

УДК 551.21/23

## ПРОЦЕССЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ( $\delta D$ И $\delta^{18}O$ ) ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД КУРИЛЬСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

© 2019 г. Е. Г. Калачева<sup>1, \*</sup>, Ю. А. Таран<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

<sup>2</sup>Институт Геофизики Национального университета Мексики, Койоакан Мексика, 04510 Мехико

\*e-mail: keg@kscnet.ru

Поступила в редакцию 10.11.2018 г.

Постройки многих активных вулканов Курильских островов вмещают гидротермальные системы, поверхностные проявления которых представлены разнообразными по химическому составу и физико-химическим показателям источниками. В термальных водах Курильских островов определены четыре основных сдвига относительно локальной метеорной линии изотопного состава воды. В ультракислых Cl-SO<sub>4</sub> (SO<sub>4</sub>-Cl) водах наблюдается тренд смешения между метеорной составляющей и вулканическим паром. Кислые SO<sub>4</sub> воды демонстрируют тренды, указывающие на кинетическое фракционирование при температурах, близких к температуре кипения. Изотопные составы прибрежных источников ложатся на линию смешения метеорных и морских вод. Кислородный сдвиг для термальных вод, вскрытых скважинами, образуется путем изотопного обмена с вмещающей породой. Широтный эффект, отмеченный в изотопном составе метеорных вод, в разной степени проявляется и в изотопном составе термальных вод.

**Ключевые слова:** термальные воды, изотопный сдвиг, Курильские острова.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17>

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение изотопного состава воды широко применяется для определения происхождения и динамики природных вод [Ферронский, Поляков, 2009; Craig, 1961, 1963 и др.]. Первые результаты изучения закономерностей изотопного состава термальных вод областей современного вулканизма [Craig, 1963] показали, что изначально это локальные метеорные воды, а отклонения в значениях  $\delta^{18}O$  в сторону утяжеления в высокотемпературных водах по сравнению с локальными, связаны с изотопным обменом кислорода воды с вмещающими породами. Дальнейшими исследованиями [Тейлор, 1982; Giggenbach, Stewart, 1982; Giggenbach, 1992] было показано, что для различных типов термальных вод, формирующихся в разных геологических обстановках, могут существовать различные типы сдвигов  $\delta^{18}O$  и  $\delta D$  по отношению к линии метеорных вод. Эти сдвиги связывались уже не только с изотопным обменом между водой и породой, но и с фракционированием при кипении и испарении, смешением с реликтовыми метаморфическими рессолами, смешением с морскими водами и т.д.

Изотопный состав термальных вод Курильских островов изучен слабо. Первые данные для

термальных вод островов Парамушир, Итуруп и Кунашир (всего 16 анализов) представлены в монографии [Басков, Суриков, 1975]. Наиболее полный каталог по изотопии природных вод о. Кунашир и о. Итуруп, полученных в период с 1976 по 1981 гг., приведены в монографии [Есиков, 1989]. К сожалению, в каталоге отсутствует географическая привязка точек опробования и не приводится химический состав вод, что затрудняет возможность использования этих данных. Исследования стабильных изотопов термальных вод о. Янкича [Мальцева, 1985] позволили автору сделать вывод, что они формируются за счет разной степени смешения морских и метеорных вод. Данные по термальным флюидам региона подтвердили [Чешко, 1994] преимущественно метеорное происхождение вод гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов с незначительным влиянием морских и “магматогенных” вод на формирование отдельных типов. На основе опробования природных вод в районах вулканов о. Кунашир (Менделеева, Головнина) и о. Парамушир (Эбеко) О.В. Чудаевым [2003] построена диаграмма связи величин  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , выявившая в кислых сульфатных водах кислородный сдвиг по отношению к линии метеорных вод в сторону

утяжеления. Этот сдвиг автор объясняет активным взаимодействием высокотемпературных растворов с вмещающими породами. Изотопный состав конденсатов фумарольных газов вулканов Курильских островов изучался в работах [Таран, 1992; Таран и др., 1995; Taran et al., 1995, 2018], где было показано, что формирование вулканического пара происходит за счет смешения метеорных и магматических (“андезитовых”) вод по [Таран и др., 1989]). Данные по  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  для определения источника водного питания отдельных гидротермальных систем Курильских островов использованы в работах [Таран, 1992; Taran et al., 1995; Таран и др., 1995; Kalacheva et al., 2015, 2016, 2017 и др.].

В данной публикации обобщаются данные по изотопному составу термальных и поверхностных вод восемь Курильских островов: Парамушир, Шиашкотан, Расшуа, Янкича, Кетой, Уруп, Итуруп и Кунашир. Они получены в результате полевых работ 2015–2017 гг., а также более ранних исследований авторов. Обсуждаются общие вопросы формирования различных типов термальных вод и процессы, контролирующие изменение их изотопного состава.

#### ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Курильская островная дуга протягивается более чем на 1200 км (рис. 1) от южной оконечности п-ова Камчатка до о. Хоккайдо, отделяя Охотское море от Тихого океана. Дуга является областью интенсивного новейшего вулканизма, определяющего строение и основные формы рельефа. В целом, острова сложены вулканогенными, вулканогенно-осадочными и интрузивными породами миоцен-четвертичного возраста. Наиболее распространены четвертичные, включая современные вулканогенные образования, фундаментом, для которых служат неогеновые толщи. Незначительная роль в строении островов принадлежит рыхлым отложениям – морским, аллювиальным, делювиально-пролювиальным и др. Вулканические постройки крупных островов сливаются своими основаниями, образуя вулканические хребты, вытянутые вдоль островов, или разделены низменными перешейками с ярко выраженными морскими террасами. Малые острова представляют собой одиночные вулканы или вулканические комплексы, в разной степени эродированные. Всего по разным оценкам [Горшков, 1967; Федорченко и др., 1989] в пределах дуги насчитывается от 70 до 150 четвертичных вулканов, 39 из которых активные. Часть из них характеризуется интенсивной сольфатарной и гидротермальной деятельностью. Это вулканы Эбеко (о. Парамушир), Синарка (о. Шиашкотан), Палласа и Кетой

(о. Кетой), Ушишир (о. Янкича), Берга (о. Уруп), Баранский (о. Итуруп), Менделеев и Головнина (о. Кунашир) и некоторые другие. Расположение отдельных групп термальных источников и сольфатарных полей, включенных в исследование, показано на рис. 1. Их координаты и основные физико-химические показатели представлены в табл. 1.

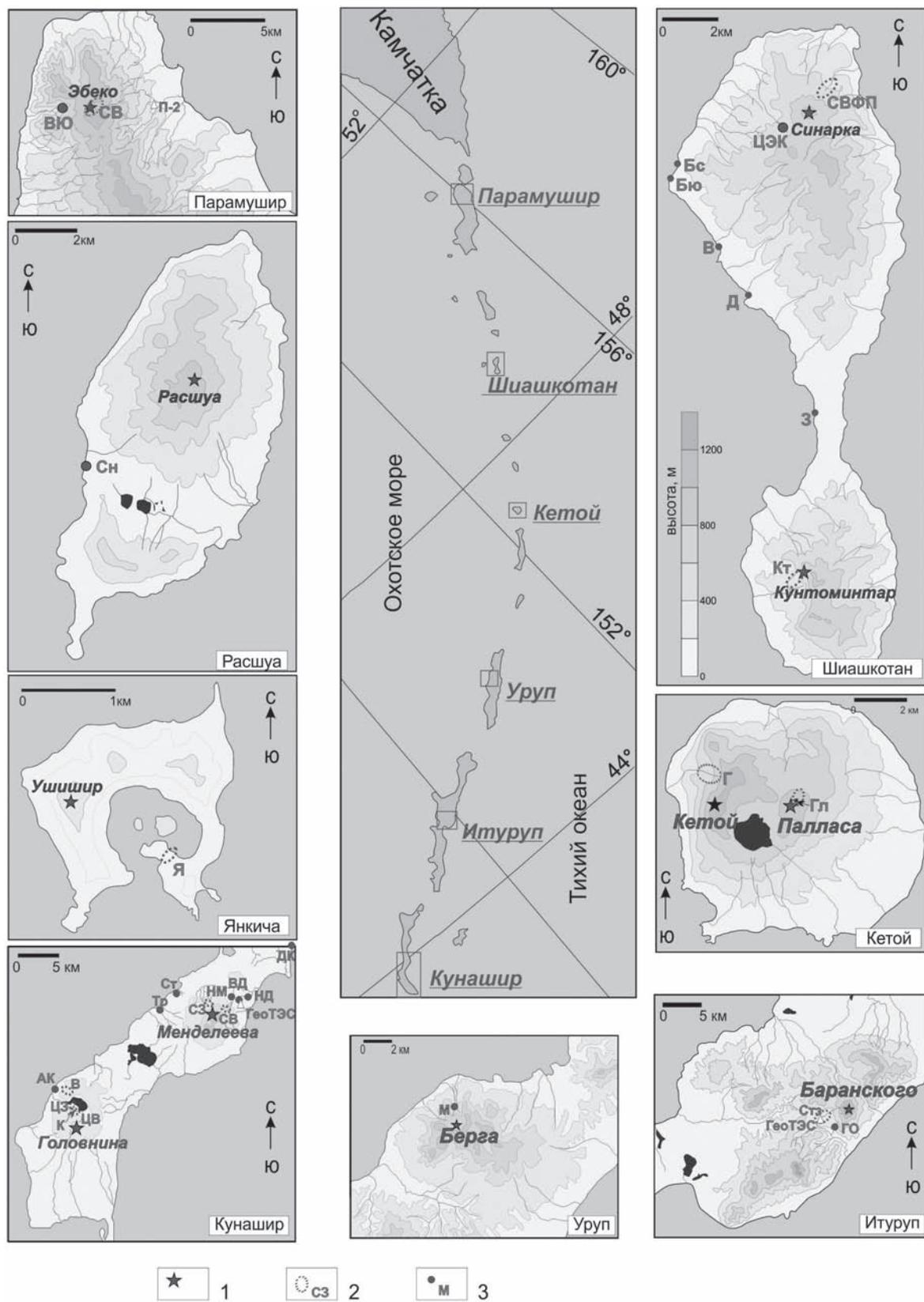
Остров Парамушир – один из наиболее крупных Курильских островов, вытянут с юго-запада на северо-восток более чем на 100 км, при средней ширине 20–25 км. В пределах острова расположено более десяти вулканов четвертичного возраста, пять из которых (Эбеко, Чикурачки, Татаринова, Карпинского и Пик Фусса) являются действующими. Все четвертичные образования сложены породами, имеющими состав от базальтов до андезитов. Основная гидротермальная активность сосредоточена в привершинной части вулкана Эбеко и на северо-западном его склоне (см. рис. 1). В кратерах и на внешних склонах расположены многочисленные фумаролы с температурами на выходе от 100–160°C до 480°C и ультракислые кипящие водно-грязевые котлы. В верховьях р. Юрьева, дренирующей разрушенную постройку вулкана Влодавца, расположен крупный очаг разгрузки ультракислых (рН 1–1.5) вод с температурой до 80–85.5°C и минерализацией до 14 г/л – Верхне-Юрьевские источники (ВЮ) (см. рис. 1). Выходы встречаются на протяжении ~ 700 м вдоль и непосредственно в русле реки. Всего насчитывается около 30 основных выходов с общей разгрузкой, по последним оценкам, 170–200 л/с [Калачева, Котенко, 2013]. Состав и геохимическая деятельность термальных вод освещена во многих публикациях [Никитина, 1978; Фазлуллин, 1999 и др.]. Последние данные по геохимии термальных вод и вулканических газов вулкана Эбеко представлены в работе [Kalacheva et al., 2016].

Остров Шиашкотан (см. рис. 1) в плане имеет форму восьмерки, сформированной двумя вулканическими массивами Синарка и Кунтоминтар, соединенными узким перешейком Макарова. Расстояние между вершинами вулканов составляет 18 км. На обоих вулканах зафиксированы исторические извержения, а в настоящее время они характеризуются фумарольной и гидротермальной активностью. Дегазация вулкана Синарка осуществляется через экструзивный купол, на склонах и вершине которого разгружаются фумаролы с максимальной температурой в 2016 г. 440°C [Taran et al., 2018]. Постройка вулкана вмещает гидротермальную систему, поверхностные проявления которой сосредоточены на двух термальных полях: Центрального экструзивного купола (ЦЭК) и Северо-

Таблица 1. Координаты расположения термальных полей и источников

Индекс пробы	Дата отбора мес/год	Вулкан, место отбора	Остров	Координаты		T, °C	pH	Электропроводность, мS/cm
				северной широты	восточной долготы			
кислые SO <sub>4</sub> воды								
СВ <sup>1</sup>	08/2014	Эбеко, Сев.-вост. поле	Парамушир	50°41'28"	156° 1'19"	80.0	1.50	7.80
СВФП	08/2016	Синарка, Сев.-вост. поле	Шиашкотан	48°52'28"	154°11'53"	77.8	2.64	3.32
Г	08/2017	Кетой, руч. Горчичный	Кетой	47°21'11"	152°26'07"	30.8	3.19	2.54
Гл <sup>2</sup>	08/2016	Пик Палласа, оз. Глазок	Кетой	47°20'39"	152°28'48"	16.0	2.40	3.28
Стз	07/2016	Баранского, Старозав. поле	Итуруп	45°05'37"	147°59'19"	н.и.	2.86	1.53
ЦЗ <sup>3</sup>	08/2017	Головнина, Центр. зап. поле	Кунашир	43°52'19"	145°29'44"	72.0	1.83	9.94
Вн <sup>3</sup>	09/2015	Головнина, Внешнее поле	Кунашир	43°54'05"	145°29'31"	96.0	2.58	3.84
ЦВ <sup>3</sup>	09/2015	Головнина, Центр. вос. поле	Кунашир	43°51'55"	145°29'53"	75.0	2.15	3.31
ВМ <sup>4</sup>	09/2015	Менделеева, Сев.-вост. поле	Кунашир	43°59'24"	145°45'21"	99.6	2.35	2.16
СЗ <sup>4</sup>	09/2015	Менделеева, Сев.-зап. поле	Кунашир	43°59'15"	145°43'41"	56.6	2.09	1.99
кислые Cl-SO <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> -Cl) воды								
ВЮ <sup>1</sup>	08/2014	Эбеко, В-Юрьевские (ист. 1)	Парамушир	50°42'06"	155°59'52"	80.8	1.20	20.30
ВЮ	08/2016	Эбеко, В-Юрьевские (ист. 1)	Парамушир	50°42'06"	155°59'52"	84.0	1.32	35.30
ВЮ	07/2017	Эбеко, В-Юрьевские (ист. 1)	Парамушир	50°42'06"	155°59'52"	86.3	0.99	49.20
ЦЭК	08/2017	Синарка, Центр. экстр. куп.	Шиашкотан	48°52'29"	154°10'12"	43.9	3.41	8.09
Кт	08/2016	Кунтоминтар, кратер	Шиашкотан	48°45'32"	154° 0'46"	96.1	1.73	19.61
М	08/2017	Берга, Марьинские ист.	Уруп	46° 4'16"	150° 3'48"	31.0	3.15	3.95
ГО	07/2015	Баранского, Голубые озера	Итуруп	45°05'00"	147°59'25"	н.и.	1.50	24.90
К <sup>3</sup>	09/2015	Головнина, оз. Кипящее	Кунашир	43°51'50"	145°30'04"	44.0	1.86	3.01
НД <sup>4</sup>	09/2015	Менделеева, Нижнедок. ист.	Кунашир	44° 0'06"	145°47'18"	47.7	3.50	3.50
НМ <sup>4</sup>	09/2015	Менделеева, Нижнемен. ист.	Кунашир	43°59'58"	145°46'05"	81.8	2.28	8.00
ВД <sup>4</sup>	09/2015	Менделеева, Верхнедок. ист.	Кунашир	43°59'59"	145°46'25"	87.3	2.13	7.97
Na-Cl воды								
Сн	08/2016	Ист. ванны Сноу	Расшуа	47°44'19"	152°58'25"	35.3	7.39	6.31
В	08/2016	Водопадные ист.	Шиашкотан	48°51'41"	154° 5'58"	91.1	7.50	20.70
Д	08/2016	Дробные ист.	Шиашкотан	48°50'46"	154° 5'35"	55.7	6.33	18.28
З	08/2016	Закатные ист.	Шиашкотан	48°47'38"	154° 4'33"	73.3	6.30	4.10
Бю	08/2016	Башмачные (южные) ист.	Шиашкотан	48°53'21"	154° 6'28"	75.2	6,95	6.22
Бс	08/2016	Башмачные (северные) ист.	Шиашкотан	48°53'37"	154° 7'9"	62.0	6.63	9.95
АК <sup>3</sup>	09/2015	Алехинские кипящие ист.	Кунашир	43°54'18"	145°29'11"	100	8.46	6.40
Тр <sup>4</sup>	09/2015	Третьяковские ист.	Кунашир	43°59'06"	145°39'21"	95.7	7.24	3.76
Ст <sup>4</sup>	09/2015	Столбовские ист.	Кунашир	44° 00'26"	145°41'00"	78.0	6.90	3.39
ДК	09/2015	Ист. Добрый ключ	Кунашир	44°10'21"	145°59'32"	58.0	6.40	2.26
ГеоТЭС	08/2017	ГеоТЭС (скв. 101)	Кунашир	43°59'39"	145°46'23"	99.1	6.70	6.50
ГП <sup>4</sup>	09/2015	Сан. "Горячий пляж" (скв.)	Кунашир	44°00'07"	145°47'28"	66.0	7.29	5.20
П2 <sup>1</sup>	08/2014	Скв. П2	Парамушир	50°39'42"	156° 5'26"	70.9	7.90	10.35
ГеоТЭС	07/1990	ГеоТЭС (скв. 65 <sup>5</sup> )	Итуруп	45° 05'35"	147°59'16"	190.0	6.30	н.и.
Я	08/2016	Ушишир, Термальное поле	Янкича	47°30'29"	152°49'10"	95.7	4.03	33.60

Примечание. н.и. – не измерялось; <sup>1</sup> – из работы [Kalacheva et al., 2016]; <sup>2</sup> – из работы [Калачева и др., 2018]; <sup>3</sup> – из работы [Kalacheva et al., 2016]; <sup>4</sup> – из работы [Калачева и др., 2017]; <sup>5</sup> – из работы [Таран и др., 1995].



**Рис. 1.** Карта-схема Курильских островов. Основные термальные поля и точки отбора водных проб.  
 1 – активный вулкан; 2 – термальное поле и его название; 3 – термальные источники и их названия. Шифрованные названия термальных полей и источников соответствуют табл. 1.

восточного фумарольного поля (СВФП). Вдоль западного побережья острова происходит разгрузка близнеитральных горячих источников с минерализацией до 12–16 г/л и температурами до 90°C. Всего здесь расположены пять отдельных групп источников: Башмачные Северные (Бс), Башмачные Южные (Бю), Водопадные (В), Дробные (Д) и Закатные (З) (см. рис. 1, табл. 1). Сольфатарная деятельность вулкана Кунтоминтар сосредоточена в эродированном чашеобразном кратере, открытом на запад. Максимальная измеренная температура фумарол в 2016 г. составила 240°C [Taran et al., 2018]. В результате попадания поверхностных ручьев, дренирующих кратер, в зону выходов паро-газовых струй происходит формирование ультракислых (рН 2.3) горячих (Т до 80°C) вод. Описание всех групп источников и термальных полей острова приведено в работе [Мархинин, Стратула, 1977]. Вопросы, связанные с условиями их формирования рассмотрены в работах [Калачева и др., 2014; Kalacheva et al., 2015].

Остров Расшуа, имеющий форму овала, вытянутого в меридиональном направлении (см. рис. 1), сложен отложениями одноименного вулкана. Вулкан проявляет постоянную фумарольную деятельность. Низкотемпературные фумаролы (менее 160°C) расположены в кратере, открытом на восток [Taran, 1992]. На западном побережье острова в приливно-отливной зоне расположена группа близнеитральных (рН 6.8–7.4) маломощных источников с минерализацией 3–4 г/л, известных как “Ванны Сноу” (Сн) (см. рис. 1, табл. 1). Максимальная измеренная температура воды в 2016 г. составила 32°C. Все выходы приурочены к валунно-галечным пляжным отложениям, сцементированным кремнистыми и железистыми образованиями.

Остров Янкича расположен в центральной части Курильской дуги, представляя собой фрагмент кольцевого гребня кратера вулкана Ушишир. Сам кратер затоплен морской водой (бухта Кратерная) с двумя экструзивными куполами в центральной части. Термальное поле расположено на юго-восточном берегу бухты и протягивается вдоль берега на 500 м при ширине до 80–100 м. Основные сольфатарные выходы сосредоточены на увале, сложенном измененными породами, перемешанными с элементарной серой. Кипящие водные и водно-грязевые котлы с незначительными дебитами находятся в пляжной зоне, а часть выходов – ниже уреза воды. Общий видимый расход ручья, дренирующего термальное поле, около 3 л/с (по измерениям 2016 г.). В 1980-х годах на острове был проведен ряд комплексных исследований газо-гидротермальной активности вулкана и ее влияния на экосистему бухты. Основные резуль-

таты опубликованы в сборнике научных трудов [Мелководные ..., 1991], а также в ряде тематических статей [Мальцева, 1985; Таран и др., 1993 и др.].

Остров Кетой (см. рис. 1) состоит из нескольких вулканических построек возрастом от верхнего плейстоцена до современного, разрушенных крупными обвалами. Действующим является вулкан Пик Палласа, последнее извержение которого произошло в 1924 г. [Горшков, 1967]. В настоящее время вулкан характеризуется мощной фумарольной деятельностью, сосредоточенной на восточном внешнем склоне предвершинного конуса. Максимально измеренные температуры фумарол превышают 700°C (июль 2016 г.) [Taran et al., 2018]. Кратер вулкана заполнен кислым и холодным оз. Глазок диаметром около 300 м. На обширном сольфатарном поле вулкана Кетой (верховье руч. Горчишный) расположены парогазовые выходы и термальные источники с температурами от 20 до 100°C, рН от 2 до 7.5 и минерализацией до 2–3 г/л, подробно описанные в работе [Калачева и др., 2018].

Остров Уруп вытянут с севера на юг на 120 км при максимальной ширине ~ 20 км. Действующим на нем является вулкан Берга (см. рис. 1), представляющий открытую на северо-запад кальдеру диаметром ~ 2 км и высотой гребней до 1200 м. В амфитеатре кальдеры расположен экструзивный купол, в кратере которого сосредоточены мощные фумаролы. Из-под купола и вдоль русел р. Марья и р. Дарья, дренирующих кальдеру, разгружаются кислые (рН < 3) воды с Т до 39°C и минерализацией 1–1.3 г/л. Выходы их сопровождаются осаждением гидроокислов железа, формирующих длинные плащи, выстилающие русла термальных ручьев.

Итуруп – самый крупный из островов Курильской дуги; его длина около 200 км. Состоит из нескольких вулканических хребтов, соединенных низкими перешейками неогенового фундамента. Восемь вулканов на острове – действующие. Основная гидротермальная деятельность сосредоточена в его центральной части, в районе постройки вулкана Баранского (см. рис. 1). У его подножия и на склонах расположены более 10 групп термальных источников, наиболее мощным является ультракислый (рН 1.5) источник “Голубые озера” (ГО) с температурой воды, достигающей 100°C. Его расход составляет по разным оценкам [Знаменский, Никитина, 1985; Таран и др., 1995] от 50 до 60 л/с. Рядом с одним из сольфатарных полей (Старозаводское поле (Стз)), разбурено геотермальное месторождение “Океанское” и до 2016 г. функционировала одноименная ГеоТЭС. Термальные поля и источники вулкана интенсивно изучались во второй половине XX века.

Детальное описание и химический состав представлен в работах [Мархинин, Стратула, 1977; Знаменский, Никитина, 1985; Таран и др., 1995 и др.]. Исследования последних лет, посвященные геохимии термальных вод, представлены в монографии [Чудаев и др., 2017].

В южной части Кунашира, самого южного из Курильских островов, расположены два действующих вулкана – Менделеева и Головнина, характеризующиеся активной сольфатарной и гидротермальной деятельностью. Вулкан Менделеева (высота 896 м) расположен в 12 км к югу от административного центра острова, пгт. Южно-Курильск, и представляет собой сложную постройку с экструзивным куполом в разрушенном взрывами кратере центрального конуса. Современная сольфатарная деятельность сосредоточена на четырех обособленных термальных полях, наиболее мощными из которых являются Северо-западное (СЗ) и Северо-восточное (ВМ). На склонах вулкана разгружаются несколько групп ультракислых (рН 2.1–2.4) горячих (Т до 87°C) источников с минерализацией до 3–3.5 г/л: Нижнеменделеевские (НМ), Верхнедокторские (ВД) и Нижнедокторские (НД). У подножия вулкана на Охотоморском побережье, в прибрежной полосе расположены близнеутральные (рН 7.1–7.3) термальные (Т до 100°C) источники: Столбовские (Ст) и Третьяковские (Тр).

На восточном склоне вулкана разбурено геотермальное месторождение “Горячий пляж”. Скважины, пробуренные в районе Нижнедокторских источников, на отметках примерно 30 м над уровнем моря выводят на поверхность слабощелочные (рН 7.7) хлоридные натриевые воды минерализацией до 3 г/л и температурой на изливе 70–80°C. Воды этих скважин используются для нужд санатория “Горячий пляж” (ГП). Две скважины Верхнедокторского участка выводят на поверхность пароводяную смесь с глубины около 1000 м. Температура на забое скважин, согласно [Chelnokov, 2004], около 240°C. Скважины эксплуатируются ГеоТЭС “Менделеевская”, обеспечивая теплом административный центр острова – пгт. Южно-Курильск. Результаты исследований последних лет по геохимии термальных вод и газов вулкана представлены в работе [Калачева и др., 2017].

Вулкан Головнина расположен на южной оконечности о. Кунашир и представляет собой кальдеру диаметром около 6 км (по гребню), внутри которой расположены четыре экструзивных купола и два озера, соединяющиеся между собой протокой. По берегам и на дне оз. Горячего, самого крупного озера Курильских островов, находятся сольфатарные поля, наибольшим из которых является Центральное западное поле

(ЦЗ) (см. рис. 1). Мощное Центральное восточное сольфатарное поле (ЦВ) приурочено к берегам и акватории небольшого оз. Кипящее (К). Основная часть наземных термопроявлений вулкана Головнина представляет собой разнообразные по форме и размерам водные и водно-грязевые котлы, практически не имеющие стока и характеризующиеся интенсивным газированием. Максимальная измеренная температура котлов близка к температуре кипения (96–98°C), рН в среднем около 2, минерализация колеблется от 0.5 до 6 г/л. Вода оз. Кипящего отличается по физико-химическим показателям от береговых выходов (см. табл. 1). Термопроявления вулкана неоднократно исследовались [Сидоров, 1966; Мархинин, Стратула, 1977; Бортникова и др., 2013 и др.]. За пределами кальдеры на северо-западном склоне и вдоль Охотоморского побережья расположены несколько групп термальных источников и сольфатарное поле Внешнего купола (Вн) (см. рис. 1). Результаты исследований последних лет по геохимии термальных вод и газов вулкана Головнина представлены в работе [Kalacheva et al., 2017].

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водные пробы на общий химический и изотопный анализы были отобраны в пластиковые бутылки объемом 100 мл с предварительной фильтрацией через 0.45  $\mu\text{m}$  MILLIPORE фильтр. Температура ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ), рН ( $\pm 0.05$ ) и электропроводность ( $\pm 2\%$ ) измерялись полевым мультиметром фирмы WTW. Конденсат сольфатарных газов отбирали в барботер с принудительной прокачкой газа и охлаждением барботера. Определение концентраций основных катионов и анионов (Na, K, Ca, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>) выполнялось в лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН на ионном хроматографе Metrohm 883 (аналитик Волошина Е.В.). Изотопный состав воды ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ), включая конденсаты фумарольных газов, проанализирован в лаборатории тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН на приборе LosGatos (аналитик Воронин П.О.). Погрешность определения изотопного состава  $\pm 0.2\%$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\pm 1\%$  для  $\delta\text{D}$ . В табл. 1 и на графиках величины приведены относительно международного стандарта SMOW (среднеокеаническая вода).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе многолетних исследований авторами было опробовано более 300 различных водопроявлений на исследуемых Курильских островах, включая термальные и холодные источники, поверхностные водотоки, атмосферные осадки.

Для построения графиков были использованы результаты химических и изотопных анализов всех отобранных проб воды, тогда как в табл. 2 приведена выборка данных для наиболее характерных точек всех исследованных термальных полей.

#### *Основные типы термальных вод*

Вопросами классификации термальных вод в областях современного вулканизма, с привлечением данных по Курильским островам занимались многие исследователи [Набоко, 1959; Иванов, 1960; Басков, Суриков, 1975; Кононов, 1983 и др.]. Для выделения отдельных типов использовались данные по химическому и газовому составу, условиям разгрузки, приуроченности к разрывным нарушениям и т.д. Придерживаясь наиболее известной классификации В.В. Иванова [1960], исследуемые термальные воды можно разделить на три большие группы. Также на некоторых островах существуют локальные разгрузки вод, образовавшихся в определенных геологических и гидрогеологических условиях и не попадающие ни в одну выделенную группу.

Первая группа – кислые ( $pH < 4$ ) сульфатные воды с температурами до  $100^{\circ}C$ . Формируются за счет поглощения низкотемпературных вулканических паров, в газовой фазе которых преобладает  $CO_2$  и  $H_2S$ , поверхностными или грунтовыми водами непосредственно на термальных полях. В отечественной литературе подобные воды называются “фумарольные термы поверхностного формирования” [Иванов, 1960] или “гидросольфатары” [Набоко, 1959]. В зарубежной литературе принят термин “steam-heated” – нагретые паром воды. Разгрузка представлена, в основном, водными или водно-грязевыми котлами, бессточными или мало дебитными. Воды с низким  $pH$  выщелачивают из вмещающей породы породообразующие и микроэлементы в соотношении, близком к таковому в породе (изохимическое растворение), при этом в кипящих лужах с прозрачной водой общее количество растворенных солей меньше, чем в водно-грязевых котлах. Средняя минерализация составляет 2–5 г/л. Основным катионом является  $Ca^{2+}$  (до 100–150 мг/л), постоянно присутствуют Fe и Al в концентрациях до 100 мг/л. Данный тип вод присутствует практически на всех островах, для которых характерно наличие сольфатарных полей в кратерах и на склонах вулканов (см. табл. 2). Следует отметить, что при определенных гидрогеологических и морфоструктурных условиях, в зависимости от пути и длины фильтрации метеорных вод и глубины конденсации пара, в пределах одного поля могут формироваться не только кислые сульфатные, но

и другие типы вод. Так в эрозионном кратере вулкана Кетой на одноименном острове обнаружены [Калачева и др., 2018] кипящие источники, воды которых относятся к слабощелочному ( $pH$  до 7.6) Na-Ca- $SO_4$  типу с невысокой минерализацией (до 1.5 г/л). В данной работе рассматриваются только кислые сульфатные воды.

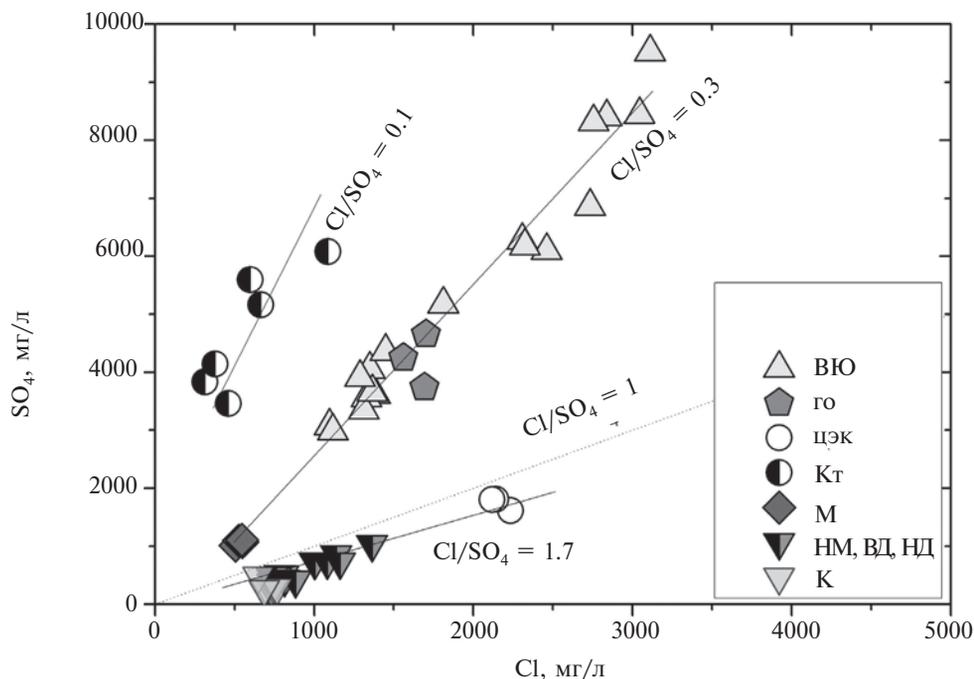
Вторая группа – кислые ( $pH < 4$ ) хлоридно-сульфатные (сульфатно-хлоридные) воды с температурой  $30–100^{\circ}C$  и минерализацией до 14 г/л. Этот тип вод формируется, как правило, в пределах верхних частей построек вулканов. Специфические условия способствуют формированию неглубоких ограниченных водоносных горизонтов, в которых происходит поглощение легкорастворимых вулканических газов, таких как  $SO_2$  и HCl. По классификации В.В. Иванова [1960], подобные воды относятся к “фумарольным термам глубинного формирования”. Их разгрузка в большинстве случаев осуществляется на средних высотных отметках построек вулканов в виде отдельных или площадных выходов безнапорных (или с местным напором) вод со значительными дебитами, до 5 л/с в отдельных источниках. Все известные источники данной группы представлены в табл. 2. Следует отметить, что для каждой группы источников характерны определенные весовые соотношения основных анионов. Как показано на рис. 2, термальные воды, разгружающиеся на склонах вулканов Эбеко (ВЮ), Берга (М) и Баранского (ГО) формируют единый тренд с  $Cl/SO_4 \sim 0.3$ . Для вод вулкана Кунтоминтар также характерно преобладание  $SO_4^{2-}$  над  $Cl^-$ , но с другим коэффициентом  $Cl/SO_4 \sim 0.1$ . В ультракислых водах вулканов Синарка (ЦЭК), Менделеева (ВД, НД) и Головнина (К) доминирует  $Cl^-$ -ион с весовым отношением  $Cl/SO_4 \sim 1.7$ . Для всех вод этой группы характерен пестрый катионный состав с высокими содержаниями  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ , Fe, Al (см. табл. 2).

Третью группу термальных вод объединяет близонейтральный  $pH$  (6.2–7.4) и хлоридный состав. Минерализация колеблется от 3–4 до 8–10 г/л, а температура от 30 до  $100^{\circ}C$ . Условия формирования и разгрузки для этих вод разные. В эту группу попадают все береговые источники о. Шиашкотан (Бю, Бс, В, Д и З), о. Расшуа (Сн) и о. Кунашир (Ст, Тр, АК). К Na-Cl типу относятся и глубинные воды, вскрытые скважинами на островах Парамушир, Итуруп и Кунашир. В соотношении  $Cl/SO_4$  в термальных водах наблюдается несколько различных трендов. Точки составов береговых источников о. Шиашкотан и о. Расшуа вытянуты вдоль линии смешения с морской водой при среднем весовом отношении равным  $\sim 9$  (рис. 3а). Прибрежные источники о. Кунашир и воды, вскрытые сква-

**Таблица 2.** Химический (мг/л) и изотопный (‰) состав термальных вод

Шифр	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	δD	δ <sup>18</sup> O
кислые SO <sub>4</sub> воды											
СВ	11.0	3270	0	13	17	0.5	3.6	110	17.2	-45.5	-1.5
СВФП	17	1868	0	46	11	65	17	213	86	-40.7	-0.6
Г	9	1101	0	64	6	420	46	17.3	0.85	-58.2	-5.5
Гл	33	1311	0	16.5	3.4	181	7.5	96	33	-71.7	-10.7
Стз	12	715	0	42	17	98	27	18.6	8.4	-58.1	-8.2
ЦЗ	35	4105	0	12	4	5	3	113	56	-30.2	-1.0
Вн	14	2875	0	34	0	196	76	95	162	-42.6	-5.0
ЦВ	52	1556	0	112	10	108	16	33	4.1	-17.9	3.7
ВМ	10	689	0	17	2	16	10	34	16.6	-57.7	-8.4
СЗ	10.5	965	0	45	5	70	23	20	4.8	-59.5	-8.4
кислые Cl-SO <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> -Cl) воды											
ВЮ	2734	6861	0	187	128	230	151	527	28	-75.3	-9.4
ВЮ	2839	8404	0	255	159	405	159	572	524	-72.4	-9.4
ВЮ	3045	8442	0	258	178	393	171	632	339	-71.0	-9.0
ЦЭК	2234	1612	0	290	23	459	481	3.8	246	-54.6	-6.0
Кт	2659	4450	0	79	17	524	58	395	38.5	-43.6	-3.1
М	527	1097	0	179	22	320	145	16.6	1.8	-69.2	-9.9
ГО	1692	3739	0	176	44	155	39	134	70	-58.2	-7.4
К	649	485	0	209	24	66	26	н.о.	н.о.	-49.7	-6.7
НД	738	368	0	921	26	92	27	31	34	-54.8	-8.0
НМ	1230	1085	0	398	39	142	52	26	54	-54.9	-7.5
ВД	1512	975	0	577	58	149	62	21.6	52	-54.6	-7.5
Na-Cl воды											
Сн	2714	372	92	704	35	156	44	< 0.04	< 0.5	-59.0	-8.5
В	8699	952	174	4593	212	324	407	< 0.04	< 0.5	-42.6	-5.0
Д	7309	932	210	4013	171	270	394	< 0.04	< 0.5	-45.6	-5.9
З	3586	197	287	1742	149	166	107	< 0.04	< 0.5	-53.7	-7.1
Бю	2378	76	116	1224	93	248	4	< 0.04	< 0.5	-63.3	-8.4
Бс	5974	632	191	3054	155	320	209	< 0.04	0.77	-52.7	-6.9
АК	2077	108	79	1198	77	25	0.03	< 0.04	< 0.5	-55.0	-6.3
Тр	1430	59	120	823	83	59	1.5	< 0.04	< 0.5	-67.7	-9.5
Ст	1023	431	240	684	46	112	10	< 0.04	< 0.5	-68.0	-9.4
ДК	502	358	31	346	7	90	1	< 0.04	< 0.5	-67.6	-9.9
скв. 101	3008	31	46	2277	326	124	3	< 0.04	< 0.5	-51.9	-6.5
скв. ГП	1200	309	107	877	70	156	14	< 0.04	0.9	-52.0	-7.4
скв. П2	2716	192	1928	2516	152	23	16	10.3	0.1	-73.7	-7.6
скв. 65	3192	66	34	1840	452	56	0	н.о.	н.о.	-60.0	-5.2
Я	15898	318	0	8091	816	1189	63	0.38	< 0.5	-1.6	7.9

Примечание. н.о. – не определялось.



**Рис. 2.** Соотношение Cl к  $SO_4$  в кислых  $SO_4$ -Cl (Cl- $SO_4$ ) водах Курильских островов. Шифры термальных полей и источников соответствуют табл. 1 и рис. 1.

жинами, разделились на две группы. Столбовские (Ст) и Добрый Ключ (ДК) лежат значительно выше линии смешения с морской водой (см. рис. 3б). В эту же часть диаграммы попадают неглубокие скважины, пробуренные на территории санатория “Горячий пляж” (о. Кунашир). В другую группу попадают все кипящие источники (Тр, АК) и глубокие геотермальные скважины. Для них характерны очень низкие содержания  $SO_4^{2-}$  ионов (см. рис. 3б).

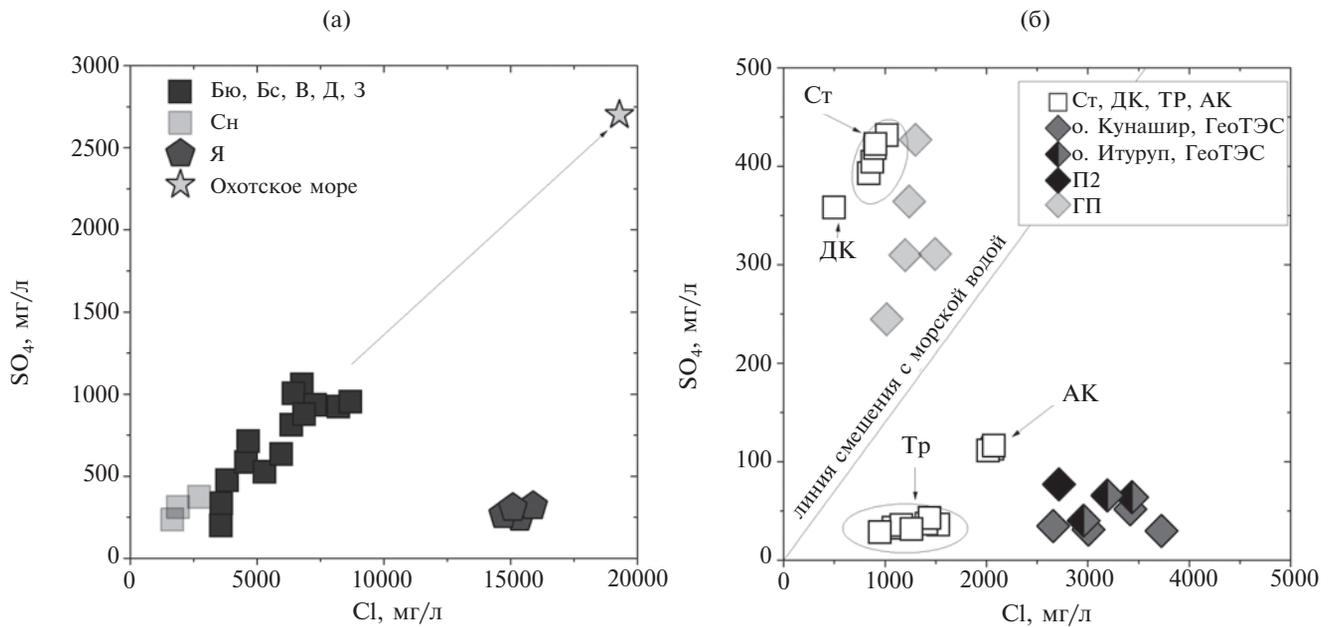
Термальные воды, разгружающиеся в кратере вулкана Ушишир, не входят ни в одну группу. Для них характерна самая высокая минерализация (до 26 г/л) при температуре на выходе близкой к кипению (95–97°C), кислый pH ~ 4. Воды малодебитных водно-грязевых котлов имеют хлоридный натриевый состав, с концентрациями хлор-иона, близкими к морским (см. табл. 2). Содержания сульфат-ионов при этом значительно ниже, чем в морской воде. В катионной составляющей, помимо ионов натрия, присутствуют  $Ca^{2+}$  и  $K^+$ . Концентрация  $Mg^{2+}$  минимальна.

#### *Изотопный состав поверхностных вод*

Вариации изотопного состава атмосферных осадков и поверхностных вод,  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  в ‰ относительно SMOW, в планетарном масштабе распределяются закономерно и аппроксимируются уравнением прямой линии  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$  [Craig, 1961], получившей

название глобальной “линии метеорных вод” (ГЛМВ). Для Курило-Камчатского региона выявлена [Чешко, 1994] региональная зависимость  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + (15 \pm 1)$ , описанная прямой РЛМВ. При изучении Курильских островов учитывались данные, полученные для южных островов (Итуруп, Кунашир) и представленные в виде таблицы в монографии [Есиков, 1989]. При опробовании термальных вод, на изотопный анализ отбирались пробы поверхностных водотоков и атмосферных осадков. Компиляция собственных и литературных данных представлена на рис. 4.

Точки, отражающие составы поверхностных вод, вытянуты вдоль линий метеорных вод, занимая, в основном, промежуточное положение между РЛМВ и ГЛМВ. Литературные данные для о. Кунашир и о. Итуруп показывают больший диапазон значений, но в целом, близких к тем, что были получены нами. В распределении значений для отдельных групп островов наблюдается линейная зависимость. Хорошо выражен температурный эффект [Fricke, O’Neil, 1999] за счет географического расположения островов, вытянутых цепью с северо-востока на юго-запад более чем на 1200 км. Среднегодовые температуры северного о. Парамушир ниже чем южного о. Кунашир на 3.1°C (1.7°C и 4.8°C) [Научно-прикладной справочник ..., 1990]. Поверхностные воды о. Парамушир обеднены дейтерием по сравнению с о. Кунашир на 20‰



**Рис. 3.** Соотношение Cl к  $\text{SO}_4$  в Na-Cl-водах Курильских островов. Шифры термальных полей и источников соответствуют табл. 1 и рис. 1.

и  $^{18}\text{O}$  на 3‰. Метеорные воды центральных островов (Шиашкотан, Кетой, Расшуа и Уруп) имеют близкие значения, и точки их составов занимают промежуточное положение.

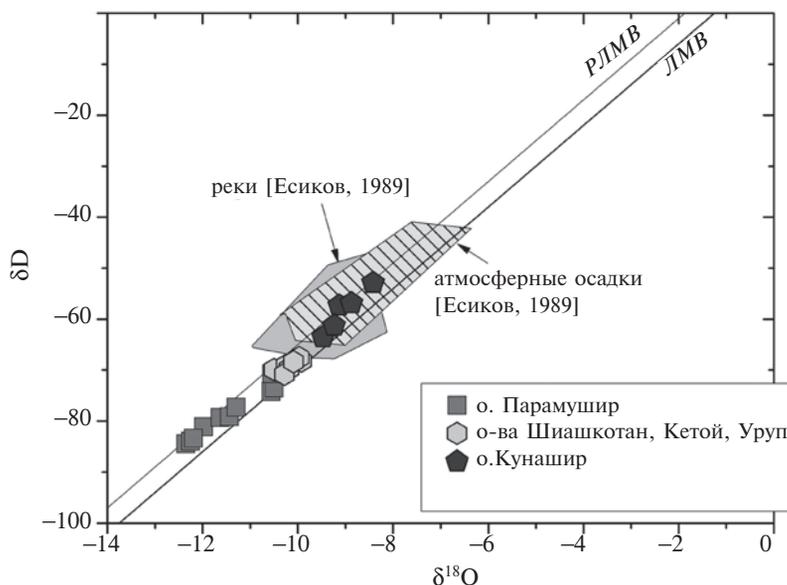
#### *Изотопный состав термальных вод*

Кислые сульфатные воды. На графике зависимости  $\delta\text{D}$  от  $\delta^{18}\text{O}$  (рис. 5) показаны изотопные составы кислых сульфатных вод сольфатарных полей. Часть их них, представленная, в основном, источниками и термальными ручьями с видимым дебитом, формирует область вблизи или непосредственно на линии локальных метеорных вод (РЛМВ). Для кипящих бессточных или малодобитных котлов характерен тренд в сторону утяжеления кислорода и водорода. Как впервые показано в работе [Giggenbach, Stewart, 1982] и при дальнейших исследованиях на Камчатке [Таран и др., 1986; Есиков, 1989 и др.] в изменении изотопного состава ( $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ ) кислых сульфатных вод, формирующихся на сольфатарных полях, ведущую роль играют процессы кинетического фракционирования при кипении или длительном испарении при температурах, близких к температуре кипения. Минимальные отклонения наблюдаются в источниках с видимым стоком, а максимальные — в бессточных водно-грязевых котлах. Подобный сдвиг мог бы быть также связан с различной степенью влияния “андезитовых” вод (магматической воды зоны субдукции) [Таран и др., 1989; Giggenbach, 1992], но увеличение ее доли в питании термальных вод сопровождается ростом концентрации хлор-иона [Таран, Zelenski, 2014], а со-

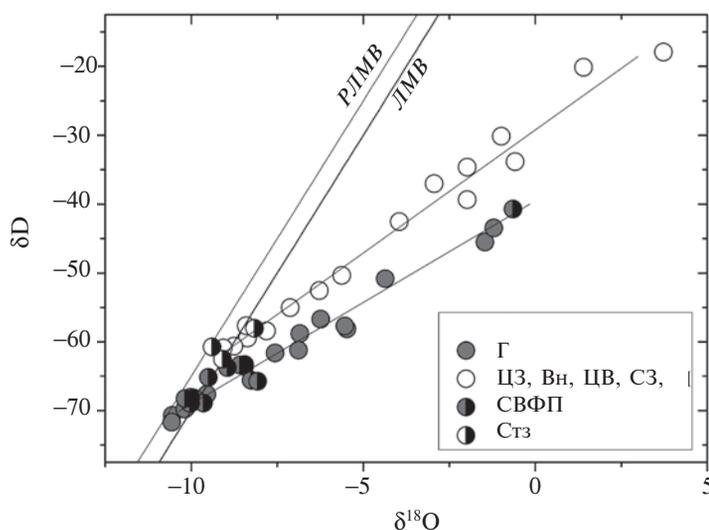
ставы воды котлов с температурами, близкими к температуре кипения, которые лежат на тренде (см. рис. 5), практически не содержат хлор-иона. Средний угол наклона подобного тренда  $\sim 3$ , что соответствует процессу кипения при  $100^\circ\text{C}$ , но может варьировать в зависимости от температуры испарения. Чем ниже температура испарения, тем круче наклон тренда. Так, в случае о. Кунашир точки вытянуты вдоль линии с углом наклона 3.4, при преобладающих температурах для водно-грязевых котлов  $75\text{--}85^\circ\text{C}$ , а для о. Шиашкотан и о. Кетой — 3.1 (преобладающие температуры воды  $90\text{--}100^\circ\text{C}$ ).

Тренды для термальных вод рассмотренных островов отличаются не только по углу наклона, но и по расположению относительно друг друга. Значения  $\delta\text{D}$  в термальных водах о. Кетой и о. Шиашкотан на 10‰ ниже, чем в аналогичном типе вод о. Кунашир и о. Итуруп. Это связано с широтным эффектом в изотопном составе поверхностных вод, питающих сольфатарные поля.

**Кислые хлоридно-сульфатные воды.** Большая часть точек составов вод (рис. 6) группируется вблизи или непосредственно на линии метеорных вод с образованием совместно с вулканическими парами тренда в сторону составов “андезитовых” вод [Таран и др., 1989; Giggenbach, 1992]. Данные по изотопному составу конденсатов фумарольных газов взяты из работ [Kalacheva et al., 2017; Taran et al., 2018]. Так же, как и для кислых сульфатных вод, различие в изотопном составе поверхностных вод сказывается на распределении точек, отражающих составы термальных вод этой



**Рис. 4.** Изотопный состав поверхностных вод Курильских островов. Линия локальных метеорных вод (РЛМВ) на рис. 4–7, согласно [Чешко, 1994]. Глобальная линия метеорных вод (ЛМВ) на рис. 4–7, согласно [Craig, 1961].



**Рис. 5.** Изотопный состав кислых сульфатных вод Курильских островов. Шифры термальных полей и источников соответствуют табл. 1 и рис. 1.

группы. Верхне-Юрьевские источники имеют более облегченный изотопный состав, чем источники южных островов. Максимальные изотопные сдвиги наблюдаются в термальных водах вулканов Синарка и Кунтоминтар (о. Шиащкотан). Вклад магматической компоненты оценивается в 15–20%. Следует заметить, что большая часть термальных вод была опробована в межэруптивные периоды деятельности вулканов, на склонах которых разгружаются эти воды. Каким образом изменяется изотопный состав термальных

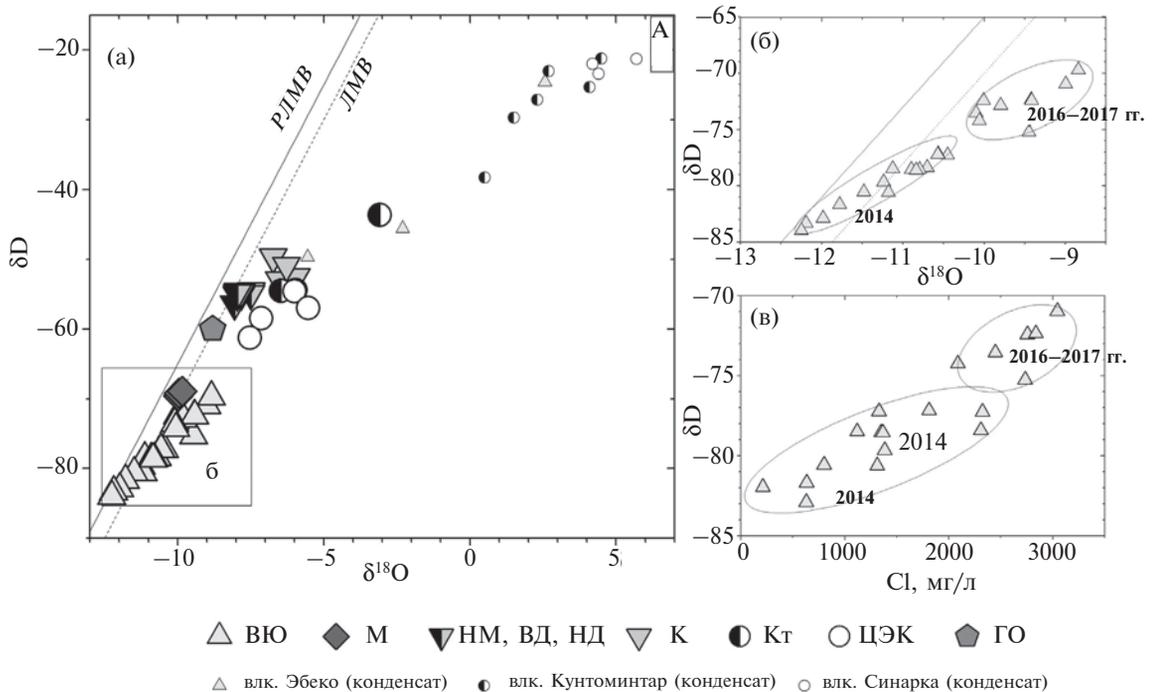
вод данного типа в период активизации вулкана, удалось проследить на примере Верхне-Юрьевских источников (о. Парамушир). Эти источники были опробованы в 2014 (данные из работы [Kalacheva et al., 2016]), в 2016 и 2017 гг. В октябре 2016 г. началась активизация вулкана Эбеко [Котенко и др., 2018], продолжающаяся в настоящее время. Авторами отмечено, что перед извержением (октябрь 2015 г. – сентябрь 2016 г.) произошло увеличение концентрации некоторых компонентов ( $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ) в фумарольных газах

и изменился изотопный состав воды в их конденсатах. Эти изменения свидетельствовали, по мнению авторов, об увеличении вклада магматической компоненты.

Изотопные составы Верхне-Юрьевских (ВЮ) источников (по данным 2014 г.) локализуются вблизи линии метеорных вод (см. рис. 6), но с заметным положительным сдвигом по  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  за счет смешения магматических паров и метеорных вод, а также характеризуются высокой корреляцией между концентрациями Cl-ионов и величинами  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  [Kalacheva et al., 2016]. Точки данных 2016 и 2017 гг. лежат на продолжении тренда, отмеченного для проб 2014 г., т.е. одновременно с утяжелением изотопного состава, в термальных водах увеличилась и концентрация хлор-ионов (см. рис. 6), что, согласно работе [Taran, Zelenski, 2014], является признаком увеличения доли магматической воды в питании термальных вод и вулканических паров. Следовательно, именно активизация вулкана Эбеко послужила причиной изменения изотопного и химического состава ВЮ источников. Наблюдаемый эффект подтверждает модель гидротермальной системы в Эбеко, предложенную в работе [Kalacheva et al., 2016].

Близнеутральные и слабощелочные хлоридные натриевые воды. Точки изотопных составов

этой группы термальных вод также локализуются вблизи линии метеорных вод (рис. 7), но в довольно широком диапазоне величин  $\delta\text{D}$ . Это связано с различными условиями формирования этих вод и различиями в процессах, определяющих характер изотопных сдвигов. Для исследуемых термальных вод характерны положительные сдвиги по  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ , с различным углом наклона. Для береговых источников о. Шиашкотан и о. Расшуа существует тренд от локальных метеорных вод в сторону смешения метеорной и морской воды (см. рис. 7), отмеченный впервые в работе [Kalacheva et al., 2015]. Это подтверждается соотношением Cl-ионов к дейтерию. Точки, отражающие состав береговых источников в координатах отношений  $\delta\text{D}$  к Cl, лежат на линии смешения морских-метеорных вод (см. рис. 7б). Вода береговых источников на флангах вулканической постройки вулкана Менделеева (Ст и Тр) и источника Добрый ключ находятся на границе наиболее легких значений местных метеорных вод (см. рис. 7а). Это можно объяснить тем, что их область питания находится на наиболее высоких отметках, чем для других типов вод острова. В работе [Калачева и др., 2017] делается предположение, что область питания Третьяковских и Столбовских источников соответствует привершинной части вулкана Менделеева. Вода ки-



**Рис. 6.** Изотопный состав  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  ( $\text{Cl-SO}_4$ ) термальных вод.

а – соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  к  $\delta\text{D}$  (изотопные составы конденсатов фумарольного пара показаны по данным [Taran et al., 2018]; А – андезитовые воды, по [Таран и др., 1989]); б – соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  к  $\delta\text{D}$  для Верхне-Юрьевских источников в период с 2014 по 2017 гг.; в – соотношение Cl к  $\delta\text{D}$  для Верхне-Юрьевских источников в период с 2014 по 2017 гг. Шифры термальных полей и источников соответствуют табл. 1 и рис. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

пящих Алехинских источников изотопно тяжелее по сравнению с остальными береговыми источниками и имеет ярко выраженный кислородный сдвиг, связанный как с утяжелением при кипении и потере пара, так и с взаимодействием с вмещающими породами [Kalacheva et al., 2017].

Для подземных термальных вод, вскрытых скважинами на разных островах, наблюдается горизонтальный кислородный сдвиг (см. рис. 7б). Вода скважин соседних островов Кунашир и Итуруп имеет близкие значения  $\delta D$ . Вода скважины П2 (о. Парамушир) имеет более легкий изотопный состав, близкий по  $\delta D$  к локальным метеорным водам (см. рис. 4). Интенсивность взаимодействия вода-порода (отношение вода/порода), в процессе которого происходит изотопный обмен, отражается в величине сдвига по  $\delta^{18}O$ .

Отдельную группу на графике формируют термальные воды о. Янкича (см. рис. 7). На острове отсутствуют благоприятные условия для накопления пресных вод, а влияние морской воды прослеживается как в химическом, так и в изотопном составе [Мальцева, 1985; Таран и др., 1993]. В сущности, это морские воды, преобразованные за счет смешения их с вулканическими парами и взаимодействием с вмещающими породами.

1. Изотопные составы метеорных вод Курильских островов вытянуты вдоль линии метеорных вод со значениями  $\delta D$  от  $-85\text{‰}$  до  $-55\text{‰}$ . За счет значительной разницы в широтном расположении ( $43^\circ$  с.ш. –  $50^\circ$  с.ш.) и среднегодовых температур изотопный состав поверхностных вод самого северного о. Парамушир отличается от состава самого южного о. Кунашир.

2. Термальные воды Курильских островов по изотопному составу близки к локальным метеорным водам и так же проявляют изотопную широтную зональность. Это указывает не только на то, что основным источником водного питания для них являются атмосферные осадки, но и на то, что они формируются в зоне интенсивного (свободного) водообмена без длительного взаимодействия с вмещающими породами. В случае Курильских островов кислородный изотопный сдвиг наблюдается только для глубинных термальных вод, вскрытых скважинами и источников, разгружающихся в кратере вулкана Ушишир.

3. Основными процессами, влияющими на наблюдаемые в водах изотопные эффекты, являются смешение метеорных вод с морскими или магматическими, а также фракционирование при кипении и испарении. Наиболее

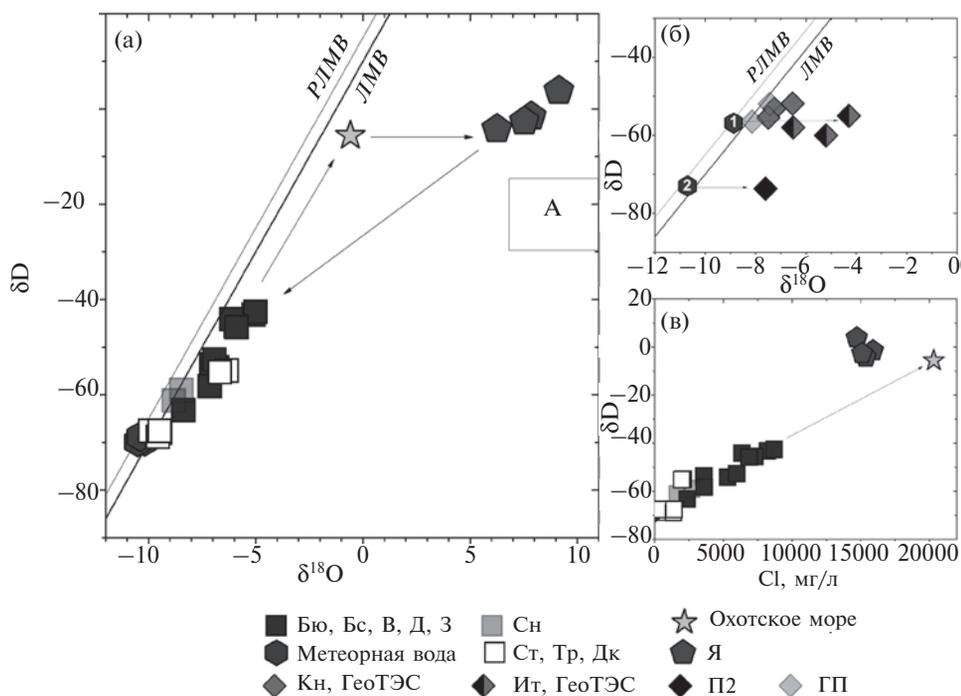


Рис. 7. Изотопный состав Na-Cl термальных вод.

а – прибрежные источники о. Шиашкотан, о. Расшуа и о. Кунашир (А – андезитовые воды, по [Таран и др., 1989]); б – холодные подземные воды о. Кунашир (1), средний состав метеорных вод о. Парамушир (2); в – соотношение Cl к  $\delta D$  для прибрежных источников о. Шиашкотан, о. Расшуа и о. Кунашир. Шифры термальных полей и источников соответствуют табл. 1 и рис. 1.

ярко процессы кипения и испарения прослеживаются в конденсатных бесхлорных водах, формирующихся непосредственно на сольфатарных полях активных вулканов. Присутствие морских вод отмечается в береговых источниках о. Шиашкотан и о. Расшуа. Магматический вклад определяется только в кислых и ультракислых  $\text{Cl-SO}_4$  ( $\text{SO}_4\text{-Cl}$ ) водах с максимальной долей магматической воды до ~ 20%. Этот тип вод формируется, как правило, в пределах построек островных вулканов, характеризующихся близповерхностными (1–2 км) дегазирующими магматическими очагами.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны участникам совместных полевых исследований на Курильских островах Т.А. Котенко, Е.В. Волошиной, К.В. Тарасову, Л.В. Котенко за неоценимую помощь, а также Е.В. Волошиной и П.О. Воронину за выполнение большого объема аналитических работ. Авторы также благодарят рецензентов за конструктивные замечания, учет которых улучшил текст статьи.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 15-17-20011.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басков Е.А., Суриков С.Н.* Гидротермы Тихоокеанского сегмента Земли. М.: Наука, 1975. 172 с.
- 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.
- Горшков Г.С.* Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 267 с.
- Есиков А.Д.* Изотопная гидрогеология геотермальных систем. М.: Наука, 1989. 208 с.
- Знаменский В.С., Никитина И.Б.* Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 44–65.
- Иванов В.В.* О происхождении и классификации современных гидротерм // Геохимия. 1960. № 5. С. 443–449.
- 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., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Волошина Е.В.* Геохимия термальных вод и фумарольных газов о. Шиашкотан (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 12–26.
- 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.
- Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Котенко Т.А.* Геохимия термальных вод о. Кетой (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 21–35.
- Кононов В.И.* Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. М.: Наука, 1983. 216 с.
- Котенко Т.А., Сандимирова Е.И., Котенко Л.В.* Извержение вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2016–2017 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 1. Вып. 37. С. 32–42.
- Мальцева В.И.* Химический и изотопный состав вод о. Янкича // Океанология. 1985. № 25(4). С. 616–622.
- Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
- Мелководные газогидротермы и экосистема бух. Крайтерной (вулкан Ушишир, Курильские острова). Кн. 1. Функциональные характеристики. Ч. 1. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. 196 с.
- Набоко С.М.* Вулканические эксгаляции и продукты их реакции // Труды Лаборатории вулканологии. 1959. № 16. С. 170–198.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 34. Сахалинская область. Л.: Гидрометиздат, 1990. 353 с.
- Никитина Л.П.* Миграция металлов с активных вулканов в бассейне седиментации. М.: Наука, 1978. 80 с.
- Сидоров С.С.* Гидротермальная деятельность кальдеры Головинна (о-в Кунашир) // Бюлл. вулканолог. станций. 1966. № 42. С. 22–29.
- Таран Ю.А., Есиков А.Д., Чешко А.Л.* Дейтерий и кислород-18 в термальных водах Мутновского геотермального района, Камчатка // Геохимия. 1986. № 4. С. 458–468.
- 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.
- Таран Ю.А., Гавриленко Г.М., Черткова Л.В., Гричук Д.В.* Геохимическая модель гидротермальной системы вулкана Ушишир (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 55–68.
- Таран Ю.А., Знаменский В.С., Юрова Л.М.* Геохимическая модель гидротермальных систем вулкана Баранского (о-в Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 95–115.
- Тейлор Х.П.* Изотопы кислорода и водорода в гидротермальных рудных месторождениях. Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 200–234.
- 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.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова В.И.* Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенез. М.: Наука, 1989. 239 с.

- Ферронский В.И., Поляков В.А.* Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
- Чешко А.Л.* Формирование основных типов термальных вод Курило-Камчатского региона по данным изотопных исследований (D,  $^{18}O$ ,  $^3He/^4He$ ) // Геохимия. 1994. № 7. С. 988–1001.
- Чудаев О.В.* Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
- Чудаев О.В., Харитоновна Н.А., Челноков Г.А. и др.* Геохимические особенности поведения редкоземельных элементов в водах Дальнего Востока России в условиях природных и антропогенных аномалий. Владивосток: Дальнаука, 2017. 152 с.
- Chelnokov G.* Interpretation of geothermal fluid compositions from Mendeleev volcano, Kunashir, Russia // Report of the United Nations University GTR. 2004. V. 5. P. 57–82.
- Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. № 133. P. 1702–1703.
- Craig H.* The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas. Nuclear Geology on Geothermal Areas. CNR, Pisa, 1963. P. 17–53.
- Fricke H., O'Neil J.* The correlation between  $^{18}O/^{16}O$  ratios of meteoric water and surface temperature: its use in investigating terrestrial climate change over geologic time // Earth Planet. Sci. Lett. 1999. V. 170. P. 181–196.
- Giggenbach W.F.* Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin // Earth Planet. Sci. Lett. 1992. V. 113. P. 495–510.
- Giggenbach W.F., Stewart M.K.* Processes controlling the isotopic composition of steam and water discharges from steam vents and steam-heated pools in geothermal areas // Geothermics. 1982. V. 11. P. 71–80.
- Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T.* Geochemistry and solute fluxes of volcano-hydrothermal systems of Shishkotan, Kuril Islands // J. of Volcanol. and Geotherm. Res. 2015. V. 296. P. 40–54.
- 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 Volcanol. and Geotherm. Res. 2016. V. 310. P. 118–131.
- 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 // J. of Volcanol. and Geotherm. Res. 2017. V. 346. P. 10–20.
- Taran Y.* Chemical and isotopic composition of fumarolic gases from Kamchatka and Kurile Islands // Rept. Geol. Surv. Japan. 1992. № 279. P. 183–186.
- Taran Yu.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A. et al.* Geochemistry of magmatic gases from Kugryavy volcano, Iturup // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 1749–1761.
- 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. Special Publications. Geological Society. London, 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.

## PROCESSES RESPONSIBLE FOR VARIATIONS IN THE ISOTOPIC COMPOSITION ( $\delta D$ and $\delta^{18}O$ ) OF THERMAL WATERS OF THE KURIL ISLANDS ARC

E. G. Kalacheva<sup>1, \*</sup>, Yu. A. Taran<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS,  
Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geophysics, UNAM, Mexico, 04510, Mexico*

\*e-mail: keg@kscnet.ru

Received November 10, 2018

Many active volcanoes of the Kuril Islands host hydrothermal systems. Their surface manifestations are represented by numerous thermal springs showing diverse chemical composition and physical-chemical parameters. Four main isotopic shifts relative to the local meteoric water line can be observed in the corresponding  $\delta D$  vs.  $\delta^{18}O$  diagrams. For the acid Cl-SO<sub>4</sub> waters there is a clear mixing trend between meteoric water and volcanic vapor. The acid SO<sub>4</sub> waters demonstrate trends indicating kinetic fractionation at temperatures close to the boiling-point. Isotopic composition of the coastal springs tend to march the mixing line between meteoric and seawater. The  $\delta^{18}O$ -shift for deep thermal water is accounted to of isotopic exchange with host rock. The latitude effect revealed for meteoric waters also observed in the isotopic composition of the thermal waters.

**Key words:** thermal waters, isotopic shift, Kuril islands.