

УДК 551.21

СОЛЬФАТАРНЫЕ ГАЗЫ ВУЛКАНОВ МЕНДЕЛЕЕВА И ГОЛОВНИНА В 2015 Г.  
(О. КУНАШИР)

*Т. А. Котенко<sup>1</sup>, Е.Г. Калачева<sup>1</sup>, Л.В. Котенко<sup>1</sup>, Ю.А. Таран<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006, бульвар Пийпа 9;  
*e-mail: [kotenko@sakhalin.ru](mailto:kotenko@sakhalin.ru)*

<sup>2</sup>Институт Геофизики,  
Национальный Автономный Университет Мексики,  
Мехико, Мексика.

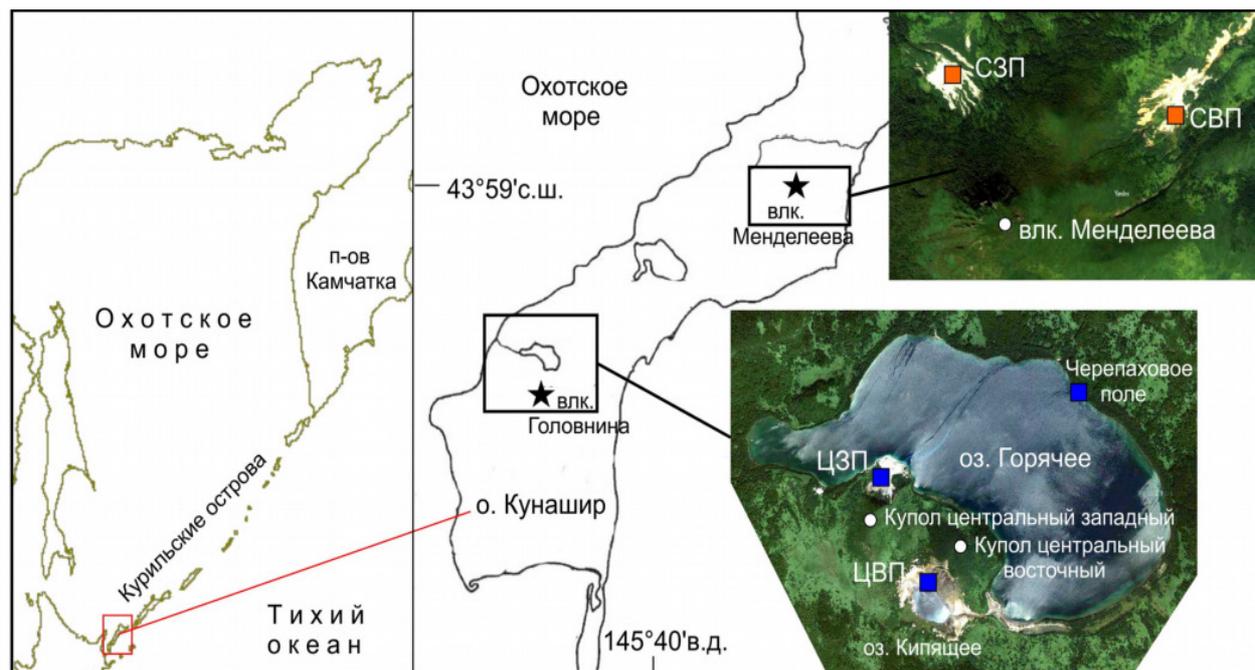
Приводятся данные о химическом и изотопном составе сольфатарных газов вулканов Менделеева и Головнина (о. Кунашир, Курильские о-ва), полученные в результате полевых работ в сентябре 2015 г. Согласно этим данным сольфатары СЗП влк. Менделеева и возможно ЦВП влк. Головнина образованы смешением магматического флюида с гидротермальным паром, образованным в результате нагрева и испарения метеорных вод. Доля магматической компоненты для влк. Менделеева не более ~15%.

### Введение

Вулканы Менделеева и Головнина (о. Кунашир, Курильские о-ва) в последние 50 лет характеризуются стабильным режимом газо-сольфатарной деятельности. Мы представляем данные по составу газов этих вулканов, полученные в 2015 г., включая содержания «кислых» компонентов (CO<sub>2</sub>, S, HCl), постоянных газов (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, Ar, He) и изотопные отношения (D/H и <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O) для конденсатов. Непосредственное опробование фумарольных газов по-прежнему необходимо, так как позволяет получить информацию, недоступную при других исследованиях. Последние данные по химическому составу газов этих вулканов относятся к 1993-94 гг. [7]. Новые данные по изотопному составу гелия приведены Чудаевым и др. [5].

Вулкан Менделеева - сложный стратовулкан с центральным экстрезивным куполом, (43°59'С.Ш., 145°44'В.Д., высота 887 м). Были опробованы паровые струи северо- западного (СЗП) и северо-восточного полей (СВП).

Кальдера Головнина с внутренним диаметром 4,5 км окружена эродированным гребнем соммы (координаты вершины 43°51'С.Ш., 145°30'В.Д., высота 541 м). В пределах кальдеры выделяются четыре обособленные вершины, представляющие собой экстрезивные купола. К подножиям двух из них, Центрального западного (ЦЗП) и Центрального восточного (ЦВП), приурочены одноименные термальные поля. Интенсивное газовыделение внутри кальдеры проявляется по берегам оз. Горячего, во взрывной воронке оз. Кипящего и по его берегам. Отбирались газы на Центральном западном поле (ЦЗП), Центральном восточном (ЦВП) и Черепуховом. Точки отбора проб указаны на схеме (рис. 1).



**Рис. 1.** Расположение вулканов Менделеева и Головнина на острове Кунашир и места отбора газовых проб.

### Результаты и обсуждение

Для отбора фумарольных газов применялись ампулы Гиггенбаха с щелочным поглотителем (4М раствор NaOH) и кварцевая или титановая газоотборная трубка. Температуру газов измеряли цифровым термометром. Конденсат фумарольного газа отбирался в барботер с принудительной прокачкой газа и охлаждением барботера. Отобранный конденсат анализировался на изотопы кислорода и водорода.

Химический анализ проб проводился в ИВиС ДВО РАН по методике Гиггенбаха и Гогеля [6]. Абсорбированные компоненты в щелочи ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$ ) определялись стандартными методами: потенциометрическим, иодометрическим, титрометрическим (аналитик Гарцева Л.Н.). Неабсорбированные газы ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ,  $He$ ) определялись методом газовой хроматографии (аналитик Гусева В.И.). Изотопия воды газовых конденсатов выполнена также в ИВиС в лаборатории теплопереноса (аналитик Воронин П.).

Состав сольфатарных газов вулканов Головнина и Менделеева показан в Таблице 1. Содержание водяного пара варьирует от 85 до 99 mol%. Определены низкие концентрации  $HCl$  (0,05-0,34 мол.% в сухом газе). Общая сера (в основном  $H_2S$ ) варьирует от 7,4 до 29,8 мол.%. Отношение C/S составляет 5,6-9,8 для влк. Менделеева и 2,3-3,5 для влк. Головнина (ЦЗП и ЦВП) и более 10 в газовых выходах Черепашового поля кальдеры Головнина. Содержание  $H_2$  в газах влк. Головнина от 0,02 до 0,2 мол.% в сухом газе, что сильно отличается от газов влк.

Менделеева, где  $H_2$  определен в тысячных долях процента. В Таблице 2 представлена краткая характеристика термальных проявлений разных полей.

На треугольной диаграмме (рис. 2а) показаны относительные концентрации  $CH_4 - N_2 - Ar$ , чтобы рассмотреть возможность разделения газов на преимущественно магматические (с высокими отношениями  $N_2/Ar$ ) и гидротермальные (с высокой концентрацией метана) [2, 6]. По концентрации метана газовые проявления разбиваются на две группы: с низким содержанием 0,59 - 2 ppm (ЦВП влк. Головнина и СЗП влк. Менделеева) и высоким – 33,1- 43,6 ppm для остальных (табл. 2).

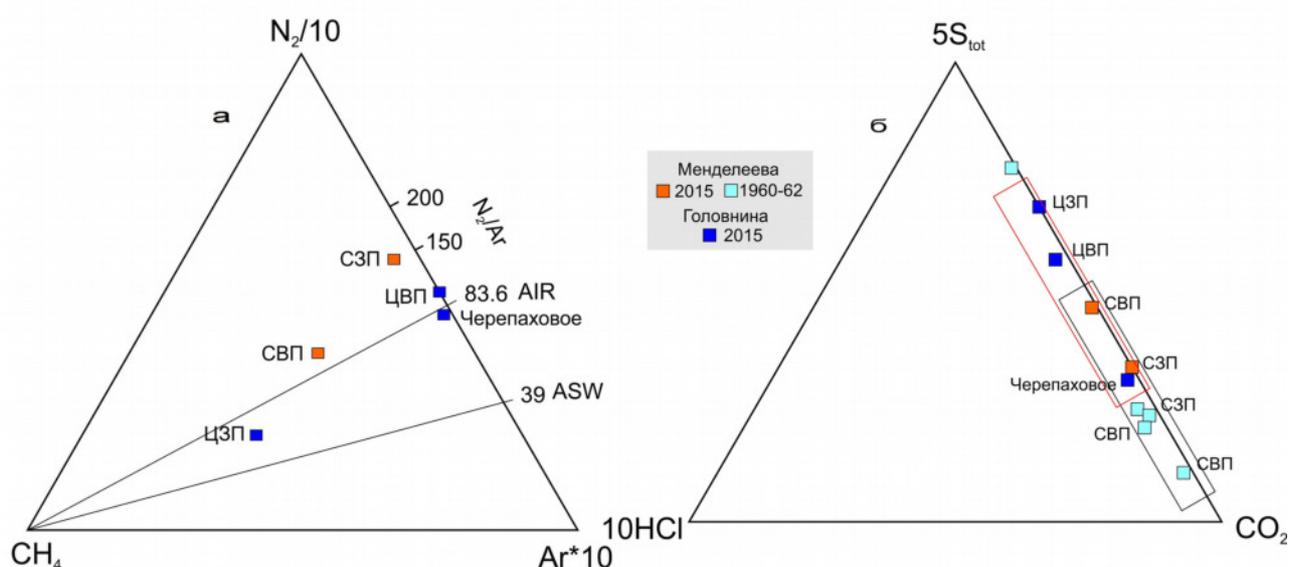
На диаграмме (рис. 2а) точка Черепахового поля выпадает из своей области из-за большого содержания воздушных компонентов. Наибольшее относительное содержание аргона оказалось в газах влк. Головнина – на ЦВП и на Черепаховом поле. Для газа ЦЗП  $N_2/Ar = 63$  (смесь водорастворенного и атмосферного воздуха). В остальных газах отношение  $N_2/Ar$  составляет 86–149. Пробы газа были скорректированы на воздушное загрязнение для  $N_2$  и  $Ar$ . Тем не менее, отношения  $N_2/Ar$  близки к воздушному или чуть выше. Также наблюдаются высокие отношения  $N_2/He$ , то есть газы после коррекции на содержание воздуха по содержанию кислорода по-прежнему содержат большую долю воздушной составляющей. Исключение составляет проба с СЗП влк. Менделеева, для которой  $N_2/Ar = 149$ , а  $N_2/He = 1306$ .

**Таблица 1.** Состав газов влк. Менделеева и Головнина, % мол.

Место отбора	$H_2O$	$CO_2$	$S_{общ.}$	$HCl$	$H_2$	$He \cdot 10^{-6}$	$N_2$	$Ar$	$O_2$	$CH_4$
Влк. Головнина										
ЦЗП	99,030	0,657	0,287	0,001	0,001	1,52	0,014	0,00022	0,000624	0,00331 2
ЦВП	99,368	0,373	0,106	0,002	0,00013	3,24	0,119	0,001	0,030	$5,94 \cdot 10^{-5}$
Черепаховое поле	85,479	11,467	1,078	0,034	0,030	120	1,498	0,017	0,014	0,004
Влк. Менделеева										
СЗП	97,951	1,837	0,187	0,001	$2,38 \cdot 10^{-5}$	17,1	0,022	0,00015	0,000476	0,0002
СВП	98,505	1,211	0,217	0,003	0,0001	5,15	0,051849	0,0005	0,008	0,004

**Таблица 2.** Характеристика термальных полей.

Вулкан Поле	Менделеева		Головнина		
	СЗП	СВП	ЦВП	ЦЗП	Черепаховое поле
координаты	N43°59'15'' E145°43'44''	N43°59'04'' E145°44'57'' ''	N43°51'56'' E145°29'57'' ''	N43°52'20'' E145°29'43'' ''	N43°52'38'' E145°30'47''
Т°С	99	98	98	98	98
Сумма газовых компонентов без воды, %	2,05	1,5	0,63	0,96	14,5
$\log H_2/H_2O$	-6,6	-6,0	-5,9	-4,8	-3,5
$R/R_a^*$	6,6**		5,6**		
$CH_4$ , ppm	2,0	39,6	0,59	33,1	43,6



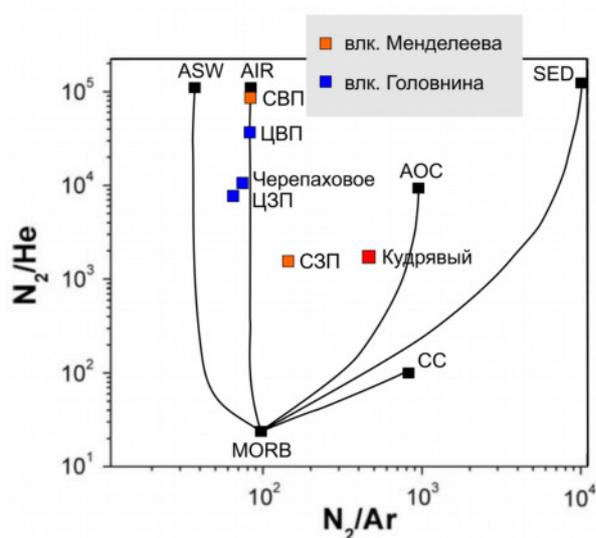
**Рис. 2.** Треугольные диаграммы, показывающие относительные концентрации  $N_2$ ,  $Ar$  и  $CH_4$  (а)  $HCl$ ,  $S$  и  $CO_2$  (б) в газах в Менделеева и кальдеры Головнина. Данные за 1960-62 гг. заимствованы из работы [1].

По данным 2015 г. содержание  $He$  в сухом газе  $\sim 3,5-8,4$  ppm в газовых выходах в Менделеева и  $1,6-8,3$  в газах кальдеры Головнина, что по [7], может характеризовать как вулканический тип флюида так и гидротермальный, обогащенный  $CO_2$ . При этом изотопный состав гелия в этой же работе показан как  $5,6R_a$  и  $6,6R_a$  для кальдеры Головнина и вулкана Менделеева, соответственно ( $R_a$  - воздушный коэффициент  $^3He/^4He=1.39 \times 10^{-6}$ ). Для вулканических высокотемпературных газов Курило-Камчатской зоны субдукции этот параметр составляет  $6,8 \pm 0.8$  [7].

Для характеристики источника флюида по относительным концентрациям  $N_2$ ,  $Ar$  и  $He$  применена диаграмма  $N_2/He - N_2/Ar$  (рис. 3).

Использованы опубликованные средние параметры для источников флюидов зоны субдукции [2] (табл. 3): резервуары, принимающие непосредственное участие в генерации магм - это флюиды мантийного клина (используются составы газов MORB (= Mid Ocean Ridge Basalts)), измененной океанической коры (AOC = Altered Oceanic Crust), океанических осадков (SED = Sediments) и континентальной коры (CC = Continental Crust). Кроме того в формировании состава газов участвуют метеорные воды (ASW = Air Saturated Water) и воздух (AIR). Содержание  $N_2$ - $Ar$ - $He$  позволяет выделить участие только двух составляющих компонентов MORB и ASW для СВП (Менделеева) и газов влк. Головнина. В формировании газов СЗП Менделеева возможно присутствие некоторой доли флюидов AOC и/или SED.

Все температуры газов во время отбора не превышали температуру кипения воды для высоты их расположения и составляли  $98-99^\circ C$ . Немногим более высокие температуры (до  $130^\circ C$ ) отмечались на СЗП влк. Менделеева неоднократно в разные годы [\*Барабанов, Отчет, 7], что, вероятнее всего, связано с понижением уровня грунтовых вод; и, возможно, в 1979 г.



**Рис. 3.** Диаграмма отношений  $N_2/He-N_2/Ar$  для газов влк. Менделеева и Головнина. Пояснения в тексте.

на СВП, когда наблюдалось истечение жидкой серы из береговых отложений оз. Горячего [4]. По данным [1] во всех газовых разгрузках значительно выше концентрация  $H_2S$  по сравнению с  $SO_2$  (отношение  $H_2S/SO_2 > 30$ ). Тройная диаграмма на рис. 2б показывает относительные концентрации  $CO_2$ , общей серы ( $S_{tot}$ ) и  $HCl$  для газов вулканов Головнина и Менделеева. Во всех газах преобладает  $CO_2$ , отношение  $CO_2/S_{tot}$  5,6-9,8 для Менделеева и 2,3-10,6 для Головнина. Общее для всех газов - низкая концентрация  $HCl$ . Если для гидротермальных газов это весьма характерно - потери хлора вследствие растворения  $HCl$  в воде, то для СЗП влк. Менделеева это могло быть результатом потери конденсата в пробоотборной системе.

#### Изотопный состав фумарольного пара.

На диаграмме  $\delta D - \delta^{18}O$  (рис. 4) приведены изотопные составы конденсатов фумарольного пара и местных поверхностных вод. Изотопные составы газов влк. Менделеева образуют тренд смешения магматической и метеорной компоненты: доля магматической компоненты предположительно (за вычетом изотопного сдвига, связанного с обменом с породой в среднем ~6-10‰) не более 15 % (рис. 4). Для влк. Головнина изотопный сдвиг для пара еще меньше, или отсутствует (Черепаховое поле).

#### Эмиссия основных газовых компонентов

По оценке Ковалева и Слезина [3] тепловой поток сольфатарных струй влк. Менделеева составлял: для СЗП - 4,2 тыс. ккал/с, что соответствует эмиссии пара ~ 6,6 кг/с, а для СВП+ЮВП+ВП - 2,3 тыс. ккал/с и расход пара ~ 3,4 кг/с соответственно. Если считать поток вещества неизменным, то по составу сольфатарных газов можно рассчитать валовую эмиссию основных газовых компонентов (табл. 4).

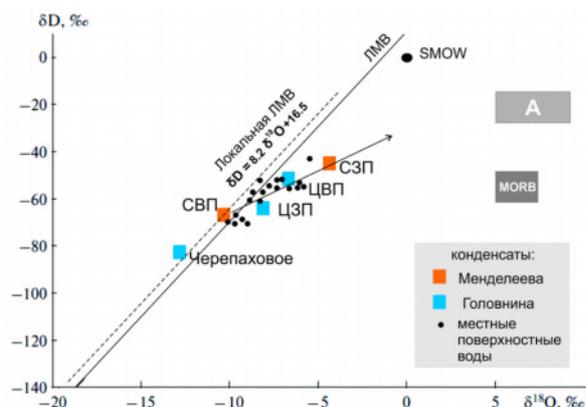


Рис. 4. Диаграмма Крейга для фумарольного пара и метеорных вод.

Таблица 3. Характеристика исходных резервуаров по содержанию  $N_2$ , He, Ar. Пояснения в тексте.

Резервуар	R/Ra*	He	$N_2$	Ar	$N_2/He$	$N_2/Ar$
MORB	8,5	0,011	0,57	0,0056	51,8	101,8
AOC	0,15	$3,1 \cdot 10^{-5}$	0,068	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$
SED	0,12	$3,2 \cdot 10^{-5}$	7,5	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^4$
ASW	1	$1,56 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^5$	36,6
AIR	1	$5,24 \cdot 10^{-4}$	78,08	0,93	$1,5 \cdot 10^5$	83,6

Таблица 4. Валовая эмиссия основных компонентов сольфатарных газов на термальных полях влк. Менделеева: СЗП – Северо-западное поле, СВП - Северо-восточное и остальные поля в сумме.

Компонент	СЗП		СВП	
	% вес.	т/сут.	% вес.	т/сут.
$H_2O$	95,27	540,5	96,63	300,2
$CO_2$	4,36	24,8	2,9	9,0
$H_2S$	0,34	2,0	0,4	1,3
HCl	0,002	0,011	0,005	0,016
$CH_4$	0,0003	0,002	0,006	0,019
$N_2$	0,017	0,10	0,040	0,12

### Заключение

Низкие температуры, изотопный ( $\delta D - \delta^{18}O$ ) и химический состав одной части сольфатар вулканов Головнина (ЦЗП, Черепашовое поле) и Менделеева (СВП) позволяют отнести их к гидротермальным газам. Сольфатары СЗП влк. Менделеева и возможно ЦВП влк. Головнина образованы смешением магматического флюида с гидротермальным паром, образованным в результате нагрева и испарения метеорных вод, доля магматической компоненты для влк. Менделеева не более ~15%. Выводы предварительные и требуют дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда № 15-17-20011

**Список литературы.**

1. *Воронова Л.Г., Сидоров С.С.* Сравнительная характеристика фумарольных газов некоторых вулканов Курильских островов // Современный вулканизм. Труды второго всесоюзного вулканологического совещания 3-17 сентября 1964 г. 1966. Т. 1. С. 147-152.
2. *Зеленский М.Е., Таран Ю. А., Дубинина Е. О. и др.* Источники летучих компонентов для вулкана зоны субдукции: Мутновский вулкан, Камчатка // Геохимия. 2012. № 6. С. 555–575.
3. *Ковалев Г.Н., Слезин Ю.Б.* Тепловая мощность вулкана Менделеева (о-в Кунашир) // Бюлл. вулканол. ст. 1970. №46. С. 46-50.
4. *Мархинин Е.К.* О состоянии вулканов острова Кунашир (март 1974 – май 1982 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 43-51.
5. *Чудаев О. В., Чудаева В. А., Челноков Г. А.* Геохимические аспекты формирования термальных зон активного вулканизма (на примере Курильской островной дуги) // Гидрогеология и геохимия вод складчатых областей Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 82 – 97.
6. *Giggenbach, W.F., Goguel, R.L.* Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges // New Zealand DSIR Chem. Division Report 2407, Christchurch, New Zealand, 1989. 88 p.
7. *Taran Y. A.* Geochemistry of volcanic and hydrothermal fluids and volatile budget of the Kamchatka-Kuril subduction zone // Geochim. Cosmochim. Acta. 2009. № 73. P. 1067-1094.
8. *Барабанов Л. Н.* Гидротермы Курильской вулканической области. Петропавловск-Камчатский: Фонды, Институт вулканологии РАН, 1976. 460 с.