабление гидротермальной разгрузки на вулкане в дальнейшем, вероятнее всего, происходило в ответ на уменьшение потока магматического флюида в его гидротермальную систему в целом.

Редкие данные опробования в период с 1970 г. до 2003 г. не позволяют судить о реакции гидротермальной системы и на усиление активности вулкана в этот период (см. рис. 7 и табл. 3, 4), но некоторая тенденция увеличения отношения SO_4/Cl перед эксплозивными событиями 1987–1990 гг., описанных в работе [Мелекесцев и др., 1993] просматривается. С 2003 г. проводится более-менее регулярный мониторинг химического состава Верхне-Юрьевских источников. В период с 2003 г. по 2010 г. наблюдается постоянное снижение величины отношения SO_4/Cl (с 1.13 до 0.75). Происходило это снижение постепенно или ступенчато, в связи с отсутствием режимных наблюдений 2006–2009 гг., утверждать сложно. Также нельзя сделать однозначные выводы, что

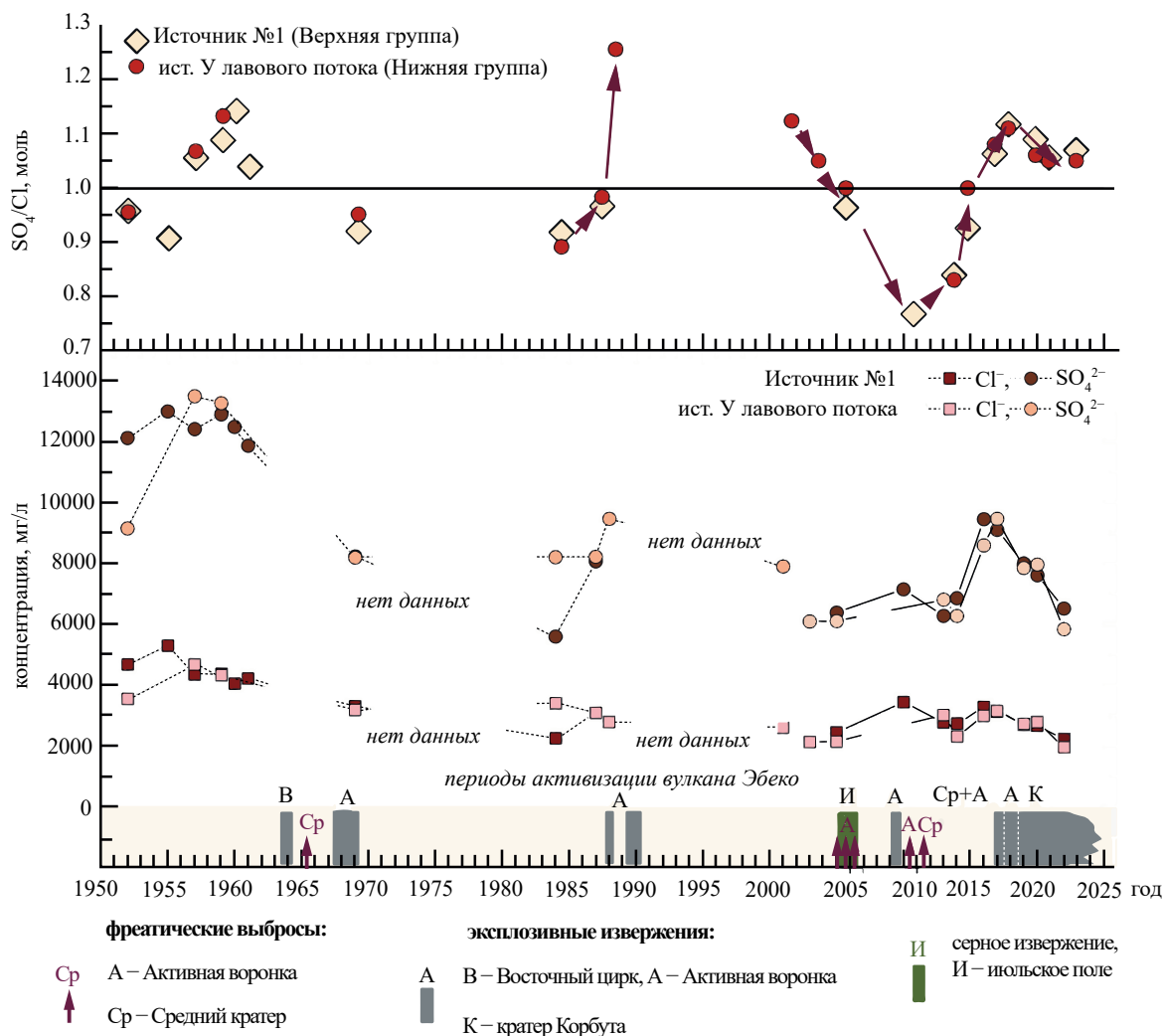


Рис. 7. Изменение во времени в водах Верхне-Юрьевских источников содержания SO_4 и Cl и их отношения (SO_4/Cl) в сопоставлении с периодами активизации вулкана Эбеко.

предшествующее снижение показателя вызвано “серным” извержением, произошедшим в 2005–2006 гг. на северо-восточном склоне Северного кратера (Июльское фумарольное поле) [Котенко и др., 2007] или подготовкой к периоду активизации 2009–2010 гг., выраженной серией эксплозивных взрывов из Активной воронки [Котенко и др., 2010, 2012]. В химическом составе воды в этот период значимых колебаний не выявлено. При практически ежегодном опробовании (2010–2022 гг.) удалось выявить отклик системы на вулканические события. Осенью 2016 г. начался новый этап эруптивной активности вулкана, продолжающийся в настоящее время. Практически за 5 лет до этого события мы наблюдали начало роста отношения SO_4/Cl ,

продолжающегося вплоть до 2017 г. Резкое увеличение (по сравнению с 2014 г.) концентраций Cl^- (на 20–59%) и SO_4^{2-} (38–70%) в воде зафиксирован за 2.5 месяца до начала извержения в 2016 г., что является прямым следствием увеличения поступления магматического флюида в гидротермальную систему. Высокие значения анионов сохранялись и в 2017 г. Начиная с 2019 г. несмотря на то, что извержение продолжается, наблюдается спад концентраций анионов до предэруптивного периода 2013–2014 гг. Однако отношение SO_4/Cl , несколько снизившееся к 2020 г., остается стабильно высоким (~1.1).

Параллельно с изменением химического состава термальных вод было выявлено утяжеление изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пробах 2016–2017 гг.

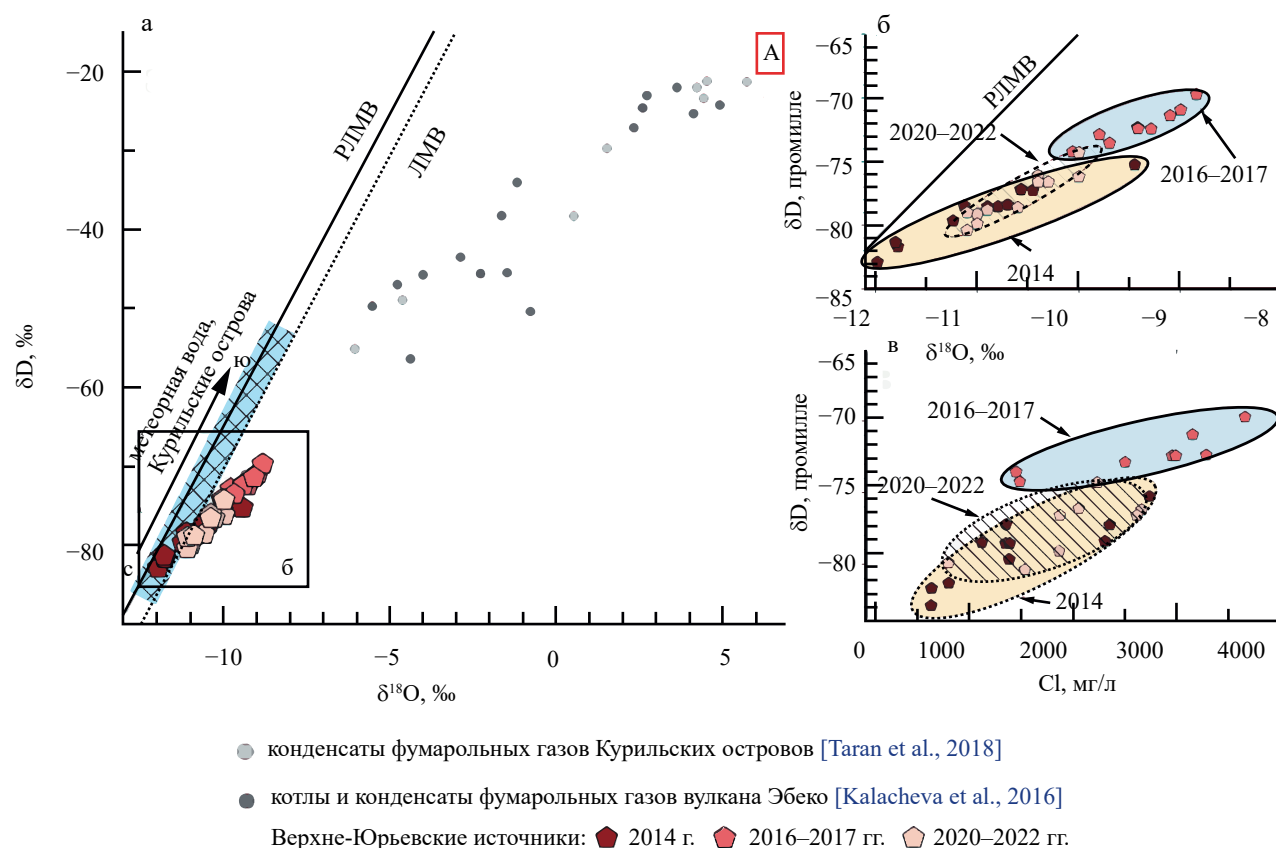


Рис. 8. Изотопный состав Верхне-Юрьевских источников (по данным 2014–2022 гг.).

а — соотношение $\delta^{18}\text{O}$ к δD (А — область распространения андезитовых вод, по [Таран и др., 1989]; РЛМВ — региональная линия метеорных вод, по [Чешко, 1994], ЛМВ — глобальная линия метеорных вод, по [Craig, 1961]; стрелка С–Ю обозначает изменение изотопного состава поверхностных вод от северных к южным островам); б — соотношение $\delta^{18}\text{O}$ к δD для Верхне-Юрьевских источников (увеличенный фрагмент) с выделением характерных распределений данных по отдельным периодам; в — соотношение Cl к δD для Верхне-Юрьевских источников (2014–2022 гг.) с выделением характерных распределений данных по отдельным периодам.

относительно 2014 г. [Калачева, Таран, 2019]. На графике (рис. 8) к опубликованным данным добавлены точки по состоянию на 2020 и 2022 гг. Обобщение полученных результатов сводится к следующему.

1) Изотопные составы Верхне-Юрьевских источников, по данным опробования 2014 г., локализируются вблизи линии метеорных вод, но с заметным положительным сдвигом по $\delta^{18}\text{O}$ и δD за счет смешения магматических паров и метеорных вод (см. рис. 8а), они также характеризуются высокой корреляцией между концентрациями Cl -ионов и величинами δD и $\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 8в).

2) Точки данных 2016 и 2017 гг. лежат на продолжении тренда, отмеченного для проб 2014 г.

(см. рис. 8а, 8б), одновременно с утяжелением изотопного состава в термальных водах увеличилась концентрация хлор-ионов (см. рис. 8в), что, согласно [Taran, Zelenski, 2014], является признаком увеличения доли магматической воды в питании термальных вод и вулканических паров.

3) В предэруптивный период с октября 2015 г. по сентябрь 2016 г. был выявлен также рост содержания SO_2 , CO_2 , H_2 во всех фумарольных газах и HCl в высокотемпературных газах вулкана Эбеко, а также изменение изотопного состава воды в их конденсатах [Котенко и др., 2022]. То есть, увеличение концентраций сульфат- и хлорид-ионов и изменение изотопного состава термальных вод происходило одновременно как в привершинной части вулкана, так и на

северо-западном склоне. Это, на наш взгляд, подтверждает наличие единой питающей гидротермальной системы.

4) По состоянию на 2020 и 2022 гг. для Верхне-Юрьевских источников наблюдалось восстановление предэруптивных значений 2014 г. изотопного состава и концентрации хлорид-ионов (см. рис. 8).

Таким образом, выявлен отклик гидротермальной системы вулкана Эбеко на его извержение, начавшееся в 2016 г. Отклик происходил только в подготовительный период, когда происходило увеличение дегазации питающей вулкан магматической системы и сохранялся в начальную фазу извержения. Через некоторый промежуток времени мы вновь наблюдаем значительное снижение в первую очередь сульфат- и хлорид-ионов. Более того, в 2022 г. зафиксированы наиболее низкие значения за всю историю наблюдения за вулканом. Возможно, пока идет извержение, гидротермальная система будет “разбавляться” метеорной водой и дальше. Заметные изменения были зафиксированы также в фумарольных газах вокруг вершины, что свидетельствует о единстве питающей гидротермальной системы. Дегазация свежей риолитовой магмы создает перед ее фронтом ореол с аномальными термическими и геохимическими свойствами, который первым достигает гидротермальной системы [Belousov et al., 2021], вызывая предэруптивные изменения, в том числе химического и изотопного составов термальных вод и фумарольных газов за счет увеличения потока кислых газов (в первую очередь SO_2 и HCl). Впервые эти изменения зафиксированы за 3–4 месяца до начала извержения, но скорее всего они начались несколько раньше, так как опробование термальных вод в 2015 г. не проводилось. Замедленные условия водообмена в постройке вулкана привели к тому, что в начальный период извержения еще сохраняются аномальные значения параметров. После того как магматическое тело прорывает гидротермальную систему, остывающая, уже отдавшая часть газов, магма самоизолируется от системы. Вся эруптивная активность идет через фронт потока, а в гидротермальную систему поступает небольшое количество газов. Возможно, для Верхне-Юрьевских источников время отклика на изменение состояния

вулкана, от стадии подготовки извержения к его началу и время возврата к “нормальному” состоянию имеет продолжительность 1–2 года и зависит от скорости подъема магмы и скорости водообмена. Это предположение требует дополнительных режимных наблюдений за химическим и изотопным составом вод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В северной части о. Парамушир, в долине р. Юрьева разгружается уникальный тип термальных вулканических вод сульфатно-хлоридного состава с $\text{pH} = 1.2$, температурой до $85\text{--}90^\circ\text{C}$ и минерализацией до $10\text{--}11$ г/л. Разгрузка осуществляется двумя группами Верхне-Юрьевских источников. Высокие корреляционные связи между анионами и катионами, физико-химическими параметрами указывают на единый источник питания.

Изменение химического состава термальных вод происходит за счет сезонных колебаний и в ответ на изменение состояния вулкана-хозяина. Сезонным колебаниям наиболее подвержены воды источников, приуроченные к рыхлому осадочному чехлу. В источниках основной термовыводящей зоны с высокими температурами ($>80^\circ\text{C}$) наблюдается вариативность в концентрациях анионов, связанная с периодами активизации вулкана. Фреато-магматические извержения предвещают изменение химического и изотопного составов термальных вод за счет увеличения потока магматических летучих, поступающих в систему. Рост отношения SO_4/Cl в воде начался практически за 5 лет до начала этапа эруптивной активности вулкана 2016 г. и продолжался до 2017 г. Резкое увеличение (по сравнению с 2014 г.) концентраций Cl^- (на $20\text{--}59\%$) и SO_4^{2-} ($38\text{--}70\%$) в воде зафиксирован за 2.5 месяца до начала извержения в 2016 г., что является прямым следствием увеличения поступления магматического флюида в гидротермальную систему. Высокие значения анионов сохранялись и в 2017 г. Начиная с 2019 г., несмотря на то, что извержение продолжается, наблюдается спад концентраций анионов до предэруптивного периода 2013–2014 гг. Однако отношение SO_4/Cl , несколько снизившееся к 2020 г., остается стабильно высоким (~ 1.1). Параллельно с изменением химического

состава термальных вод выявлено утяжеление изотопов $\delta^{18}\text{O}$ и δD в пробах 2016–2017 гг. относительно 2014 г.

Полученные данные указывают на то, что для Верхне-Юрьевских источников время отклика на изменение состояния вулкана от стадии подготовки извержения к его началу и времени возврата к “нормальному” состоянию имеет продолжительность 1–2 года и зависит от скорости подъема магмы и скорости водообмена.

Для дальнейшего изучения и детализации аспектов отклика гидротермальной системы вулкана на продолжающееся извержение необходимо продолжить ряд наблюдений за Верхне-Юрьевскими источниками. Наиболее продуктивными для режимных наблюдений являются “Источник № 1” (Верхняя группа источников) и один из источников, расположенных вблизи фронта лавового потока вулкана Эбеко.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Л.В. Котенко и Д.Ю. Кузьмину за неоценимую помощь при проведении многолетних полевых исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук по теме научно-исследовательских работ “Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минерало-рудогенеза” (рег. № НИОКТР 124032200002-0).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. и др. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о. Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39–51.

Горшков Г.С. Вулканы острова Парамушир и их состояние летом 1953 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1954. № 22. С. 9–29.

Зеленов К.К. Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М.: Наука, 1972. 213 с.

Зеленов К.К., Ткаченко Р.П., Канакина М.Л. Перераспределение рудообразующих элементов в процессе гидротермальной деятельности вулкана Эбеко (о. Парамушир) // Труды ГИН АН СССР. 1965. Вып. 141. С. 140–167.

Иванов В.В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–77.

Калачева Е.Г., Волошина Е.В. Геохимическая характеристика термальных источников привершинной части вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 2. Вып. 54. С. 6–19.

Калачева Е.Г., Котенко Т.А. Химический состав вод и условия формирования Верхне-Юрьевских термальных источников (о. Парамушир, Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 55–68.

Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролирующие изотопный состав (δD и $\delta^{18}\text{O}$) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3–17.

Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В. и др. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головнина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих // Вулканология и сейсмология. 2023. № 1. С. 3–20.

Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А., Волошина Е.В. Геохимия кислых термальных вод острова Уруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 5. С. 1–16.

Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А. и др. Ультракислые сульфатно-хлоридные воды вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские о-ва): состав и вынос магматических и породообразующих компонентов // Вулканология и сейсмология. 2022. № 5. С. 31–48.

Котенко Т.А., Калачева Е.Г., Волошина Е.В. Современные экзогенные процессы в долинах р. Юрьева (о. Парамушир) и руч. Горчиный (о. Кетой) и их влияние на разгрузки термальных вод / Материалы XXIII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 187–190.

Котенко Т.А., Котенко Л.В. Дождевые сели 4 сентября 2017 г. в северной части острова Парамушир, Курильские острова // Геориск. 2018. № 3. С. 46–55.

Котенко Т.А., Мельников Д.В., Тарасов К.В. Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003–2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы

- активности // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 31–46.
<https://doi.org/10.31857/S0203030622040058>
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержения вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 32–42.
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В. Извержение вулкана Эбеко (о. Парамушир) в 2018 г. / Материалы XXII научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 82–85.
- Котенко Т.А., Смирнов С.З., Тимина Т.Ю. Активность вулкана Эбеко в 2022 г.: механизм и продукты извержения // Вулканология и сейсмология. 2023. № 4. С. 3–22.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов / Отв. ред. В.М. Сугробов. М.: Наука, 1977. 212 с.
- Мелекесцев И.В., Двигало В.Н., Кирьянов В.Ю. и др. Вулкан Эбеко (Курильские острова): история эруптивной активности и будущая вулканическая опасность. Ч. I // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 69–81.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Особенности химического и изотопного состава фумарольных газов в межэруптивный период деятельности вулкана Эбеко // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 21–36.
- Нехорошев А.С. Геотермические условия и тепловой поток вулкана Эбеко на острове Парамушир // Бюлл. вулканол. станций. 1960. № 29. С. 38–46.
- Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
- Опыт комплексного исследования района современного и новейшего вулканизма (на примере хр. Вернадского о. Парамушир) // Труды СахКНИИ СО АН СССР. 1966. Вып. 16. 206 с.
- Родионова Р.И., Сидоров С.С., Федорченко В.И., Шилов В.Н. Геологическое строение и современная гидротермальная деятельность вулкана Влодавца. Современный вулканизм // Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания 3–17 сентября 1964 г. Т. I. М.: Наука, 1966. С. 98–103.
- Сидоров С.С. Активизация вулкана Эбеко в 1963–1964 гг. и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 40. С. 45–60.
- Скрипко К.А., Филькова Е.М., Храмова Г.Г. Состояние вулкана Эбеко летом 1965 г. // Бюлл. вулканол. станций. 1966. № 42. С. 42–55.
- Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Дубик Ю.М. Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304. № 2. С. 440–443.
- Фазлуллин С.М. Геохимическая система р. Юрьева (Курильские о-ва): условия поступления и выноса химических элементов в бассейн реки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 54–67.
- Чешко А.Л. Формирование основных типов термальных вод Курило-Камчатского региона по данным изотопных исследований (D, ^{18}O , $^3\text{He}/^4\text{He}$) // Геохимия. 1994. № 7. С. 988–1001.
- Belousov A., Belousova M., Auer A. et al. Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bull. of Volcanology. 2021. V. 83. Art. 4.
- Caudron C., Bernard A., Murphy S. et al. Volcano-hydrothermal system and activity of Sirung volcano (Pantar Island, Indonesia) // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2018. V. 357. P. 186–199.
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. № 133. P. 1702–1703.
- Delmelle P., Bernard A., Kusakabe M. et al. Geochemistry of the magmatic-hydrothermal system of Kawah Ijen volcano, East Java. Indonesia // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 97(1). P. 31–53.
- Giggenbach W.F. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 3rd ed. N. Y.: John Wiley, 1997. P. 737–796.
- Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2016. V. 310. P. 118–131.
- Kimbara K., Sakaguchi K. Geology, distribution of hot springs and hydrothermal alteration zones of major geothermal areas in Japan // Report of Geological Survey of Japan. 1989. V. 270. 482 p.
- Mazot A., Bernard A., Inguaggiato S. et al. Chemical evolution of thermal waters and changes in the hydrothermal system of Papandayan volcano (West Java, Indonesia) after the November 2002 eruption // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2008. V. 178. P. 276–286.
- Pasternack G., Varekamp J.C. Volcanic lake systematics, I. Physical constraints // Bull. of Volcanology. 1997. V. 58. P. 528–538.
- Sasaki M. Classification of water types of acid hot-spring waters in Japan // J. of Geothermal Research Society Japan. 2018. V. 40. P. 235–243.

- Sturchio N.C., Williams S.N., Gareia P.N., Lodofio C.A.* The hydrothermal system of Nevado del Ruiz volcano, Colombia // *Bull. of Volcanology*. 1988. V. 50. P. 399–412.
- Taran Y., Kalacheva E.* Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. V. 405. Art. 107036.
- Taran Y., Kalacheva E., Dvigalo B. et al.* Evolution of the crater lake of Maly Semyachik volcano, Kamchatka (1965–2020) // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. V. 418. Art. 107351.
- Taran Y., Zelenski M.* Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases. The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas. London: Geological Society (Special Publications), 2014. P. 410–432.
- Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. et al.* Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island Arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes // *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*. 2018. V. 19. № 6. P. 1859–1880. <https://doi.org/10.1029/2018GC007477>
- Torres-Ceron D.A., Acosta-Medina C.D., Restrepo-Parra E.* Geothermal and mineralogic analysis of hot springs in the Puracé-La Mina sector in Cauca, Colombia // *Geofluids*. 2019. V. 2019. Art. 3191454.
- Ueda A., Tanaka T., Kusakabe M., Furukawa T.* Tamagawa hyper-acidic hot spring and phreatic eruptions at Mt. Akita-Yakeyama Volcano: Part 2. Secular variations of SO₄/Cl ratios and their relationship to the phreatic eruptions // *J. of Volcanology and Geothermal Research*. 2021. V. 414. Art. 107242.
- Varekamp J.C., Herman S., Ouimette A. et al.* Naturally acid waters from Copahue volcano, Argentina // *Applied Geochemistry*. 2009. V. 24. P. 208–220.
- Walter T.R., Belousov A., Belousova M. et al.* The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations // *Remote Sens*. 2020. Iss. 12/1961.

Verkhne-Yuryevsky Thermal Springs: Evolution of Chemical and Isotopic Composition (1952–2022) in Connection with Periods of Activation of Ebeko Volcano (Paramushir Island)

E. G. Kalacheva*, T. A. Kotenko, E. V. Voloshina, D. Yu. Erdnieva, D. V. Melnikov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
e-mail: keg@ksnet.ru

This paper examines the chemical composition of thermal waters discharged on the northwestern slope of the active Ebeko volcano in the valley of the Yuryeva River. Based on long-term regime observations of the evolution of the chemical and isotopic composition, an assessment is made of the response of volcanic events to the state of the hydrothermal system. It has been shown that phreatic-magmatic volcanic eruptions are preceded by a change in the chemical and isotopic composition of thermal waters due to an increase in the flow of magmatic volatiles entering the system. In the springs there is an increase in the concentrations of anionic components (chloride, sulfate, and fluorine ions), a simultaneous increase in the weight of oxygen and hydrogen isotopes (deuterium) in the direction of “andesitic” waters. Since changes were detected several months before the eruption, such geochemical effects can serve as predictive markers when monitoring the state of the volcano.

Keywords: Yuryeva River, Paramushir Island, hydrogeochemistry, thermal waters