Научные статьи

УДК 551.21/23

DOI: 10.31431/1816-5524-2022-2-54-6-19

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИВЕРШИННОЙ ЧАСТИ ВУЛКАНА ЭБЕКО (о. ПАРАМУШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

© 2022 Е.Г. Калачева, Е.В. Волошина

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: keg@kscnet.ru

Поступила в редакцию 16.02.2021; после доработки 19.04.2022; принята в печать 27.06.2022

На основании данных, полученных в результате полевых работ 2020–2021 гг., дается характеристика химического и изотопного состава горячих источников привершинной части активного вулкана Эбеко (о. Парамушир, Курильские о-ва). Термальные воды, разгружающиеся в одном из истоков р. Кузьминка ультракислые (pH < 2) Al-Ca-SO_4-Cl типа с минерализацией до 5 г/л и температурой до 70°C. Анионный состав вод формируется за счет растворения в грунтовых водах кислых вулканических газов, частично «очищенных» в основном резервуаре гидротермальной системы вулкана. Катионный состав вод, включая редкоземельные элементы, образуется за счет изохимического растворения вмещающих пород в эквиваленте 5 г на 1 л воды. Различия в изотопном составе и соотношениях макрокомпонентов (SO_4/Cl, Al+Fe/Ca+Mg/Na+K) вод источников привершинной части и северо-западного склона дают возможность предположить наличие разноуровневых водоносных горизонтов в гидротермальной системе, приуроченной к постройке вулкана Эбеко.

Ключевые слова: Эбеко, Парамушир, термальные источники, химический состав, микроэлементы.

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Эбеко, один из наиболее активных вулканов Курильской островной дуги, расположен в северной части о. Парамушир и имеет сложное строение, в котором основными элементами являются несколько слившихся в единый вулканический хребет конусов разного возраста и сохранности с кратерами наверху (Мелекесцев и др., 1993). Вершинная часть вулкана представлена вытянутым на ~800 м в субмеридиональном направлении усеченным конусом, сложенным преимущественно грубообломочной пирокластикой андезитового состава. Венчают постройку три соприкасающихся кратера — Северный, Средний и Южный (рис. 1). В Южном кратере находится одно из фумарольных полей вулкана, в Среднем – расположено оз. Горячее. На месте Северного кратера в ходе последнего извержения (2016–2021 гг.) сформировался новый кратер, названный в честь Юрия Анатольевича Корбута, старейшего жителя г. Северо-Курильск (Котенко и др., 2019).

Современная сольфатарная деятельность вулкана сосредоточена на привершинных склонах. На возвышенных участках располагаются фумаролы, прогретые площадки и кипящие водные и водно-грязевые котлы, в глубоких врезах ручьев локализованы выходы термальных вод (рис. 1). Крупный очаг разгрузки высокотемпературных ультракислых термальных вод находится в 2.5 км к северо-востоку от кратерной зоны в долине р. Юрьева (Kalacheva et al., 2016).

Изучению гидротермальной активности привершинной части постройки вулкана уделялось большое внимание в 50–60-е гг. XX века. В этот период был рассмотрен химический состав основных типов термопроявлений и условия

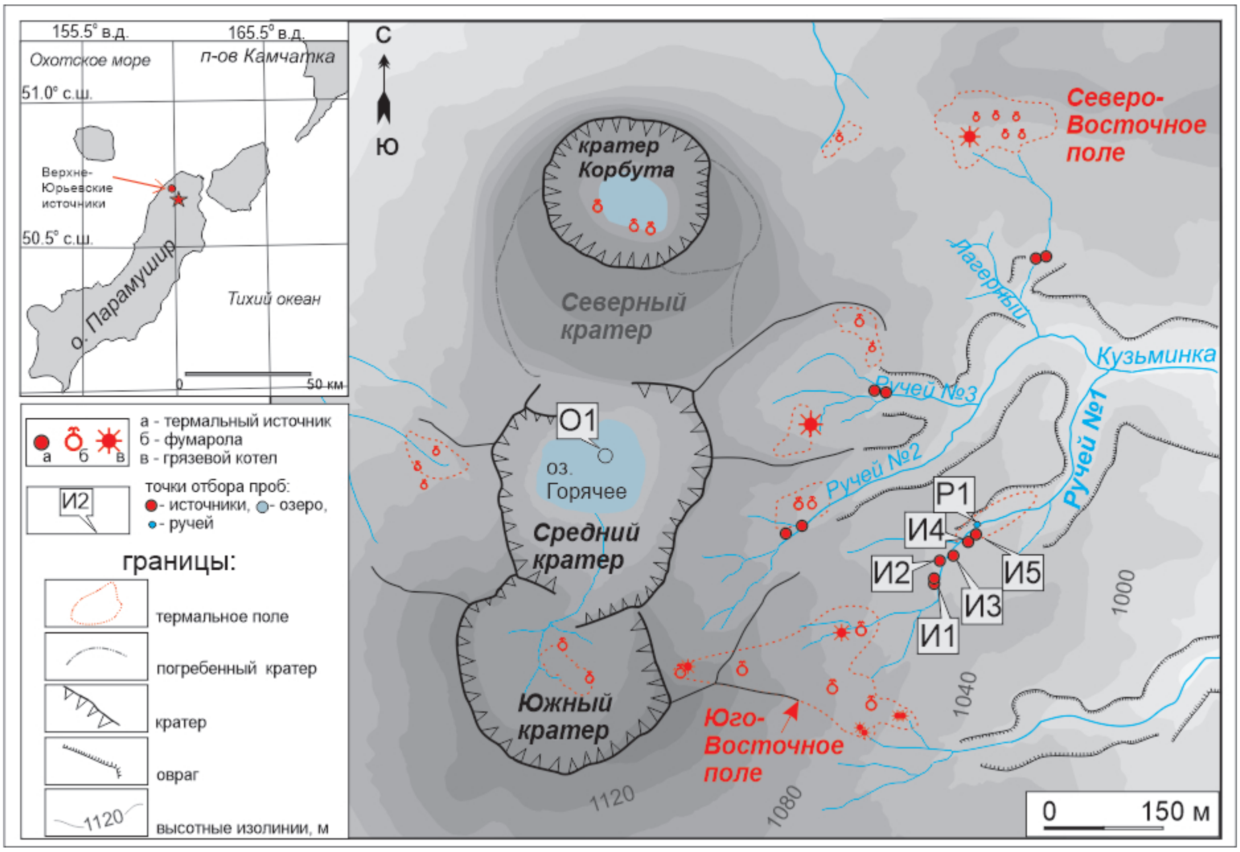

Рис. 1. Привершинная часть вулкана Эбеко. Точки отбора водных проб 2020–2021 гг. Звездочкой обозначено местоположение вулкана Эбеко.

Fig. 1. The summit part of Ebeko volcano. Water sampling points for 2020–2021. The asterisk marks the location of the Ebeko volcano.

их формирования (Иванов, 1957; Мархинин, Стратула, 1977; Сидоров, 1966 и др.). Миграции отдельных металлов с термальными водами вулкана посвящена монография (Никитина, 1978). Отдельные исследования были посвящены геохимии вод и осадков оз. Горячее, наиболее полные данные представлены в монографии (Храмова, 1987). Следующий этап, связанный с изучением гидротермальный деятельности вулкана, начался в XX в. Работы (Бортникова и др., 2006, 2013; Kalacheva et al., 2016) посвящены геохимии отдельных типов термопроявлений, оценке свойств гидротермального флюида на глубине, а также физико-химическому моделированию взаимодействия вода-порода.

Вместе с тем, до настоящего времени геохимии вод термальных источников внимания практически не уделялось, что связано в первую очередь с их труднодоступностью. В силу расчлененного рельефа и климатических особенностей исследуемого района, большая часть источников или подходы к ним на протяжении многих лет могут быть скрыты многометровыми снежниками, поэтому сведения об источниках отрывочные, многие исследователи даже не упоминают об их существовании. Более-менее посещаемыми оказались только источники, расположенные ниже Северо-Восточного поля (Бортникова и др., 2013; Никитина, 1978) (рис. 1).

В данной работе впервые приводятся химический и изотопный составы термальных вод, разгружающихся во врезе Ручья № 1 (рис. 1), одного из истоков р. Кузьминка, дренирующего восточный склон вулкана Эбеко. Рассматривается поведение широкого круга микрокомпонентов, включая редкоземельные элементы. Затрагиваются вопросы, связанные с условиями формирования термальных вод. Приводится сравнительная геохимическая характеристика источников Ручья № 1 с Верхне-Юрьевскими источниками, расположенными на северо-западном склоне вулкана в 2.5 км от его вершины и с водами оз. Горячее, занимающего Средний кратер вулкана. В основу исследования легли авторские данные, полученные в результате полевых работ 2020 и 2021 гг.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В глубоких врезах истоков руч. Лагерный, дренирующих фумарольные поля вулкана, расположены малодебитные выходы термальных вод и слабые паровые струи. Одни группы источников находятся в границах термальных полей, другие — на некотором удалении от них (рис. 1). Одна из подобных обособленных групп находится в узком каньоне Ручья № 1 (здесь и далее названия ручьев по (Сидоров, 1966)). Ручей № 1 (рис. 2*а*) зарождается на Юго-Восточном фумарольном поле, характеризующемся наличием наиболее крупных фумарольных построек и разнообразными по размерам водно-грязевыми котлами. Сток в верхнем течении не постоянный, осуществляется в период снеготаяния и после дождей. К середине августа русло обычно пересыхает, вода появляется только в районе расположения источников, которые совместно с водами тающего снежника дают начало данному ручью. Первые выходы термальных вод дебитами 0.05—0.1 л/с появляются на абсолютной высоте 1020 м по левому борту ручья на расстоянии 1—1.5 м от уреза воды и на относительной высоте 0.5—0.7 м. Температура воды источников составляет 55—58°C, pH = 1.8—1.84. Разгрузка на поверхности сопровождается интенсивным осаждением аморфной самородной серы светло-желтого цвета, яркими пятнами выделяющимися на фоне темно-серых склонов вулкана, покрытых свежей пирокластикой (рис. 2*б*, 2*в*).

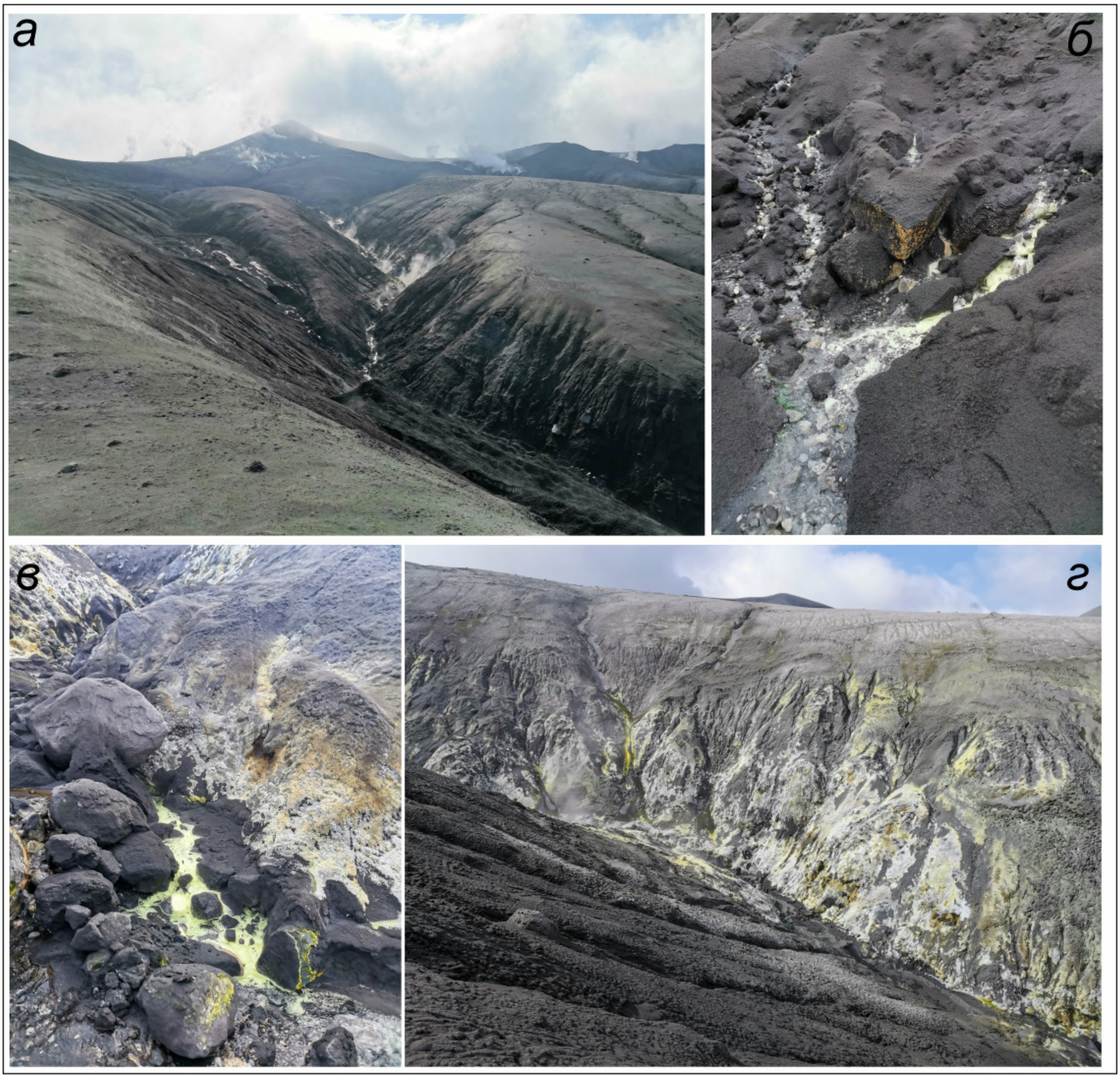

Рис. 2. Долина Ручья № 1 и привершинная часть вулкана Эбеко (*а*), источник (И1) (*б*), источник (И2) (*в*), отложение солей в борту Ручья № 1 (*г*).

Fig. 2. Valley of Stream № 1 and the near-summit part of Ebeko volcano (*а*), spring (I1) (*б*), spring (I2) (*в*), salt deposition on the side of the Stream № 1 (*г*).

Ниже по течению на протяжении 100 м рядом и непосредственно в русле ручья встречаются еще несколько подобных источников общим дебитом менее 1.5 л/с. Средний температурный диапазон выходов составляет 60–67°С, при максимальном значении 70°С. Величина pH колеблется от 1.65 до 1.85, минерализация от 4 до 5 г/л. Параллельно с выходами термальных вод, вдоль русла, преимущественно по левому борту ручья прослеживается прогретая зона, покрытая водорастворимыми сульфатными минералами (рис. 2*г*), схожими с теми, что распространены на основных фумарольных полях, рассмотренных в монографии (Бортникова и др., 2013). У уреза воды наблюдаются отдельные небольшие парогазовые выходы температурой до 96°С, часть из них расположены непосредственно в русле ручья. Сквозь воду в этих местах постоянно пробулькивает газ, создавая иллюзию кипения, при этом температура воды на поверхности составляет 44°С. Ниже термальной площадки расход ручья составляет 2.6–2.7 л/с, pH = 1.95.

Озеро Горячее, расположенное в Среднем кратере, в настоящее время только по названию горячее. В конце 1960-х гг. прекратилась сольфатарная деятельность вулкана в этом кратере, в результате чего озеро остыло. Краткий обзор эволюции его химического состава и гидрологический режим рассмотрен в работе (Котенко, Калачева, 2021). По состоянию на август 2021 г. вода озера имела температуру 12°С., pH = 2.1, минерализация составляла 0.8 г/л.

Верхне-Юрьевские источники (рис. 1), основной очаг разгрузки ультракислых термальных вод вулкано-гидротермальной системы Эбеко (Kalacheva et al, 2016), расположены на северо-западном склоне вулкана. Общий дебит источников составляет 170 л/с (Калачева, Котенко, 2013). Температура (по данным на август 2020 г.) в разных выходах варьирует от 37 до 90°С, pH изменяется от 1.2 до 1.8, минерализация достигает 14 г/л.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования были проведены авторами в августе 2020 и в августе 2021 гг. Определение концентраций основных катионов и анионов (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, F^-, Cl^-, SO_4^{2-}) в водных пробах выполнялось авторами в Лаборатории постмагматических процессов Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский (ИВиС ДВО РАН) на ионном хроматографе Metrohm 883.

Содержание SiO_2 определялось в Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН колориметрическим методом (аналитик Д.Ю. Эрдниева).

Определение микроэлементов методом ICP-MS (Agilent 7500 CE) выполнялось в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток (ДВГИ ДВО РАН). В этом же центре, в Лаборатории стабильных изотопов, выполнен изотопный анализ кислорода и водорода воды ($\delta^{18}O$ и δD) на масс-спектрометре MAT 253 (ThermoQuest, Bremen, Germany). Результаты анализов δD и $\delta^{18}O$ приведены относительно международного стандарта VSMOW. Воспроизводимость результатов при анализе данной серии образцов контролировали повторными измерениями лабораторного стандарта. Погрешность составила в среднем ±0.1‰ и ±0.8‰ для $\delta^{18}O$ и δD, соответственно.

Геохимическое моделирование проводилось с помощью программного пакета PHREEQC (Parkhurst, Appelo, 1999) с использованием термодинамической базы данных WATEQ4F (Ball, Nordstrom, 1991). По результатам химических анализов (табл. 1) были рассчитаны индексы насыщения водных проб по отношению к различным вторичным минералам, характерным для низкотемпературного кислотного выщелачивания как при температуре отбора, так и в диапазоне температур до 250°С. Для графического отображения геохимических данных и интерпретации результатов использован программный пакет OriginPro 2022. Типизация вод приведена по преобладающим анионам, содержание которых превышает 20% (в мг-экв/л).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геохимия вод: макрокомпоненты. Как показано в работе (Taran, Kalacheva, 2020), многие ультракислые сульфатно-хлоридные воды имеют высокие концентрации фтора и низкие отношения Cl/F, что служит одним из сильных индикаторов непосредственного магматического вклада в их формирование. На диаграммах соотношения анионов (рис. 3*а*), зона, в которую попадают такие воды, находится вблизи области составов вулканических газов (относительных концентраций HCl, SO_2+H_2S и HF) и, условно, названа «магматические воды». К ним относятся, например, Верхне-Юрьевские источники (рис. 3*а*) со средним молярным отношение SO_4/Cl = 1 и концентрациями F^- = 50–60 мг/л. Другая зона, вытянутая вдоль оси Cl^-SO_4 в широком диапазоне их соотношений, получила название «смешанные воды». В нее попадают ультракислые воды, составы которых частично сформированы другими процессами.

В анионном составе термальных источников Ручья № 1 преобладают SO_4^{2-} и Cl^- (табл. 1). Содержание сульфат-ионов колеблется

Таблица 1. Химический (мг/л) и изотопный (‰) состав термальных вод вулкана Эбеко
Table 1. Chemical (mg/L) and isotopic (‰)composition of thermal waters of Ebeko volcano

Шифр	Дата отбора	T, °C	$pH_{лаб}$	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	B	SiO_2	Al^{3+}	$Fe_{общ.}$	Mn	M, г/л	δD	$\delta^{18}O$
И1	11.08.21	64.9	1.65	9.98	1580	2745	56.7	45.1	149	40.7	1.74	332	268	86.8	2.01	5.32		
И2	02.08.20	58.1	1.94	6.20	1182	2064	41.4	29.1	122	31.0	4.06	278	238	97.7	2.16	4.10	-79.3	-11.2
И2	12.08.21	70.0.	1.81	9.72	1112	2089	48.1	25.0	161	43.1	1.39	316	188	79.5	2.48	4.08		
И3	11.08.20	55.3	1.97	5.81	1117	2020	42.1	27.7	239	29.4	2.24	257	181	83.8		4.06		
И4	11.08.20	41.2	2.27	2.59	695	1282	26.3	14.7	89.4	18.2	1.77	229	99.9	55.8		2.52		
И5	11.08.20	47.9	2.65	4.00	727	1459	46.9	29.9	181	35.5	1.47	368	132	145	3.04	3.13	-80.4	-11.6
ВЮ1	07.08.20	43.5	1.8	37.5	1444	4350	118	80.3	249	78.0	5.79	48.2	387	123	0.25	6.92	-76.6	-10.3
ВЮ2	07.08.20	88.9	1.42	83.9	3192	8880	225	113	381	161	11.2	192	505	251		14.0	-76.1	-10.4
О1	12.08.21	12.30	2.13	1.12	234	456	4.9	1.83	36.7	2.68	0.28	26.6	17.7	18.3		0.80		

в диапазоне 1.4–2.7 г/л, хлор-ионов — 0.7–1.5 г/л (pH 3.1–3.4). Постоянно присутствует F^- в количестве до 10 мг/л. Молярное отношение SO_4/Cl в источниках Ручья № 1 < 1 (рис. 3*б*) и на диаграмме соотношения основных анионов (рис. 3*а*) воды источников вместе с оз. Горячее занимают компактную группу в области «смешенных» вод. Учитывая более низкую по сравнению с Верхне-Юрьевскими источниками минерализацию термальных вод, разгружающихся в долине Ручья № 1, и в целом низкие концентрации F^- в водно-грязевых котлах и HF в фумарольных газах юго-восточного сектора вулкана (Kalacheva et al., 2016) можно предположить, что в формировании анионного состава исследуемых термальных вод принимали участие магматические газы, значительно «отфильтрованные» в основном резервуаре гидротермальной системы. Более низкое соотношения SO_4/Cl может быть вызвано потерей серы при выходе вод на поверхность за счет осаждения сульфурита.

В катионном составе термальных вод преобладает Al^{3+} и Ca^{2+} с концентрациями до 270 мг/л и 230 мг/л, соответственно. Содержание $Fe_{общ}$ варьирует от 80 до 145 мг/л, средний диапазон значений Na^+, K^+ и Mg^{2+} составляет 30–40 мг/л. Отмечаются повышенные значения бора (до 4 мг/л) и Mn (до 3 мг/л). Содержание SiO_2 очень высокое, в отдельных источниках достигает 350 мг/л. Как и для Верхне-Юрьевских источников, для термальных вод Ручья № 1 характерно суммарное распределение катионов (Al+Fe/Ca+Mg/Na+K), близкое к породному (рис. 3*в*), но в термальных водах привершинной части доля Na+K (в ммоль/л) меньше, чем в разгрузках северо-западного склона. Катионный состав озерной воды значительно отличается от термальной. Обогащение натрий-ионами может происходить за счет поступления в кратер пепла извержения 2016–2021 гг. (Котенко и др., 2019; Котенко, Калачева, 2021), содержащего, к примеру, водорастворимые сульфаты натрия.

Распределение точек на диаграмме соотношений концентрации основных породообразующих элементов (Mg, Na, K, Ca, Fe, Al, Mn) в воде относительно средних их содержаний во вмещающих породах (рис. 4*а*) указывает на практически конгруэнтное растворение последних. Согласно полученным данным, для формирования соответствующего катионного состава достаточно 5 грамм породы на 1 литр воды, что в два раза меньше значений, характерных для Верхне-Юрьевских источников. Обеднение вод в отношении Ti и Si (рис. 4*б*) типично для ультракислых вод активных вулканов. Как показано в работе (Varekamp et al., 2015), это может быть связано, в первую очередь, с низкой растворимостью соединений титана в кислых водах и осаждением кремнистых соединений (аморфный кремнезем, кристобалит и т.д.) при охлаждении воды.

Рассчитанные для термальных вод коэффициенты переноса элементов ETR (*Element Transfer Ratios*) (Pasternack, Varekamp, 1994), также подтверждают изохимическое растворение пород для термальных источников Ручья № 1, как и для Верхне-Юрьевских (рис. 4*б*). В качестве нормирующего элемента использован магний, характеризующийся наиболее консервативным поведением в кислых флюидах (Varekamp, 2015). В исследуемых водах ETR для большинства катионов (Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K) имеет значения, близкие к единице. Наблюдаемый небольшой разброс, возможно, вызван различиями в скорости выщелачивания или образования вторичных фаз. Исключение составляют выше рассмотренные Si и Ti, значения ETR для которых значительно ниже единицы.

Геохимия вод: микрокомпоненты. В пробах 2020 г. термальных источников Ручья № 1 вулкана Эбеко проанализированы микрокомпоненты, включая полный набор редкоземельных элементов (РЗЭ) (табл. 2). Для сравнения также представлены данные по двум пробам 2020 г.

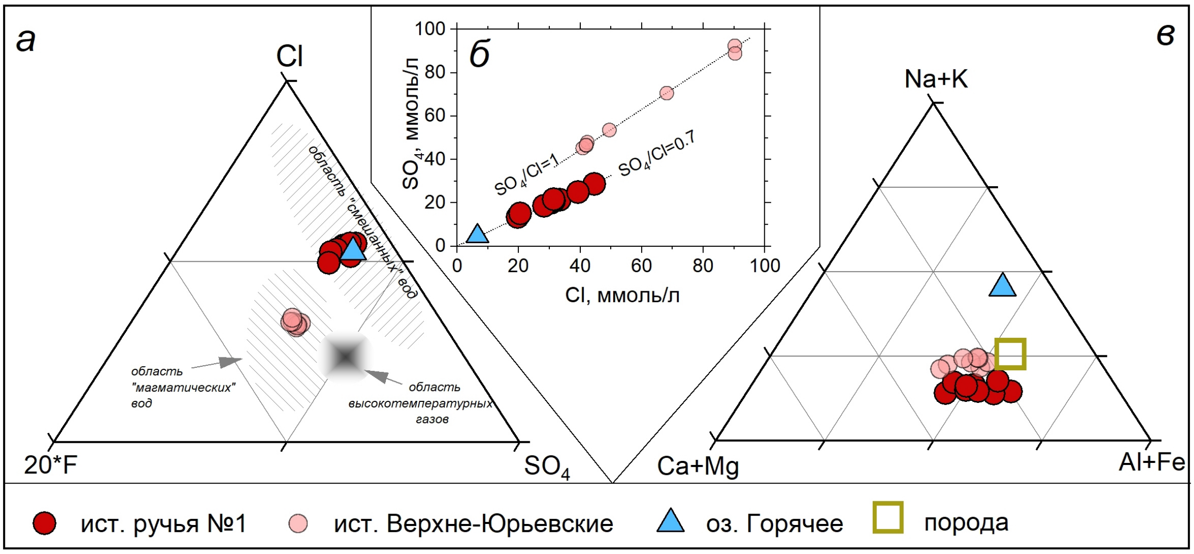

Рис. 3. Диаграммы относительных содержаний макрокомпонентов в термальных водах (мольные концентрации): анионы (*а*), соотношение SO_4/Cl (*б*), катионы (*в*).

Fig. 3. Diagrams of the relative contents of macrocomponents in thermal waters (molar concentrations): anions (*a*), SO_4/Cl ratio (*б*), cations (*в*).

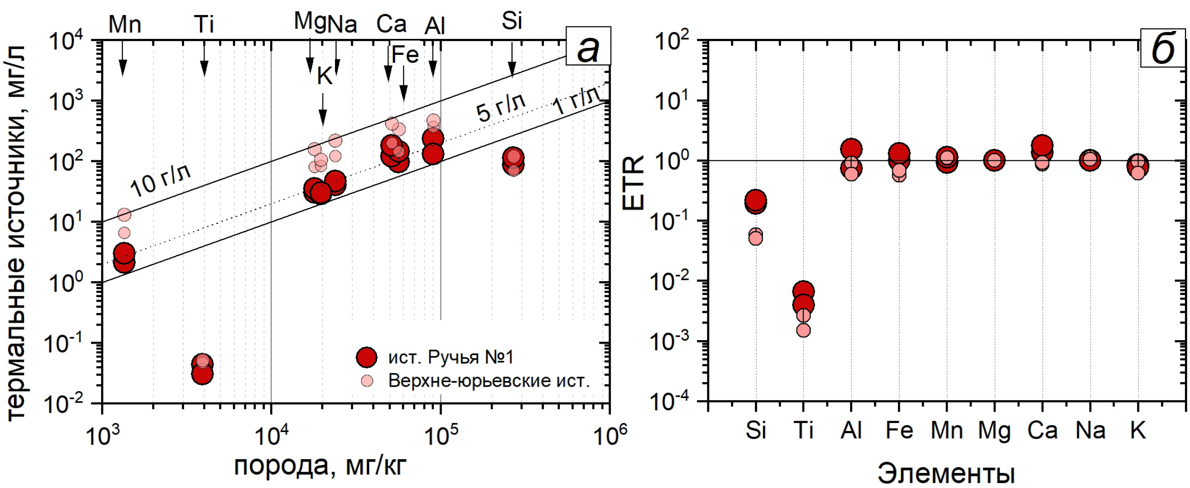

Рис. 4. Диаграмма соотношений породообразующих элементов в координатах «концентрация в воде — концентрация в породе» (*а*) и коэффициенты переноса макроэлементов (ETR) (*б*). На (*а*) показаны линии, соответствующие разным количествам породы, растворенной в воде — от 1 до 10 г/л.

Fig. 4. Diagram of the ratios of rock-forming elements in the coordinates «concentration in water — concentration in rock» (*a*) and transfer coefficients of macroelements (ETR) (*б*). (*a*) shows lines corresponding to different amounts of rock dissolved in water, from 1 to 10 g/l.

Таблица 2. Микроэлементный состав (мгк/л) в термальных водах вулкана Эбеко
Table 2. Microelements (mkg/L) composition of thermal waters of Ebeko volcano

Шифр	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As
И2	16.33	1.13	1822	79.72	44.70	567	59.10	2.14	7.10	7.11	152.6	32.29	4.36	166.4
И5	21.67	1.17	1177	59.70	30.61	537	27.29	13.10	11.95	9.67	205.9	3.10	2.89	109.6
Р1	21.47	1.45	1492	79.30	155.8	546	47.76	9.32	10.84	62.78	192.1	23.54	4.32	110.0
ВЮ1	45.71	2.37	3745	88.56	46.92	818	124.7	5.64	22.49	6.93	597.1	76.40	5.02	709.0
ВЮ2	93.07	4.75	6249	169.27	80.49	1313	221.8	13.36	53.98	11.53	1246	90.12	9.15	1671.0
О1	2.76	0.11	2112	2.72	28.22	66.37	3.56	7.00	2.35	9.50	23.93	3.29	1.06	12.06
Шифр	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Cs	Ba
И2	10.30	60.49	911.5	37.67	0.11	0.005	0.23	2.62	0.32	0.04	0.60	0.05	2.19	80.90
И5	8.55	47.05	386.9	42.65	0.03	0.008	0.32	2.23	0.31	0.001	0.84	0.08	1.96	8.21
Р1	10.38	67.64	839.4	45.24	0.09	0.05	0.74	0.05	0.44	0.02	1.07	0.19	2.56	75.14
ВЮ1	13.79	205.7	2134	42.98	0.89	0.05	0.32	0.04	4.81	0.05	0.62	0.16	14.54	45.98
ВЮ2	27.49	375.4	3194	94.25	10.79	0.06	0.35	0.025	11.44	0.006	2.74	0.30	28.83	90.04
О1	1.82	3.51	119.2	14.56	0.03	0.001	0.49	0.06	0.20	0.03	0.75	0.19	0.07	18.99
Шифр	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
И2	16.96	46.38	6.70	32.32	8.22	2.28	7.42	1.24	7.22	1.39	4.09	0.53	3.69	0.57
И5	7.17	26.48	4.94	29.65	8.93	2.51	7.91	1.35	7.91	1.55	4.46	0.60	3.85	0.56
Р1	18.00	50.68	7.35	37.12	9.79	2.76	8.83	1.47	8.46	1.73	4.99	0.70	4.52	0.70
ВЮ1	39.47	97.21	12.27	52.38	11.27	3.21	9.83	1.43	8.36	1.58	4.75	0.69	4.49	0.74
ВЮ2	66.39	167.72	21.43	94.32	21.62	5.88	19.18	2.97	17.65	3.32	10.16	1.50	10.03	1.56
О1	8.22	21.20	3.17	15.23	3.68	0.51	3.55	0.51	2.76	0.52	1.41	0.17	0.99	0.14

Верхне-Юрьевских источников и оз. Горячее. Поведение микроэлементов в водах различных типов наиболее удобно рассматривать в терминах коэффициентов обогащения элементов F_i, которые определяются точно так же, как и ETR (Taran et al., 2011). В качестве нормирующего элемента нами также использован магний. Данные по микроэлементному составу вмещающих пород заимствованы из работы (Мартынов и др., 2010), некоторые отсутствующие элементы взяты из (Войткевич и др., 1990) для среднего андезита. На диаграмме (рис. 5) значения коэффициентов распределения упорядочены по их убыванию в источниках Ручья № 1. Показано, что для обеих проб характерно схожее распределение элементов, дополнительно подтверждающее единый источник формирования термальных вод, разгружающихся в долине этого ручья. Значительная часть точек ложится на линии конгруэнтного растворения породы ($F_i = 1$). Преимущественно в эту группу входят высокозарядные и крупноионные литофильные элементы. Заметно выше единицы ложатся точки только для B и As, которые, являясь летучими элементами, легко переносятся с паровой фазой и, следовательно, могут поступать вместе с кислыми газами с глубинным флюидом. Третья группа элементов с $F_i < 1$, указывает на обеднение раствора по отношению к этим элементам. В эту группу попадают большинство транзитных металлов, которые могут быть потеряны в процессе осаждения в виде сульфидов или адсорбированы на вторичных фазах. Распределение микроэлементов в водах Верхне-Юрьевских источников по данным опробования 2020 г. (табл. 1, т. ВЮ-1) повторяют профиль, полученный нами ранее по данным 2014 г. (Kalacheva et al., 2016).

Спектры РЗЭ, нормированные на хондрит для пород вулкана Эбеко демонстрируют характерную для дуговых андезибазальтов структуру с более высокими содержаниями легких РЗЭ, чем тяжелых, и отсутствием Eu-минимума (рис. 6*а*). Нормированные на хондрит профили РЗЭ для термальных вод схожи между собой и напоминают профиль вмещающих пород (рис. 6*б*), тогда как нормированные на вмещающую породу — имеют практически плоский вид (рис. 6*в*). Преимущественно это может быть связано с тем, что перешедшие в воду в процессе растворения РЗЭ элементы так и остаются в растворе, не участвуя в процессах вторичного минералообразования в гидротермальной системе вулкана. Вместе с тем, следует отметить, что уровень содержания лантаноидов в Верхне-Юрьевских источниках на порядок выше, чем в источниках привершинной части вулкана.

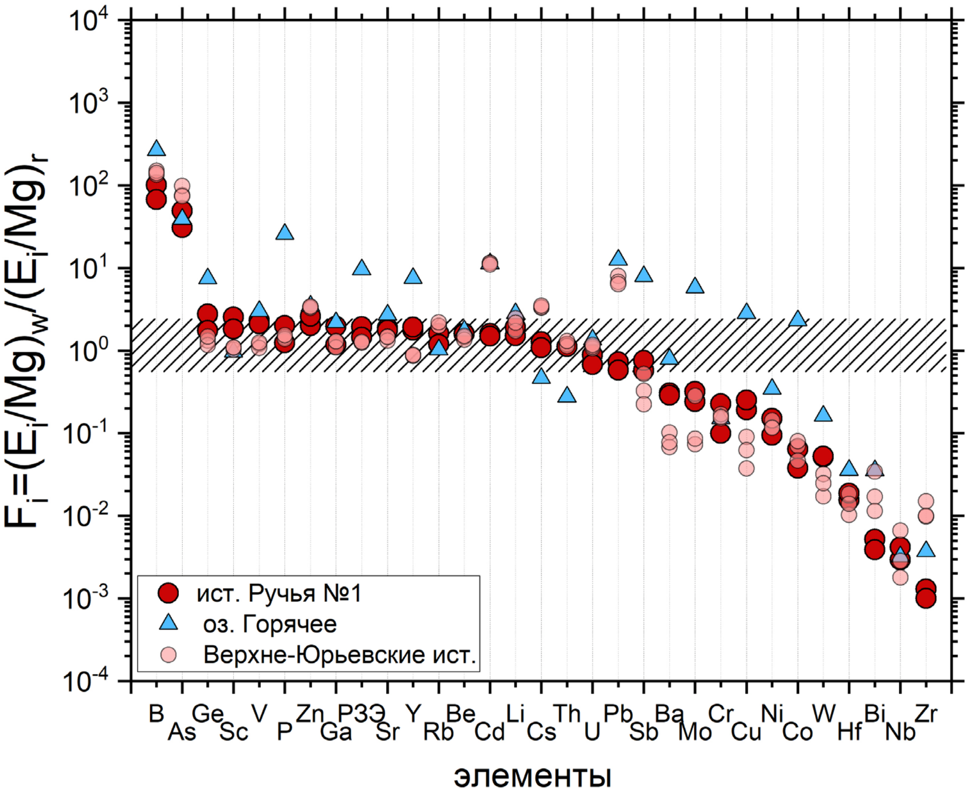

Рис. 5. Диаграмма коэффициентов обогащения элементов между водой и породой, нормированные на Mg (весовые единицы, состав пород по (Мартынов и др., 2010)).

Fig. 5. Element enrichment factor diagram between water and rock, normalized to Mg (weight units, rock composition by (Martynov et al., 2010)).

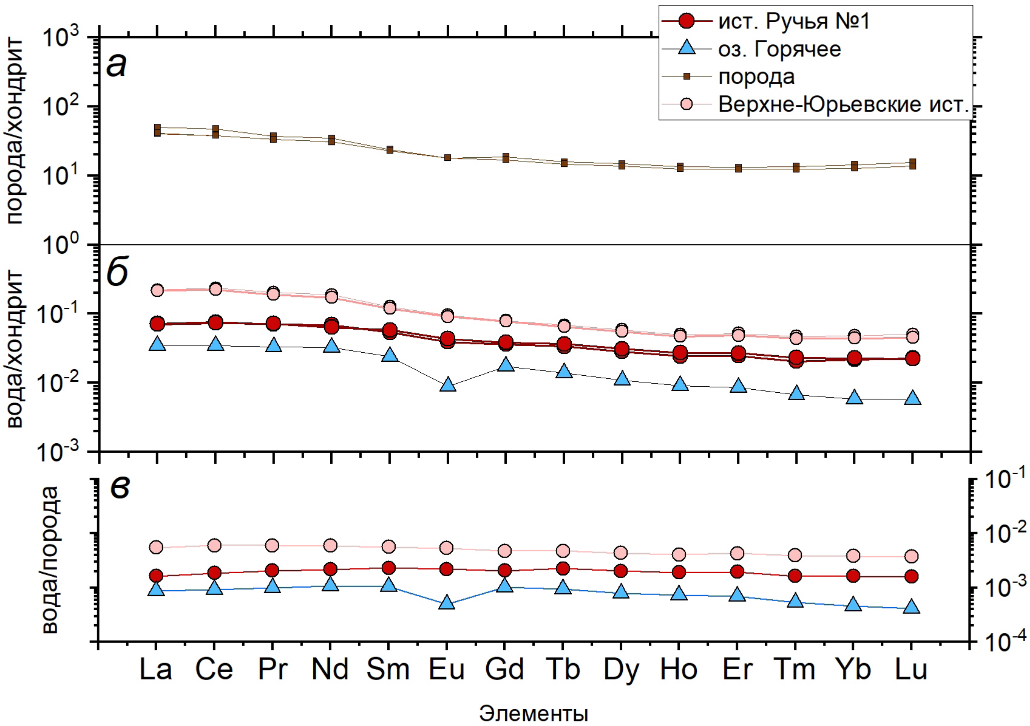

Рис. 6. Распределение РЗЭ в воде озера, нормированное на хондрит, по (McDonough, Sun, 1995) и на состав породы по (Мартынов и др., 2010).

Fig. 6. The distribution of REE in lake water normalized to chondrite, according to (McDonough, Sun, 1995) and to rock composition by (Martynov et al., 2010).

В водах оз. Горячее при достаточно схожем с термальными водами профиле, наблюдается ярко выраженный европиевый минимум по Eu и обеднение в отношении тяжелых редкоземельных элементов.

Изотопный состав термальных вод. Для источников привершинной части вулкана диапазон значений δD составляет от −80.5‰ до −79‰, δ¹⁸O находится в интервале −11.5‰ – −11.2‰ (табл. 1), что укладывается в интервал, определенный для метеорных вод о. Парамушир (Калачева, Таран, 2019). Составы Верхне-Юрьевских источников (дополнительные данные для построения графика заимствованы из (Taran, Kalacheva, 2020)) незначительно изотопно утяжелены по сравнению с источниками Ручья № 1, что демонстрируется на диаграмме соотношений δD и δ¹⁸O (рис. 7). На графике также показаны точки составов конденсатов высокотемпературных фумарольных газов Активной воронки вулкана Эбеко из работы (Taran et al., 2018). По соотношению стабильных изотопов, источники Ручья № 1 и Верхне-Юрьевские источники расположены между областью метеорных и конденсатных вод, образуя совместно с точками для вулканических паров тренд в сторону составов «андезитовых» вод по (Таран и др., 1989; Giggenbach, 1992). Доля магматической компоненты в водах привершинной области минимальная.

Геохимическое моделирование. Для изучения процессов вторичного минералообразования в вулкано-гидротермальной системе и оценки температурных условий формирования термальных вод проведено геохимическое моделирование состояния насыщения вод по отношению к наиболее распространенным для кислых условий минеральных фаз. Индекс насыщения SI (*Saturation Index*) выражается через логарифм отношения произведений активностей ионов (IAP) к произведению констант диссоциации образуемых ими соединений (K_T): $SI = \lg(IAP/K_T)$.

Результаты моделирования показывают (табл. 3), что термальные источники находятся в равновесии или незначительно перенасыщены по отношению к бариту и различным модификациям кремнезема (кварц, халцедон, кристобалит и др.), за исключением аморфного кремнезема. По отношению к другим сульфатным минералам (ангидрит, гипс, целестин, алунит), окислам и гидроокислам алюминия и железа (диаспор, бемит, гиббсит, гетит и др.), а также вторичным алюмосиликатам (каолинит, монтмориллонит) наблюдается значительное недонасыщение. В целом распределение значений сопоставимо с данными, полученными для Верхне-Юрьевских источников.

Учитывая, что основные катионы в ультракислых водах вулкана Эбеко присутствуют в результате конгруэнтного растворения вмещающей

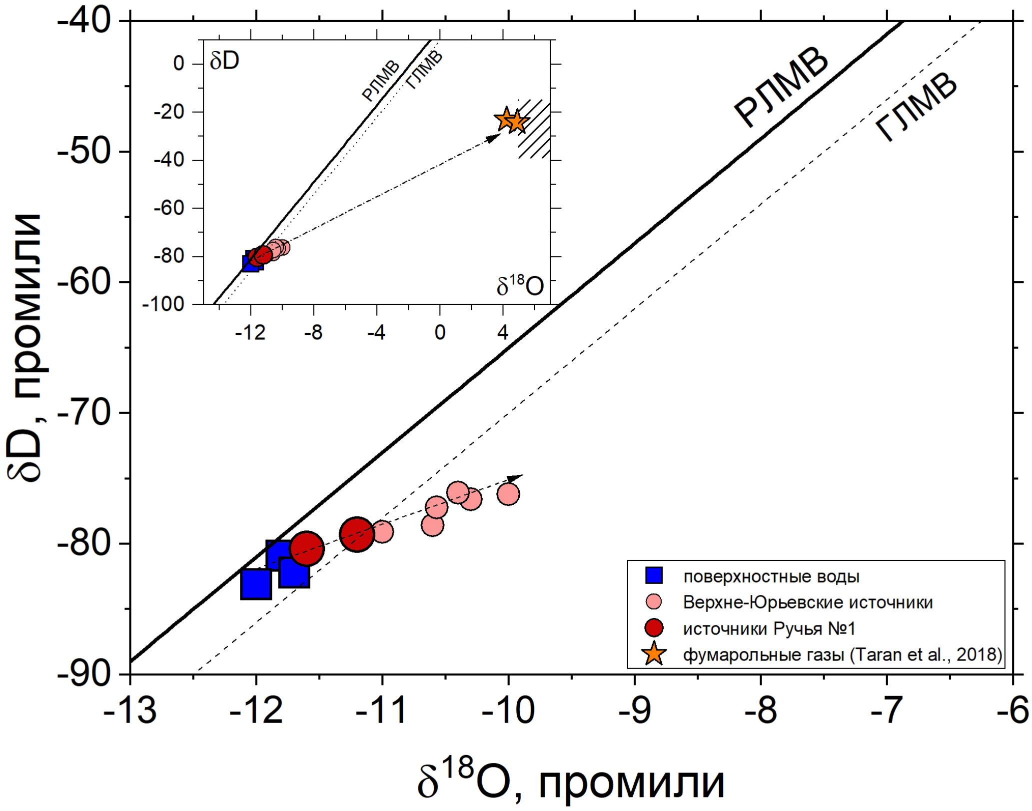

Рис. 7. Изотопный состав термальных вод. ГЛМВ — глобальная линия метеорных вод, по (Craig, 1961), РЛМВ — региональная линия метеорных вод, по (Чешко, 1994). Заштрихованный прямоугольник на врезке — область распространения «андезитовых» вод по (Таран и др., 1989; Giggenbach, 1992).

Fig. 7. Isotopic composition of thermal waters. GLMW is the global line of meteoric waters by (Craig, 1961). RLMW is regional meteoric waters line, after (Cheshko, 1994). The shaded rectangle in the box is the area of «andesitic» waters according (Giggenbach, 1992; Taran et al., 1989).

Таблица 3. Индексы насыщения термальных вод по отношению ко вторичным минералам

Table 3. Saturation indices of thermal waters in relation to secondary minerals

Минерал\шифр пробы	И1	И2/21	И3	И5	ВЮ2
Ангидрит	-1.02	-0.89	-0.81	-0.91	-0.47
Барит	0.01	-0.05	0.10		0.32
Целестин	-1.46	-1.58	-1.61	-1.40	-1.34
Гипс	-1.09	-1.01	-0.79	-0.83	-0.81
Джурбанит	-1.33	-1.31	-1.21	-0.97	-1.71
Алунит	-3.66	-2.83	-3.96	-3.13	-3.36
Каолинит	-7.02	-5.96	-7.08	-5.76	-8.07
Пирофиллит	2.40	3.86	1.22	2.11	2.88
Бёмит	-4.88	-4.22	-5.00	-4.65	-4.73
Диаспор	-3.48	-2.86	-3.53	-3.13	-3.48
Гиббсит	-4.87	-4.27	-4.89	-4.46	-4.96
Гётит	-4.75	-3.99	-4.59	-3.78	-4.54
Халцедон	0.56	0.49	0.53	0.76	0.13
Кристобалит	0.53	0.45	0.52	0.75	0.07
Кварц	0.88	0.80	0.88	1.12	0.40
Аморфный кремнезем	-0.16	-0.22	-0.21	-0.01	-0.53

породы, использование гидрохимических геотермометров, основанных на содержаниях Na, K, Mg и Ca и их соотношений, не корректно. Поэтому, для оценки температурных условий формирования термальных вод, разгружающихся в каньоне Ручья № 1, мы использовали минеральный геотермометр, основанный на оценке температур осаждения вторичных минералов, характерных для расширенных аргиллитовых изменений. Для этого было проведено геохимическое моделирование с использованием индексов насыщения (SI) в диапазоне температур от 100 до 250°C (рис. 8*а*). Расчетные температуры SI (при log SI = 0) для большинства задействованных минералов (ангидрита, каолинит, целестин, диаспор и др.) составляют от 140°C до 160°C. Другие сульфаты, включая барит и гипс, не пересекают линию насыщения во всем интервале температур. Барит, как упоминалось ранее, достигает насыщения при температуре отбора проб.

Для сравнения условий формирования вод (рис. 8*б*) также приведено моделирование для одного из наиболее горячего Верхне-Юрьевского источника (табл. 1, проба ВЮ2). Распределение профилей для ВЮ-источника и источника Ручья № 1 значительно отличаются. Как ранее отмечалось (Kalacheva et al., 2016), для источников долины р. Юрьева характерен широкий диапазон температур (от 130 до 210°C), при котором наблюдается модельное насыщение минеральных фаз, а расчетная температура по кремниевым геотермометрам (Калачева, Котенко, 2013) еще выше (217°C).

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе (Kalacheva et al., 2016) была представлена концептуальная модель вулкано-гидротермальной системы Эбеко. На основании данных по газовому составу низкотемпературных фумарол, химическому и изотопному составу Верхне-Юрьевских источников было показано, что в постройке вулкана на глубине ~300 м от кратеров находится ограниченный водоносный горизонт, содержащий ультракислый хлоридно-сульфатный раствор с температурой >200–210°C. Этот водоносный горизонт находится в «стационарном» состоянии, сбалансированном притоком магматического флюида с глубины и метеорной водой с поверхности, и оттоком парогазовой смеси через предвершинную часть вулкана и латеральным дренажом в сторону падения гидравлического градиента.

Детальное изучение химического состава термальных вод, разгружающихся в каньоне Ручья № 1 и сравнительный анализ с данными по Верхне-Юрьевским источникам указывают на более сложную структуру гидротермальной системы. Обе группы источников являются типичными представителями ультракислых сульфатно-хлоридных вулканических вод, детально рассмотренных в работе (Taran, Kalacheva, 2020). Основной механизм их формирования сводится к конденсации вулканических паров в близповерхностных условиях и/или растворению «кислых» магматических летучих (SO_4, Cl, HF) в аэрированных подземных водах с образованием смеси

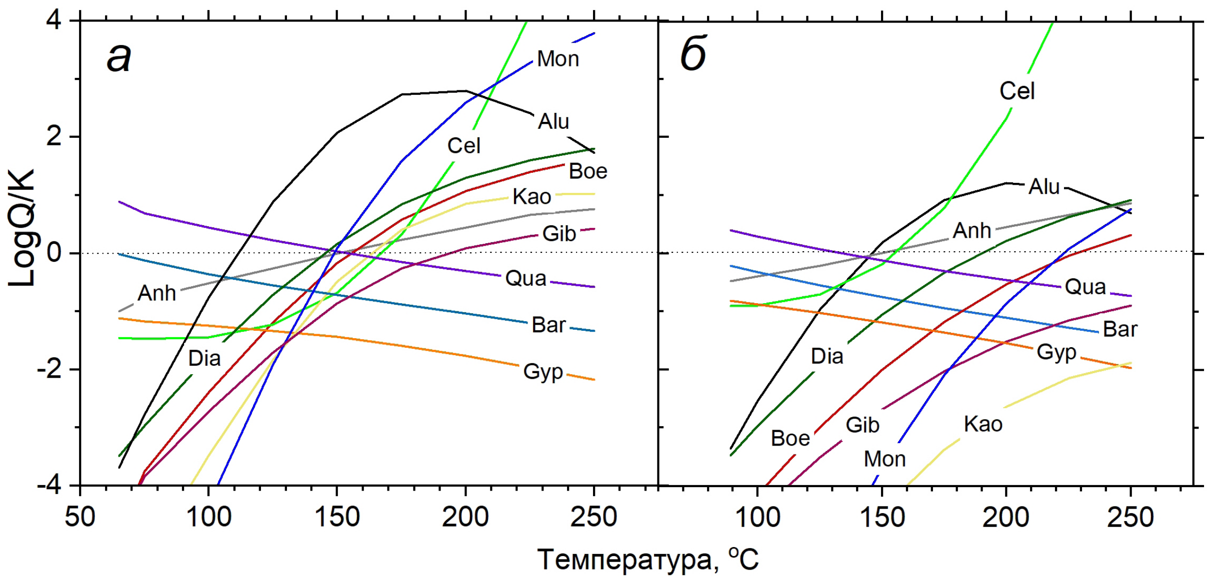

Рис. 8. Индексы насыщения вод Ручья № 1 (*а*) и Верхне-Юрьевских источников (*б*) по отношению к вторичным минералам. Alu — алунит, Anh — ангидрит, Bar — барит, Boe — бемит, Cel — целестин, Qua — кварц, Dia — диаспор, Gib — гиббсит, Gyp — гипс, Kao — Каолинит, Mon — монтмориллонит.

Fig. 8. Water saturation indices of Stream № 1 (*a*) and Verkhne-Yurievsk springs (*б*) in relation to secondary minerals. Alu — alunite, Anh — anhydrite, Bar — barite, Boe — boehmite, Cel — celestite, Qua — quartz, Dia — diaspore, Gib — gibbsite, Gyp — gypsum, Kao — kaolinite, Mon — montmorillonite.

кислот (Иванов, 1956; Ellis, Mahon, 1977). Область формирования таких вод (гидротермальный резервуар) в большинстве случаев расположена гипсомерически выше, чем область разгрузки, и движение подземных потоков направлено в сторону падения гидравлического градиента.

Условия формирования источников Ручья № 1 схожи с источниками долины р. Юрьева, но не идентичны. Источники привершинной части вулкана менее минерализованные, имеют меньшую температуру, характеризуются низкими дебитами. Составы вод отличаются по соотношению основных анионов (SO_4/Cl) и катионов (Al+Fe/Ca+Mg/Na+K), по изотопии. При температуре отбора проб источники равновесны/неравновесны по отношению к одинаковому набору минеральных фаз. При модельном увеличении температуры до 250°С, насыщение (осаждение) вторичных минералов, характерных для расширенных аргиллитовых изменений происходит в разных температурных диапазонах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличие разноуровневых водоносных горизонтов вблизи поверхности. Малоглубинное геофизическое зондирование методом электротомографии на постоянном токе, выполненное на отдельных участках привершинной части вулкана (Бортникова и др., 2013; Панин и др. 2010, 2012) показало наличие на глубинах до 40 м, в зависимости от расположения фумарольных полей, локальных гидротермальных резервуаров. Один из приповерхностных водоносных горизонтов зафиксирован на внешнем склоне Южного кратера, который в виде линзы простирается под Юго-Восточное поле (Панин и др., 2012). Учитывая структурные особенности прикратерной зоны вулкана, можно предположить, что область водного питания для него ограничена Южным кратером. Разгрузка осуществляется в виде парогазовых выходов и площадного испарения с поверхности термального поля, а также в виде маломощных горячих источников, которые были обнаружены нами в глубоких врезах Ручья № 1.

ВЫВОДЫ

Термальные воды, разгружающиеся в узкой каньонобразной долине Ручья № 1 привершинной части вулкана Эбеко, представлены малодебитными горячими (температура до 70°С) минерализованными (до 5 г/л) источниками с Al-Ca-SO_4-Cl типом вод.

Соотношение SO_4/Cl, а также относительно низкие содержания фтор-ионов указывают на участие в формировании анионного состава исследуемых термальных вод «отфильтрованных» вулканических газов. Низкое соотношение SO_4/Cl может быть вызвано также потерей серы при выходе вод на поверхность за счет осаждения сульфурита.

Катионный состав вод, включая РЗЭ, образуется за счет практически изохимического растворения вмещающих пород в эквиваленте 5 г на 1 л воды.

Для исследуемых вод характерно типичное для подобного типа вод отношение к минеральным фазам. Они находятся в равновесии или незначительно перенасыщены по отношению к бариту и различным модификациям кремнезема. По отношению к другим сульфатным минералам, окислам и гидроокислам алюминия и железа, а также вторичным алюмосиликатам наблюдается значительное недонасыщение.

Расчетные по минеральным геотермометрам температуры формирования вод составляют 140–160°С.

Сравнительная геохимическая характеристика двух групп ультракислых сульфатно-хлоридных вод, разделенных расстоянием и перепадом высот указывает на то, что постройка вулкана Эбеко вмещает гидротермальную систему, характеризующуюся более сложным строением, чем предполагалось ранее (Kalacheva et al., 2016). Помимо основного гидротермального резервуара, питающего высокодебитные ультракислые источники, расположенные на северо-западном склоне вулкана в долине р. Юрьева, существуют приповерхностные локальные водоносные горизонты, разгружающиеся в виде малодебитных источников в глубоких врезах истоков р. Кузьминка.

Полученные результаты только частично дают представление о гидрохимических особенностях термальных вод, разгружающихся в привершинной части вулкана. Требуются дополнительные комплексные исследования для уточнения гидрогеологической структуры, взаимосвязи водоносных горизонтов, условий питания и разгрузки термальных вод гидротермальной системы, приуроченной к постройке активного вулкана Эбеко.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00517.

Авторы выражают признательность своим коллегам по полевым работам на о. Парамушир Т.А. Котенко и Л.В. Котенко. Отдельные слова благодарности Д.Ю. Эрдниевой за выполнение аналитических исследований.

Список литературы [References]

Бортникова С.Б., Бессонова Е.П., Трофимова Л.Б. и др. Гидрогеохимия газогидротермальных источников вулкана Эбеко (о-в Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 39–51 [*Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Trofimova L.B. et al.* Hydrogeochemistry of gas-hydrothermal springs of the

Ebeko volcano (Paramushir Island) // Volcanology and seismology. 2006. № 1. P. 39–51 (in Russian)].

Бортникова С.Б. Бессонова Е.П., Гора М.П. и др. Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис // Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 282 с. [*Bortnikova S.B., Bessonova E.P., Gora M.P. et al.* Hydrotherms of active volcanoes of Kamchatka and the Kuril Islands: composition, structure, genesis // Novosibirsk: IPGG SO RAN, 2013. 282 p. (in Russian)].

Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с. [*Voitkevich G.V., Kokin A.V., Miroshnikov A.E., Prokhorov V.G.* A Handbook of Geochemistry, Moscow: Nedra, 1990. 480 p. (in Russian)].

Иванов В.В. Гидротермы очагов современного вулканизма Камчатки и Курильских островов. // Труды лаборатории вулканологии. М: АН СССР, 1956. С. 197–217 [*Ivanov V.V.* Gidrotermy ochagov sovremennogo vulkanizma Kamchatki i Kuril'skih ostrovov // Proceedings of the Laboratory of Volcanology. M: AN SSSR, 1956. P. 197–217 (in Russian)].

Иванов В.В. Современная гидротермальная деятельность вулкана Эбеко на острове Парамушир // Геохимия. 1957. № 1. С. 63–76 [*Ivanov V.V.* Modern hydrothermal activity of the Ebeko volcano on Paramushir Island // Geochemistry. 1957. № 1. P. 63–76 (in Russian)].

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 [*Kalacheva E.G., Kotenko T.A.* The chemical composition of waters and the conditions for the formation of the Upper Yuryevsky thermal springs (Paramushir Island, the Kuril Islands) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2013. № 2(22). P. 55–68 (in Russian)].

Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролирующие изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3–17. https://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17 [*Kalacheva E.G., Taran Yu.A.* Processes Controling Isotopic Composition (δD and $\delta^{18}O$) of Thermal Waters of the Kuril Island Arc // Journal of Volcanology and Seismology. 2019. V. 13. Iss. 4. P. 201–215. https://doi.org/10.1134/S0742046319040031]

Котенко Т.А., Калачева Е.Г. Гидрологический и гидрохимический режим кратерного озера вулкана Эбеко (1951–2020 гг.), о. Парамушир // Материалы XXIV научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2021. С. 125–128 [*Kotenko T.A., Kalacheva E.G.* Gidrologicheskij i gidrohimicheskij rezhim kraternogo ozera vulkana Ebeko (1951–2020 gg.), o. Paramushir // Materialy XXIV nauchnoj konferencii, posvyashchennoj Dnyu vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2021. P. 125–128 (in Russian)].

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. 2019. С. 82–85 [*Kotenko T.A., Sandimirova E.I., Kotenko L.V.* Izverzhenie vulkana Ebeko (o. Paramushir) v 2018 g. // Materialy XXII nauchnoj konferencii, posvyashchennoj Dnyu vulkanologa. Petropavlovsk-Kamchatsky. 2019. P. 82–85 (in Russian)].

Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Кимура Дж.И. и др. Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология. 2010. Т. 18. № 5. С. 512–535 [*Martynov Yu.A., Khanchuk A.I., Kimura J.I. et al.* Geochemistry and petrogenesis of volcanic rocks in the Kuril island // Petrologiya. 2010. V. 18. Iss. 5. P. 489–513. https://doi.org/10.1134/S0869591110050048].

Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с. [*Markhinin E.K., Stratula D.S.* Hydrotherms of the Kuril Islands. M.: Nauka, 1977. 212 p. (in Russian)].

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 [*Melekestsev I.V., Dvigalo V.N., Kirianov V.Y. et al.* Ebeko volcano, Kuril Islands: eruptive history and potential volcanic hazards. Part I // Volcanology and seismology. 1994. Vol. 15. № 3. P. 339–354].

Никитина Л.П. Миграция металлов с активных вулканов в бассейн седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с. [*Nikitina L.P.* Migration of metals from active volcanoes to the sedimentation basin. M.: Nauka, 1978. 80 p. (in Russian)].

Панин Г.Л., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Карин Ю.Г. Геофизико-геохимические исследования термальных полей вулкана Эбеко (о. Парамушир) // Литосфера. 2010. № 3. С. 171–176 [*Panin G.L., Kotenko T.A., Kotenko L.V., Karin Yu.G.* Geophysical and geochemical studies of the thermal fields of the Ebeko volcano (Paramushir island) // Litosfera. 2010. № 3. P. 171–176 (in Russian)].

Панин Г.Л., Котенко Т.А., Бортникова С.Б. Малоглубинное геофизическое зондирование фумарольных полей вулкана Эбеко // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский. 2012. С. 138–142 [*Panin G.L., Kotenko T.A., Bortnikova S.B.* Maloglubinnoe geofizicheskoe zondirovanie fumarol'nyh polej vulkana Ebeko // Materialy konferencii, posvyashchennoj Dnyu vulkanologa «Vulkanizm i svyazannye s nim processy». Petropavlovsk-Kamchatsky. 2012. P. 138–142 (in Russian)].

Сидоров С.С. Активизация вулкана Эбеко в 1963–1964 гг. и эволюция его гидротермальной деятельности в предшествующий период // Бюллетень вулканологических станций. 1966. № 40. С. 45–60 [*Sidorov S.S.* Aktivizaciya vulkana Ebeko v 1963–1964 gg. i evolyuciya ego gidrotermal'noj deyatel'nosti v predshestvuyushchij period // Bulletin of volcanological stations. 1966. № 40. P. 45–60 (in Russian)].

Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Дубик Ю.М. Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах // ДАН. 1989. Т. 304. № 2. С. 440–443 [*Taran Yu.A., Pokrovsky B.G., Dubik Yu.M.* Isotopic composition and origin of water in andesitic magmas // Doklady Earth Sciences. 1989. V. 304. P. 1191–1194 (in Russian)].

Храмова Г.Г. Кратерно-озерные отложения: динамика формирования (на примере вулкана Эбеко) // Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. 136 с. [*Khramova G.G.* Crater-lake deposits: formation dynamics (on the example of the Ebeko volcano) // Vladivostok: FEB AN SSSR, 1987. 136 p. (in Russian)].

Чешко А.Л. Формирование основных типов термальных вод Курило-Камчатского региона по данным изотопных исследований (D, ^{18}O, $^{3}He/^{4}He$) // Геохимия. 1994. № 7. С. 988–1001 [*Cheshko A.L.* The generation of main types of thermal water in the Kuril–Kamchatka region based on isotopic studies (D, ^{18}O, $^{3}He/^{4}He$) // Geochemistry. 1994. № 7. P. 988–1001 (in Russian)].

Ball J.W., Nordstrom D.K. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters // US Geological Survey, 1991. 189 p. https://doi.org/10.3133/ofr91183

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. № 3465. P. 1702–1703.

Ellis A.J., Mahon W.A.J. Chemistry and Geothermal Systems. NY: Acad. Press, 1977. 392 p.

Giggenbach W.F. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin // Earth and Planetary Science Letters. 1992. V. 113. № 4. P. 495–510. https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90127-H

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 // Journal of Volcanology and Geothermal Research 2016. V. 310. P. 118–131. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.006

McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. № 3–4. P. 223–253. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's Guide to PHREEQC (Version 2): A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 1999. 312 p. https://doi.org/10.3133/wri994259

Pasternack G.B., Varekamp J.C. The geochemistry of the Keli Mutu crater lakes, Flores Indonesia // Geochemical Journal. 1994. V. 28. № 3. P. 243–262. https://doi.org/10.2343/geochemj.28.243

Taran Y., Rouwet D., Inguaggiato S., Aiuppa A. Major and trace element geochemistry of neutral and acidic thermal springs at El Chichón volcano, Mexico: Implications for monitoring of the volcanic activity // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2008. V. 178 № 2. P. 224–236. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.030

Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 405. 107036. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036

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

Varekamp J.C. The chemical composition and evolution of volcanic lakes // Volcanic Lakes. Advances in Volcanology. Springer-Verlag, 2015. P. 93–123. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_4

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THERMAL SPRINGS IN THE SAMMIT PART OF EBEKO VOLCANO (PARAMUSHIR ISLAND, KURILE ISLANDS)

E.G. Kalacheva, E.V. Voloshina

Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: keg@kscnet.ru

Received February 16, 2022; revised April 19, 2022; accepted June 27, 2022

The chemical and isotopic composition of hot springs at the apical part of the active Ebeko volcano (Paramushir Island, Kuril Islands) is characterized based on the data obtained from fieldwork in 2020–2021. Thermal waters discharging from one of the sources of the Kuzminka River are ultra-acid (pH<2) Al-Ca-SO_4-Cl type with mineralization up to 5 g/l and temperature up to 70°C. The anionic composition of waters is formed due to the dissolution in groundwater of acidic volcanic gases, partially «purified» in the main reservoir of the volcano's hydrothermal system. The cationic composition of waters, including rare-earth elements, is formed by isochemical dissolution of host rocks in the equivalent of 5 g per 1 liter of water. Differences in the isotopic composition and ratios of macrocomponents (SO_4/Cl, Al+Fe/Ca+Mg/Na+K) of waters of the near the summit prings and the northwestern slope suggest the presence of different-level aquifers in the hydrothermal system confined to the edifice of the Ebeko volcano.

Keywords: Ebeko, Paramushir, thermal springs, chemical composition, trace elements.