

Химический состав и условия формирования ультракислых термальных вулканических вод Курильской островной дуги

Калачева Е.Г.

Geochemistry and formation conditions of acidic thermal volcanic waters of the Kuril Island arc

Kalacheva E.G.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: keg@kscnet.ru

Приводится краткая характеристика химического и изотопного состава ультракислых термальных вод, разгружающихся на склонах активных вулканов Курильских островов: Парамушир, Шиашкотан, Уруп, Итуруп и Кунашир. Показано, что, в зависимости от процессов, влияющих на формирование химического состава, термальные воды делятся на три группы: Al-Ca-SO₄-Cl, Ca-Na-SO₄-Cl (Cl-SO₄) и Na-Cl-SO₄.

Одним из наиболее специфических типов термальных вод, разгружающихся на склонах вулканических построек, являются ультракислые (pH<3.5) SO₄-Cl (Cl-SO₄) (в зависимости от мольного отношения сульфат/хлор) вулканические воды (*Acidic Sulphate-Chloride* (ASC) – воды, по [5]). Основной механизм их формирования 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 [1]. Подобные воды преимущественно распространены на вулканах островных дуг и континентальных окраин Тихоокеанского огненного кольца. На островах Курильской дуги существуют 12 вулкано-гидротермальных систем, характеризующихся наличием горизонтов ASC-вод (рис. 1).

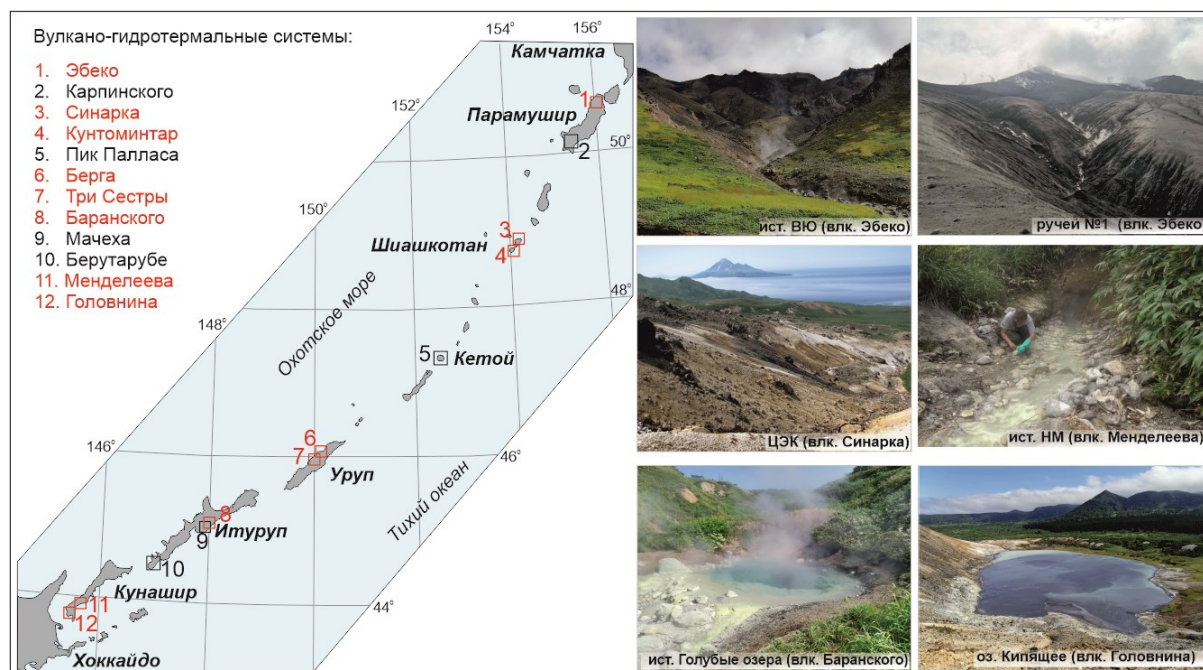


Рис. 1. Курильская островная дуга с расположением вулкано-гидротермальных систем.

В базе данных автора, полученной по результатам опробования в ходе экспедиций разных лет, есть достоверная информация по химическому составу поверхностных проявлений вод восьми гидротермальных систем, приуроченных к вулканам Эбеко (о. Парамушир), Синарка и Кунтоминтар (о. Шиашкотан), Берга и Три Сестры (о. Уруп), Баранского (о. Итуруп), Менделеева и Головнина (о. Кунашир).

Разгрузка ASC-вод на вулкане Эбеко осуществляется в двух местах: в привершинной части (рис. 1, источники Ручья № 1) и на северо-западном склоне в долине р. Юрьева (Верхне-Юрьевские источники (ВЮ)). Основные выходы на вулкане Синарка сосредоточены на его северном склоне на разном удалении от Центрального экструзивного купола (ЦЭК). Проявления Кунтоминтарской системы локализованы в кратере одноименного вулкана вблизи фумарол. На о. Уруп разгрузка осуществляется на западном склоне вулкана Берга, на некотором расстоянии от экструзивного купола вдоль русла р. Марья (источники Марьянские), и у подножия вулкана Три Сестры в районе мыса Ключевой. Выходы ASC-вод гидротермальной системы вулкана Баранского сосредоточены в долине руч. Кипящий (источники Голубые озера (ГО)). В районе вулкана Менделеева находятся три группы источников данного типа: Нижне- и Верхне-Докторские и Нижне-Менделевские. В кальдере Головнина ASC-воды разгружаются на дне оз. Кипящее (рис. 1).

Химический состав

В Таблице приводится общий химический состав основных групп источников, охваченных гидрохимическим опробованием.

Таблица. Химический (мг/л) состав кислых ASC-вод Курильских островов.

	Вулкан	Источники	Год	t °C	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al	Fe
1	Эбеко	Ручей № 1	2021	70.0	1.8	2089	1112	9.7	48.1	25	161	43.1	188	79.5
		Верхне-Юрьевские	2020	89.0	1.4	8880	3192	84	225	113	381	161	505	251
2	Кунтоминтар	кратер	2016	76.0	2.3	6083	1086	44	111	15	432	92	440	341
3	Синарка	ЦЭК, терм. пл. № 1	2017	51.0	2.7	1538	2538	0.2	385	29.8	545	501	49.1	106
		ЦЭК, терм. пл. № 4	2017	46.3	2.7	567	1665	5.8	132	14.7	291	141	70	2.8
4	Берга	Марьянский	2017	31.0	3.2	1074	548	3.3	192	23.4	339	155	20	4.4
5	Три сестры	Мыс Ключевой	2017	45.0	2.1	1091	234	1.4	129	18.1	235	47	13.7	5.9
6	Баранского	Голубые озера	2021	95.1	1.2	4865	1838	31	112	44.6	147	38	165	47
7	Менделеева	Нижне-Менделеевские	2017	84.0	2.0	1157	1135	1.3	393	40	128	55.3	30.9	179
		Верхне-Докторские	2017	86.3	2.0	1035	1363	1.6	525	59	144	59.3	25.5	199
		Нижне-Докторские	2017	53.7	2.9	512	784	0.9	360	31.4	117	43.1	46.5	146
8	Головнина	оз. Кипящее (сток)	2021	35.0	2.4	475	756	2.1	279	37.6	108	47.4	12.1	12.8

Анионы. Характерной особенностью анионного состава исследуемых ASC-вод является постоянное присутствие фтор-ионов в концентрациях от 1 до 80 мг/л. Согласно [6], островодужные вулканические высокотемпературные газы характеризуются молярным отношением Cl/F, равным 11±4. Наиболее высокие концентрации фтора и низкие отношения Cl/F имеют источники, расположенные на склонах вулканов Эбеко (Верхне-Юрьевские) и Баранского (Голубые озера), а также в кратере вулкана Кунтоминтар. На треугольной диаграмме (рис. 2а) эти воды занимают область, близкую к соотношениям высокотемпературных газов, что служит одним из сильных индикаторов наличия магматического вклада в образование ультракислых вод. Остальные источники попадают в другую группу («смешанные» воды по [5]), свидетельствующую о частичном влиянии других процессов (смешение, разбавление и т.д.) на формирование их химического состава.

Соотношение SO₄/Cl в ASC-водах Курильских островов находится в диапазоне от 0.2 до 2. Максимальные значения характерны для вод, формирующихся в кратере вулкана Кунтоминтар (рис. 2б). В источниках с максимально низкими значениями pH и

высокими концентрациями фтор-ионов (Верхне-Юрьевские и Голубые озера) $SO_4/Cl \sim 1$. Для остальных ASC-вод Курильских островов соотношение $SO_4/Cl < 1$. Это может быть связано как с потерей серы при подъеме воды к поверхности или вблизи поверхности вследствие осаждения сульфатных минералов (ярозит, ангидрит, гипс и др.), так и за счет смешения с хлоридными водами.

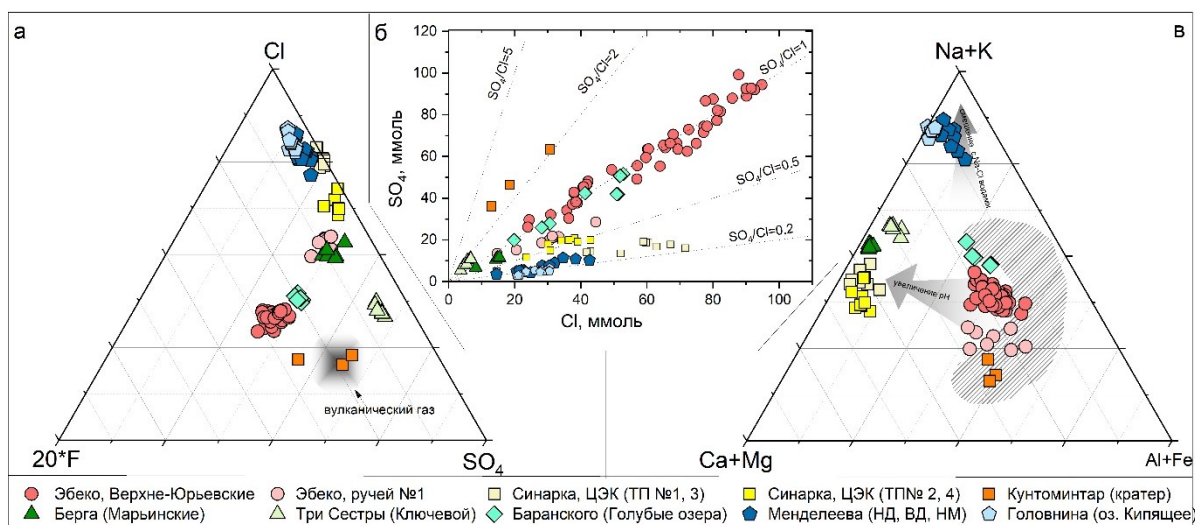


Рис. 2. Диаграммы химического состава (в молях) для ASC-вод. а – анионы, б – соотношение SO_4/Cl , в – катионы, заштрихованная область – вмещающие породы.

Катионы. На диаграмме (рис. 2в) соотношений макрокатионов, помимо данных по составам ASC-вод Курильских островов, дополнительно показана область состава неизменных вулканических пород, характерных для зон субдукции из [6]. Ультракислые воды, как правило, почти полностью растворяют породу, и точки их катионных составов в таком случае должны ложиться в заштрихованную область.

Однако, данные по исследуемым водам на диаграмме занимают три локальных области. В зону, близкую к породным соотношениям (1-я группа), попадают только ASC-воды, разгружающиеся на склонах вулкана Эбеко и Баранского. При этом Верхне-Юрьевские источники и источники прикратерной области вулкана Эбеко тяготеют к более основным породам, а Голубые озера – к более кислым разностям, что соответствует реальной обстановке. Постройка вулкана Эбеко сложена преимущественно андезитобазальтами, тогда как для вулкана Баранского характерны также и дацитовые породы. Источники островов Шиашкотан и Уруп занимают компактную область вблизи границы $Ca+Mg - 2(Na+K)$ (2-я группа). Соотношения щелочноземельных/щелочных металлов 1-й и 2-й групп имеют близкие значения, но для вод 2-й группы наблюдаются низкие концентрации алюминия и железа за счет более высоких значений pH. Как известно, концентрации алюминия и железа очень чувствительны к pH, воды с $pH > 2.5$ резко обедняются этими компонентами. При разбавлении термальных вод холодными грунтовыми потоками, помимо снижения температуры, происходит увеличение pH. Разгрузка таких вод часто сопровождается интенсивным осаждением железосодержащих соединений с формированием протяженных «плащей» красно-кирпичного цвета, что можно наблюдать в зонах разгрузки ASC-вод вблизи экструзивных куполов вулканов Синарка и Берга.

Источники острова Кунашир образуют третью группу вблизи угла Na+K. В их формировании принимают участие хлоридные натриевые воды более глубоких горизонтов гидротермальных систем вулканов Менделеева и Головнина [3, 4]. Вследствие этого происходит увеличение относительных концентраций натрия (+калий), которое мы наблюдаем на диаграмме.

Изотопный состав воды

ASC-воды являются результатом конденсации магматических паров/растворения магматических газов (в основном SO₂, HCl и HF) в близповерхностных локальных водоносных горизонтах. Следовательно, их изотопный состав может отличаться от состава локальных метеорных вод. Нашими исследованиями [2, 5] показано, что в ультракислых водах Курильских островов наблюдается эффект смешения метеорных и магматических вод. Максимальные изотопные сдвиги были выявлены в термальных водах вулканов Синарка и Кунтоминтар (о. Шиадокотан). Вклад магматической компоненты в состав этих вод оценен в 15-20%. Для остальных ASC-вод, имеющих относительно низкие концентрации хлора (<1.5 г/л) изотопный состав близок к составу локальных метеорных вод.

Заключение

В данных материалах представлены сведения о химическом составе 14 групп кислых сульфатно-хлоридных термальных (ASC) вод, разгружающихся на склонах активных вулканов Курильских островов. Несмотря на то, что основными процессами, определяющими их формирование, являются адсорбция магматических летучих веществ в неглубоких водоносных горизонтах в вулканических постройках (анионы) и растворения вмещающей породы (катионы), локальные (морфологические, геологические, гидрологические и др.) условия накладывают свой отпечаток. По соотношениям макрокомпонентов ASC-воды Курильских островов условно можно разделить на три группы. В первую группу «классических» ультракислых SO₄-Cl вод попадают источники вулканов Эбеко и Баранского. Во вторую, «разбавленную» холодными грунтовыми водами, входят термальные воды, разгружающиеся на склонах вулканов Синарка и Берга. В третью – «смешанную» с хлоридными натриевыми водами – попадают источники вулканов Менделеева и Головнина.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-17-00016.

Список литературы

1. Иванов В.В. О происхождении и классификации современных гидротерм // Геохимия. 1960. № 5. С. 443-449.
2. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролируемые изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3-17. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17>
3. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А. и др. Гидротермальная система вулкана Менделеева, о. Кунашир, Курильские острова: геохимия и вынос магматических компонентов // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 18-35. DOI: 10.7868/S0203030617050029
4. Kalacheva E., Taran Y., Voloshina E., Inguaggiato S. Hydrothermal system and acid lakes of Golovnin caldera, Kunashir, Kuril Islands: Geochemistry, solute fluxes and heat output // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2017. V. 346. P. 10-20. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.001>
5. Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. Vol. 405. Art. 107036. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2020.107036
6. Taran Y., Zelenski M. Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases. In: The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas. Geological Society, London, Special Publications. 2014. V. 410. № 1. P. 410-432. DOI: 10.1144/SP410.5