

УДК 551.21/23

## ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ВЫНОС МАГМАТИЧЕСКИХ ЛЕТУЧИХ ВУЛКАНАМИ О. КУНАШИР

*Е.Г. Калачева, Ю.А. Таран, Т.А. Котенко, Е.В. Волошина*

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

Вулканы Менделеева и Головнина, расположенные в южной части о. Кунашир, характеризуются интенсивной гидротермальной деятельностью. Поверхностные проявления на склонах в. Менделеева и в кальдере Головнина представлены паро-газовыми выходами с температурами около 100°C и многочисленными горячими источниками с температурой до 96°C в широком диапазоне pH. Химический состав кислых вод преимущественно SO<sub>4</sub>-Cl, нейтральных – Na-Cl. В данной работе представлены новые данные по макрокомпонентному и изотопному (H, O) составам всех типов вод данных вулcano-гидротермальных систем, полученные авторами в 2015 году. Суммарный оцененный гидротермальный вынос магматических хлора и серы обоими вулканами составил около 15 т/сутки Cl и 16 т/сутки SO<sub>4</sub>.

### Введение

Общий поток компонентов, поступающих из магмы и разгружающийся через постоянно дегазирующие вулканы, включает в себя как вынос их с вулканическими парами в атмосферу через фумаролы, так и гидротермальный поток через локальную гидрологическую сеть. Большинство вулcano-гидротермальных систем приурочены к активным андезитовым вулканам, характеризующимся фреато-магматической или фреатической деятельностью, с устойчивой фумарольной активностью в межэруптивных периоды. Многочисленными исследованиями [11, 12, 15, 23 и др.], основанными на геохимических и изотопных данных доказано, что магматический флюид смешивается с глубоко циркулирующими водами метеорного происхождения в процессе нагревания их возле остывающих интрузивных комплексов магматических пород или активных магматических очагов. Конвертирующий раствор образует гидротермальную систему. В процессе последующего взаимодействия первоначально кислых термальных растворов с вмещающими породами происходит их нейтрализация и формирование составов, типичных для высоко-температурных гидротермальных систем. В результате, термальные воды разгружаются на дневную поверхность в виде нейтральных горячих источников [10]. Обычно разгрузка происходит на уровне местного базиса дренирования. В зоне аэрации над восходящим потоком магматического флюида может происходить формирование ультракислых гидротерм за счет абсорбции вулканических паров грунтовыми водами [13, 16, 17, 20 др.]. Анионы (Cl и SO<sub>4</sub>) разгружающихся термальных вод гидротермальных систем, в основном, имеют своим источником HCl и SO<sub>2</sub> вулканические (магматические) газы и могут быть взяты в расчет для оценки выноса магматических летучих и рециклинга летучих в зонах субдукции [16, 21, 22].

Гидротермальные системы с разгрузкой кислых  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  вод, где хлор и сера имеют магматическое происхождение, широко распространены на Курильских островах (Эбеко, Прамушир; Синарка и Кунтаминтар, Шиашкотан; Баранского, Итуруп и др.) [см. 18, 19, 23 и др.]. На острове Кунашир подобные системы связаны с активностью вулканов Менделеева и Головнина.

Остров Кунашир - самый южный из островов Курильской дуги. Наиболее интенсивно термопроявления вулканов изучались здесь во второй половине XX-го века. Химический состав вод вулкана Головнина представлен в работах [5, 7], а вулкана Менделеева в монографиях [4, 5, 8, 9]. Ковалев и Слезин [3] оценили естественную тепловую мощность в. Менделеева на основе измеренных расходов паровых струй и термальных источников. На современном этапе исследований наиболее детальное описание всех термальных полей и площадок с представлением данных по химическому и изотопному составу отдельных источников представлено в монографии Р. Жаркова [2].

В этой работе мы обсуждаем наши (собранные во время полевых работ 2015 года) и опубликованные данные [4, 5, 7, 8, 9] по геохимии вулкано-гидротермальных флюидов южной части о. Кунашир. На основе опубликованных и собственных геохимических данных, а также современных представлений о формировании химического и изотопного состава гидротермальных систем, ассоциированных с активными вулканами, мы попытались оценить условия формирования гидротермальных систем вулканов Менделеева и Головнина, а также количественно оценить видимую разгрузку термальных вод и гидротермальный вынос магматических хлора и серы.

### Методика исследований

Водные пробы на общий химический анализ были отобраны в пластиковые бутылки объемом 0.1 л с предварительной фильтрацией через 0.45  $\mu\text{m}$  MILLIPORE фильтр. Температура ( $\pm 0.1$  °C), pH ( $\pm 0.05$ ) и электропроводность ( $\pm 2$  %) измерялись непосредственно в точке отбора проб полевым мультиметром фирмы WTW. Пробы для определения микрокомпонентов после фильтрации отбирались в пластиковые пробирки объемом 15 мл и подкислялись химически чистой азотной кислотой. Определение концентраций основных катионов и анионов (Na, K, Ca, Mg, Cl,  $\text{SO}_4$ ) выполнялись в лаборатории постмагматических процессов ИВиС ДВО РАН на ионном хроматографе Metrohm 883 Basic IC plus. Анализ микроэлементного состава вод методом ICP-MS (Agilent 7500 CE) выполнялось в ИГЕМ (г. Москва), и его изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) (IR-спектрометрия) выполнены в лаборатории тепломассопереноса ИВиС ДВО РАН. Погрешность определения микроэлементов составляет  $\pm 5\%$ , изотопного состава  $\pm 0.2\%$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\pm 1\%$  для  $\delta\text{D}$ .

### Геологическая характеристика и основные термальные поля

Вулкан Менделеева (высота 896 м) расположен в 12 км к югу от административного центра острова, пос. Южно-Курильск. Это сложная постройка, включающая две вложенные кальдеры. Площадь более древней равна 27 км<sup>2</sup>, молодой - 6 км<sup>2</sup> [1]. Внутри меньшей кальде-

ры сформирован центральный конус, в разрушенном взрывами кратере которого находится экструзивный купол. Сложен он андезитовыми и андезито-базальтовыми лавовыми потоками. Фундаментом вулкана Менделеева служат вулканогенные неогеновые образования. На склонах вулкана расположены 4 термальных поля (рис. 1). В ходе полевых работ 2015 года нами были обследованы два наиболее мощных из них - Северо-Восточное и Северо-Западное. Перепады высот в пределах фумарольных полей вулкана Менделеева значительны (~ 100 метров на Северо-Восточном фумарольном поле). В результате верхняя часть полей маловодная, здесь разгружаются только фумаролы различной мощности. Нижние части полей обводнены: здесь имеются многочисленные термальные источники, вода из которых поступает в притоки р. Лесная. Выходы термальных вод наблюдаются также гипсометрически ниже фумарольных полей в долинах или непосредственно в руслах рек, дренирующих склоны вулканов и также впадающих в р. Лесную. Сюда относятся Верхне- и Нижне-Докторские источники, источники р. Лесная. Расход в устье р. Лесной, основного дренирующего потока склонов вулкана Менделеева, по данным наших замеров составляет  $1.1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Схема гидрохимического опробования 2015 года представлена на рис. 1. В таблице приведены данные полевых измерений основных термопроявлений вулканов.



**Рис. 1.** Схема гидрохимического опробования (вулк. Менделеева).

Вулкан Головнина расположен на самом юге о. Кунашир и представляет собой кальдеру диаметром около 4 км внутри которой имеются четыре посткальдерных экструзивных купола. К одному из них (Центральный) приурочены два наиболее мощные фумарольных поля

(рис. 2). В пределах кальдеры расположены два озера с кислой ( $\text{pH} < 3$ ) водой  $\text{SO}_4\text{-Cl}$  состава. Сток с вышележащего небольшого озера Кипящее (площадь около  $0.7 \text{ км}^2$ ) осуществляется через протоку, прорезающую узкую перемычку в обширное Горячее озеро (площадь около  $3 \text{ км}^2$ ), занимающее  $1/3$  часть общей площади кальдеры. Многочисленные термопроявления представляют собой паро-газовые выходы и кипящие водные и водно-грязевые котлы. Часть выходов расположена на дне обоих озер, в результате чего вода "кипит" за счет газоотделения. В ходе полевых работ 2015 года были обследованы все термальные поля вулкана, схема гидрохимического опробования представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема гидрохимического опробования (кальдера вулк. Головнина).

Основная часть термальных источников на термальных полях вулкана Головнина представляет собой естественные конденсаты парогазовых выходов. Они практически не имеют стока и характеризуются интенсивным газоотделением. Максимальная измеренная температура водных котлов составляет  $96\text{-}98^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}$  в среднем составляет  $2.5\text{-}3$ , минерализация зависит от степени упаривания воды в котлах и колеблется от  $0.5$  до  $10 \text{ г/л}$ . Максимальная температура фумарольных газов  $106^\circ\text{C}$ . Термальная деятельность локализована в пределах термальных полей, в непосредственной близости к ним наблюдаются выходы грунтовых вод, и протекают ручьи без признаков термальной составляющей. Основной дренирующей рекой кальдеры является р. Озерная, впадающая в Охотское море. Основным водотоком, собирающим воду ручьев, дренирующих фумарольные поля и термальные источники, является р. Лесная, несущая свои воды в Тихий океан.

**Таблица.** Точки гидрохимического опробования с данными полевых измерений вулканов Менделеева и Головнина.

№	дата	pH	T, °C	S, $\mu$ S/cm	место отбора водных проб
вулкан Головнина					
Ал-1/15	15.09.2015	8,46	100,3	6140	Внешнее поле, источники
Ал-5/15	15.09.2015	4,75	23,0	1420	устье ручья, дренирующего Внешнее поле
Ал-7/15	15.09.2015	2,58	96,0	3840	Внешнее поле, котел
Ал-8/15	15.09.2015	3,31	53,4	1341	Алехинские источники, нижняя группа
Ал-9/15	15.09.2015	3,23	51,7	1440	Алехинские источники, нижняя группа
К-12/15	11.09.2015	2,88	16,4	995	р.Озёрная устье
К-13/15	11.09.2015	2,83	17,6	1110	р.Озёрная
К-17/15	12.09.2015	1,83	72,0	9940	ЦЗП, Котел Большой
К-20/15	12.09.2015	1,81	21,8	1175	озеро Горячее у ЦЗП
К-21-25/15	12.09.2015	1,8-2,2	57,4-89,4	606-4670	котлы у оз. Кипящее (1я группа)
К-26/15	12.09.2015	2,22	29,4	3080	протока из оз. Кипящего в оз.Горячее
К-27-30/15	12.09.2015	2,1-2,2	78-92	3150- 3310	котлы у оз. Кипящее (2я группа)
вулкан Менделеева					
Вд-1-4/15	17.09.2015	2,13- 3,0	44,6-87,3	5060- 7970	Верхне-Докторские источники
К-1-5/15	09.09.2015	6,09	78,0	3390	Столбовские источники
К-7/15	09.09.2015	7,78	19,7	685	р. Змеиный, устье
К-8/15	09.09.2015	6,21	73,6	3790	Третьяковские источники
К-9/15	09.09.2015	7,60	15,4	288	руч. Третьяковский, устье
К-10/15	09.09.2015	7,24	95,7	3760	Третьяковские источники
Кис-1/15	18.09.2015	3,45	17,6	848	р. Кислый, устье
Кис-4-8/15	18.09.2015	2,28- 2,92	46- 81,8	4570- 8000	Нижне-Менделеевские источники
Кис-9/15	18.09.2015	2,37	94,7	3890	кипящие котлы ниже СВФП
Л-1/15	18.09.2015	5,40	14,1	419	р. Лесная, устье
Л-2/15	18.09.2015	4,61	14,7	396	р.Лесная, ниже слияния с р. Кислым
М-1/15	16.09.2015	6,60	12,5	150	скважина
М-2/15	16.09.2015	1,97	96,6	1670	СЗФП, котел
М-4/15	16.09.2015	2,09	56,6	1991	Источники ниже СЗФП
Нд-1/15	17.09.2015	3,50	47,7	3500	Нижне-Докторские источники
Нд-3-6/15	17.09.2015	7,1 -7,45	70,8	4320- 5260	Скважины, санаторий Горячий пляж
Нд-8/15	17.09.2015	3,02	28,9	3080	р. Докторский, ниже источников

### Предварительные результаты

#### Изотопный состав воды

Изотопный состав для всех опробованных вод показан на графике зависимости  $\delta D$  от  $\delta^{18}O$  (Рис. 3). Наблюдаемый тренд вероятнее всего обусловлен кинетическим фракционированием изотопов при кипении, как это наблюдается для многих гидротермальных полей и впервые объяснено в работе Giggenbach and Stewart [14]. В монографии Ю.А. Тарана [6] приведен порядок расчета необходимых соотношений.

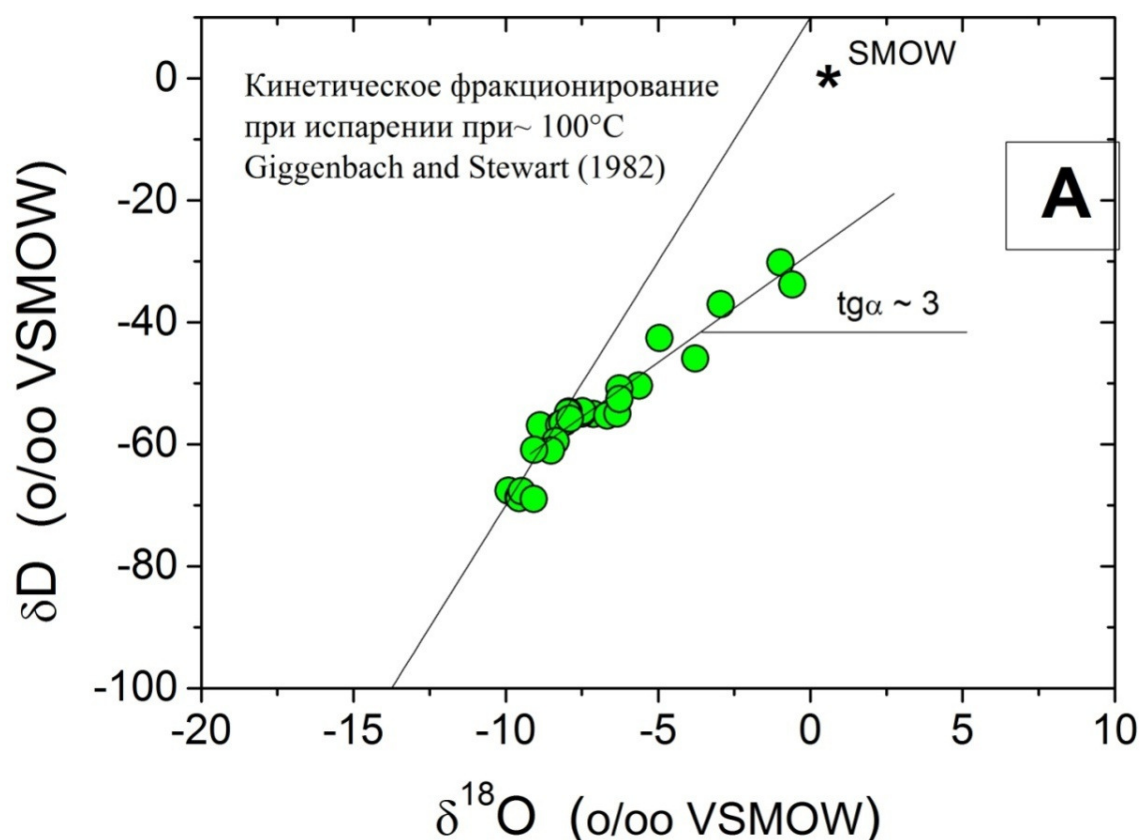
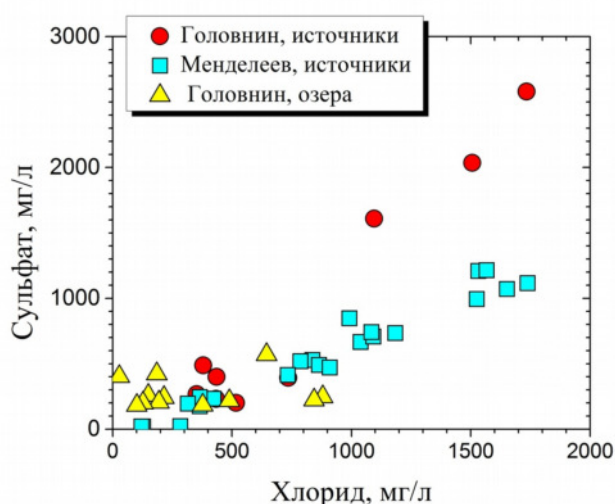


Рис. 3. Диграмма  $\delta D - \delta^{18}O$  для термальных вод района

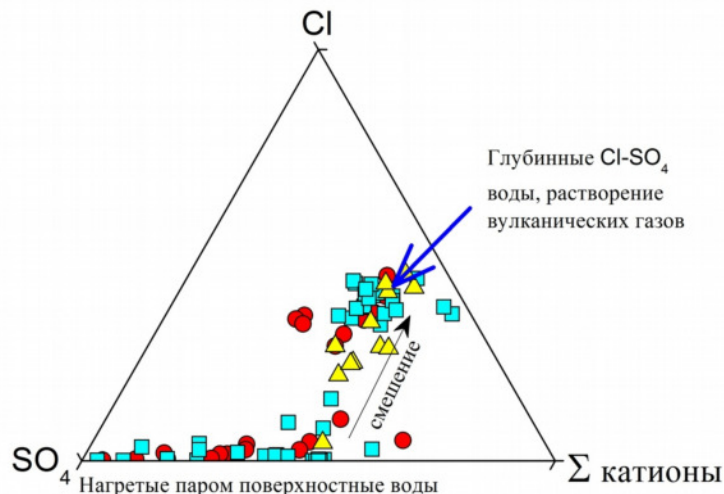
#### Макрокомпоненты

Большая часть термальных вод исследуемого района относится к кислым  $SO_4-Cl$  водам. Исключение составляют источники, разгружающиеся в береговой зоне. Здесь в основном, распространены  $Na-Cl$  близнейтральные или слабощелочные воды. На графике смешения  $SO_4 - Cl$  (Рис. 4) для кислых вод вулкана Менделеева и кальдеры Головнина (по литературным данным) можно видеть три различных тренда. Эти тренды (кроме группы точек для озер кальдеры Головнина) означают различные отношения  $Cl/S$  в магматических газах, питающих вулcano-гидротермальные системы двух вулканов. Подобные различия ранее были показаны также для двух гидротермальных систем вулканов о. Шиашкотан [18].



**Рис. 4.** Диаграмма смешения Cl-SO<sub>4</sub> для источников в Менделеева и источников и озер кальдеры Головнина (по литературным данным (Чудаев, Мархинин)).

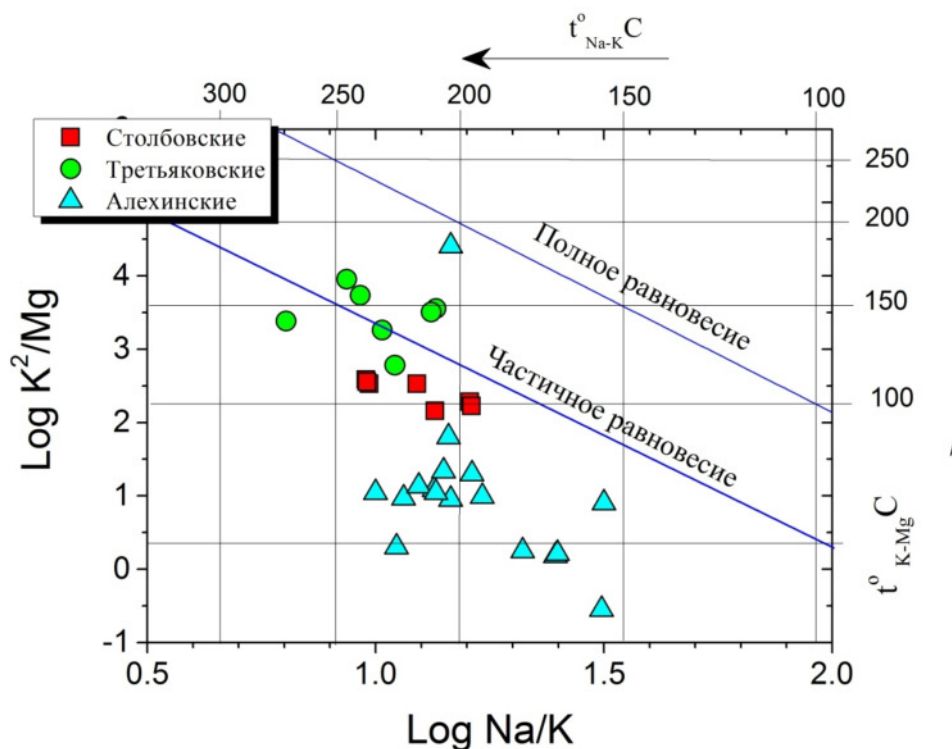
На треугольной диаграмме Cl-SO<sub>4</sub>-Катионы для вод вулканов Менделеева и Головнина (рис. 5) точки с низким относительным содержанием хлор-иона соответствуют нагретым паром поверхностным водам, где сульфат является продуктом окисления сероводорода. Точки в центре диаграммы соответствуют водам более глубокой циркуляции, растворяющим магматические газы. Промежуточные составы – результат смешения двух составляющих.



**Рис. 5.** Треугольная диаграмма Cl-SO<sub>4</sub>-Σ катионов для вод вулканов Менделеева и Головнина.

На модифицированной диаграмме Гиггенбаха [10, 24] для береговых источников юга Кунашира (рис. 6) помимо точек, отображающие их составы, показаны линии полного равновесия (когда Na-K- температура равна K-Mg- температуре) и линия частичного равновесия. Видно, что вода Столбовских и Третьяковских источников частично уравновешена с породой. Эти источники ассоциированы с в. Менделеева, и разгружают воду глубокой циркуляции (за счет значительного гидравлического градиента), в то время, как вода Алехинских источников,

скорее всего, является близко-поверхностным стоком гидротермальной системы кальдеры Головнина.



**Рис. 6.** Модифицированная диаграмма Гиггенбаха (Giggenbach, 1988; Taran et al., 1998) для береговых источников юга Кунашира.

#### *Гидротермальный вынос магматических компонентов*

Базисом дренирования острова Кунашир являются Тихий океан и Охотское море. Поверхностный сток с вулкана Менделеева осуществляется через многочисленные ручьи с расходами от первых единиц до сотен литров в секунду, формирующиеся на склонах вулканических массивов. Основным водотоком, собирающим воду ручьев, дренирующих fumarольные поля и термальные источники, является р. Лесная, несущая свои воды в Тихий океан. Кальдеру вулкана Головнина дренирует единственная р. Озерная, впадающая в Охотское море. Расстояние от истока до устья около 3-х км. На всем протяжении видимых притоков не имеет. Расход реки Озерной определен нами в  $0.54 \text{ м}^3/\text{с}$  с концентрацией Cl в 149 мг/л и 184 мг/л  $\text{SO}_4$ . Это означает, что каждую секунду в Охотское море из кальдеры Головнина поверхностным стоком поступает около 81 г Cl и 100 г  $\text{SO}_4$ . Измеренный расход реки Лесная в устье составляет (по состоянию на сентябрь 2015 г.)  $1.1 \text{ м}^3/\text{с}$  при концентрации хлор-иона 90 мг/л и сульфат-иона 79 мг/л. Следовательно, каждую секунду в Тихий океан поступает 80 г сульфата и 91 г хлора. Таким образом, общий гидротермальный вынос обеими системами (Менделеева и Головнина) в пересчете на сутки составляет 15 т/сутки Cl и 16 т/сутки  $\text{SO}_4$ . Это значительно ниже, чем вынос серы и хлора гидротермальными системами вулканов о. Шиашкотан (70 т/сутки  $\text{SO}_4$  и 27 т/сутки Cl) [18] и в. Эбеко, о. Прамушир (148 т/сутки  $\text{SO}_4$  и 82 т/сутки Cl) [19].



### Выводы

Вулканы Менделеева и Головнина характеризуются интенсивной гидротермальной деятельностью, проявляющейся в виде паро-газовых струй с температурами около 100°C и многочисленными горячими источниками с температурой до 96°C в широком диапазоне рН. Химический состав кислых вод преимущественно SO<sub>4</sub>-Cl, нейтральных - Na-Cl. Согласно химическому и изотопному составам кислых термальных вод, их формирование происходит в основном в приповерхностных условиях за счет абсорбции вулканических паров грунтовыми водами. Изотопное утяжеление кислых вод при выходе на поверхность происходит в основном в результате кинетического фракционирования изотопов при кипении. Береговые источники связаны с системой вулкана Менделеева и разгружают воду глубокой циркуляции (за счет значительного гидравлического градиента). Исключение составляют Алехинские источники, вода которых, скорее всего, является близко-поверхностным стоком гидротермальной системы кальдеры Головнина. Суммарный оцененный гидротермальный вынос магматических хлора и серы обоими вулканами составил около 15±2 т/сутки Cl и 16±2 т/сутки SO<sub>4</sub>.

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

### Список литературы

1. Гориков Г.С. Вулканы Курильской островной дуги. М.: Наука. 1967. 287 с.
2. Жарков Р.В. Термальные источники Южных Курильских островов. Владивосток: Дальнаука. 2014. 378 с.
3. Ковалев Г.Н., Слезин Ю.Б. Тепловая мощность вулкана Менделеева (о-в Кунашир). Бюлл. вулк. ст.1970, №46. С. 46-51.
4. Лебедев Л.М., Зотов А.В., Никитина И.Б. и др. Современные процессы минералообразования на вулкане Менделеева (о-в Кунашир). М.: Наука. 1980. 176 с.
5. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука. 1977. 212 с.
6. Таран Ю.А. Геохимия гидротермальных газов. М.: Наука. 1988. 170 с.
7. Сидоров С.С. Гидротермальная деятельность кальдеры Головнина (о-в Кунашир) // Бюлл. вулк. ст. 1966. № 42. С. 22-29.
8. Chelnokov G. Interpretation of geothermal fluid compositions from Mendeleev volcano, Kunashir, Russia. Geothermal Training Programme. 2004. V5. P. 57-82.
9. Chudaev O., Chudaeva V., Sugimori K. et al. Composition and origin of modern geothermal systems of the Kuril island arc // Indian Journal of marine sciences. 2008. V. 37(2). P. 166-180.
10. Giggenbach, W.F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. V. 52. P. 2749-2765.
11. 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.
12. Giggenbach, W.F. Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa, Tilling (Eds.), Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards. Springer-Verlag. 1996. P. 221-256.

13. *Giggenbach W.F., Garcia, N., Londoño, C.A. et al.* The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic hydrothermal system, Colombia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1990. V. 42. P. 13–39.
14. *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.
15. *Hedenquist J.W.* The ascent of magmatic fluid: Discharge versus mineralization // *Mineralogical Association of Canada Short Course Series.* 1995. V. 23. P. 263–289.
16. *Hedenquist J.W., Aoki M., and Shinohara H.* Flux of volatiles and ore-forming metals from the magmatic-hydrothermal system of Satsuma Iwojima volcano // *Geology*, 1994, V. 22. P. 585–588.
17. *Hedenquist J.W., Taran Y. A.* Modeling the Formation of Advanced Argillic Lithocaps: Volcanic Vapor Condensation Above Porphyry Intrusions // *Econom. Geology.* 2013. V. 108. P. 1523-1540.
18. *Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T.* Geochemistry and solute fluxes of volcano–hydrothermal systems of Shiashkotan, Kuril Islands // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015 V. 296. P. 40–54.
19. *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. Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. V. 310. P. 118-131.
20. *Rowe Jr., G.L., Brantley S.L., Fernandez J.F., Borgia A.* The chemical and hydrologic structure of Poás volcano, Costa Rica // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1995. V. 64. P. 233–267.
21. *Shinohara H.* Volatile flux from subduction zone volcanoes: insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan // *J. Volcanol. Geotherm.* 2013. V. 268. P. 46-63.
22. *Taran Y.A.* Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka–Kuril subduction zone // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2009. V. 73. P. 1067–1094.
23. *Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A. et al.* Geochemistry of magmatic gases of Kudryavy volcano, Iturup. Kuril islands // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. V. 59. P. 1741–1761.
24. *Taran, Y., Fisher T.P., Pokrovsky B. et al.* Geochemistry of the volcano–hydrothermal system of El Chichón Volcano, Chiapas, Mexico // *Bull. Volcanol.* 1998. V. 59. P. 436–449.