

Геохимия газов термальных полей Кошелевского вулканического массива

Таран Ю.А.¹, Котенко Л.В.¹, Калачева Е.Г.¹, Ермаков А.В.², Кузьмин Д.Ю.¹

Gas geochemistry of thermal fields of the Koshelevsky volcanic massive

Taran Y.A., Kotenko L.V., Kalacheva E.G., Ermakov A.V., Kuzmin D.Yu.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: taran@kscnet.ru

² *Геологический институт РАН, г. Москва*

Приводятся результаты опробования в 2025 г. паровых струй Нижне- и Верхне-Кошелевского термальных полей. Химический состав газов включает углеводороды до C₆. Впервые получены также данные о изотопном составе воды и углерода CO₂ и CH₄. Сделана попытка объяснить, почему химический и изотопный составы флюидов Нижнего и Верхнего полей различаются.

Введение

Газы паровых струй Кошелевского вулканического массива последний раз отбирались в 60-70-х годах прошлого века, более 50 лет назад [2]. Эта работа пока является единственной фундаментальным исследованием геохимии термальных флюидов Кошелевского массива, в котором одновременно были показаны особенности паровой разгрузки паро-доминирующих геотермальных систем, а также количественно измерен естественный вынос тепла с обоих термальных полей, который оказался рекордным для Камчатки (>300 МВт). В этой же работе [2] получены первые (и последние) данные о химическом составе паровых струй Верхнего и Нижнего Кошелевских термальных полей.

В предлагаемой работе мы приводим данные, полученные нами летом 2025 г. на термальных полях Кошелевского вулканического массива. Даются подробные химические составы газов, включая углеводороды до C₆, а также изотопные составы воды и углерода CO₂ и CH₄. Предлагаются оценки глубинных температур методами газовой геотермометрии, обсуждаются геохимические различия между Верхним и Нижним термальными полями, а также предлагается упрощенная модель паро-доминирующей Кошелевской гидротермальной системы.

Общая характеристика района

Подробные сведения о геологическом строении и гидрогеологической обстановке района даны в статьях А.И. Сережникова и др. [5] и Е.А. Вакина и др. [2]. Это сложная постройка, максимальной высотой 1825 м, состоящая из нескольких разновозрастных, в основном, четвертичных вулканических аппаратов. Массив, несмотря на возраст, интенсивно раздроблен и пересечен серией глубинных субширотных разломов [2, 5]. Характерно широкое распространение измененных пород от пропилитов до сольфатарной аргиллизации. Две крупные термоаномалии – Верхнее и Нижнее термальные поля – расположены на западных склонах массива с разницей в абсолютных высотах около 500 м (~1200 и ~700 м, соответственно). Оба поля служат очагами разгрузки паровых струй, часть из которых выносит перегретый пар с температурой до 150 °С на Верхнем поле и до 117 °С на Нижнем. Согласно работе [2], общая естественная тепловая мощность термальных полей превышает 300 МВт, что является максимумом для геотермальных полей Камчатки [6]. Глубокими скважинами в 1970-80-е годы вблизи Нижнего поля и ближе к Охотскому берегу были вскрыты воды с минерализацией выше, чем у морской воды, содержащие газ с преобладанием метана [4, 5].

Методы

Пробы парогазовых струй отбирались в вакуумированные ампулы с 4N раствором КОН. Сухой газ отбирали во время конденсации пара в охлаждаемом снегом барботере в вакутейнеры объемом 8-12 мл методом вытеснения. Пробы свободного газа

источников и котлов отбирались в вакутейнеры, используя воронку, в которой накапливался газ. Химический состав газов анализировался стандартными методами газовой хроматографии и «мокрой» химии в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Изотопный состав воды и газов анализировали в ГИН РАН (Москва).

Результаты

Химические и изотопные составы опробованных паровых струй приведены в таблице. Здесь же для сравнения показаны данные из работы [2], а также средние составы паровых струй еще двух паро-доминирующих участков мощных геотермальных систем Камчатки – Большого Семячика и Северо-Мутновской [1, 9].

Таблица. Химический (об. %) и изотопный состав газов из парагазовых струй Кошелевских термальных полей

Проба	Лето 2025 г.				[2]		Мутн.	Бурл.
	ВК-1	ВК-2	ВК-3	НК	ВК	НК		
t_s , °C	110	98	142	98	131	98	96	130
Xg ммоль/моль	15	14	21	2.5	14	1,8	3.5	5.6
CO ₂	80.9	84.8	93.2	77.8	67.0	77.2	87.6	80.5
H ₂ S	13.6	12.5	4.6	2.4	22.8	5.2	3.4	14.0
H ₂	0.31	0.57	0.62	0.53	0.38	2.1	6.2	1.3
N ₂	1.42	1.37	0.94	2.56	8.1	1.7	1.6	6.2
CH ₄	0.62	0.46	0.52	14.95	0.28	11.3	1.2	11.7
Ar	0.011	0.0064	0.0050	0.061			0.03	0.095
He	0.0012	0.0010	0.0010	0.0015			0.0013	
C ₂ H ₆	0.049	0.0030	0.0020	0.370				
C ₃ H ₈				0.037				
$\sum C_4$				0.0114				
$\sum C_5$				0.0041				
$\sum C_6$				0.0015				
NH ₃	0.21	0.24	0.16	2.3				
N ₂ /Ar	129	214	188	42			53	65
CH ₄ /C ₂ H ₆	173	171	167	36				
δD	-73.9	-76.2	-68.3	-75.7				
$\delta^{18}O$	-6.9	-7.5	-5.5	-9.0				
$\delta^{13}C-CO_2$	-6.7	-6.1	-6.3	-9.3				
$\delta^{13}C-CH_4$	-24.8	-24.1	-25.3	-38.8				
$R_H = \lg(H_2/H_2O)$	-4.46	-4.08	-4.29	-4.93	-4.27	-4.42	-3.66	-4.14
$R_C = \lg(CH_4/CO_2)$	-2.11	-2.27	-2.25	-0.71	-2.38	-0.84	-1.86	-0.84
t_c , °C	282	295	295	204	304	211	289	211
t_{HA} , °C	276	311	322	240			292	255

Примечание. Изотопный состав в промилле относительно V-SMOW для воды и V-PDB для углерода. Также показаны составы газов из работы [2] и составы газов из паровых струй геотермальных полей Мутновского и Большого Семячика (вулкан Бурлящий). Сокращения: ВК – Верхнее поле; НК – Нижнее поле; СМв – Северо-восточное поле. Кроме того, показаны величины отношений некоторых компонентов и рассчитанные значения газовых геотермометров (см. текст).

В таблице, кроме того, показаны индикаторные характеристики газов: логарифмы отношений H₂/H₂O и CH₄/CO₂ (R_H и R_C), отношения N₂/Ar, CH₄/C₂H₆, а также температуры, рассчитанные по известным газовым геотермометрам: t_c – равновесие CO₂ + 4H₂ = CH₄ + 2H₂O и t_{HA} – отношение H₂/Ar [7].

Основные различия во флюидах Нижних и Верхних выходов – это газосодержание, а также концентрации метана и аммиака. Флюиды Нижнего поля отличаются более низким содержанием газа: $X_g=2.5$ ммоль/моль против 14-20 ммоль/моль во флюидах Верхнего поля. Концентрация метана в газах Нижнего поля выше 15 %, а в газах Верхнего – ниже 1 %. Отличается и изотопный состав углерода: CO_2 и CH_4 Нижнего поля изотопно заметно легче, чем Верхнего. Сильно отличаются отношения N_2/Ar : от близких к отношению в водорастворенном воздухе в Нижних газах (42) до около 200 в Верхних. Низкие отношения метана к этану получены для Нижних газов (36) и высокие, около 170 – для Верхних. И, наконец, температуры, рассчитанные по геотермометрам, гораздо ниже для Нижнего поля (200-240 °С), чем для Верхнего (280-320 °С). Изотопный состав воды близок к составу локальных метеорных вод с заметным положительным кислородным изотопным сдвигом.

Можно также отметить, что составы Кошелевских газов, полученные в работе [2], очень близки к нашим данным, за исключением концентраций H_2S .

Обсуждение результатов и заключение

Составы воды из скважин и составы газов паровых струй Кошелевских полей обсуждались в 1970-80-е годы в работах А.И. Сержникова, Е.А. Вакина и М.В. Писаревой [2, 4, 5]. Вакин и др. [2] в основном подробно обсуждают гидрологические особенности термальных полей, а Писарева [4], на основании данных опробования продуктивных скважин Нижне-Кошелевского участка, построила модель паро-доминирующей системы с уровнем парообразования ниже 2 км от поверхности, с кипящим рассолом – производным метаморфизованной морской воды – как источником пара. Пар местами перегрет как следствие образования паровой зоны под Нижним полем с температурой около 240 °С. Сержников и др. [5] достаточно подробно описывают гидротермальные изменения пород, вскрытых скважинами, и приводят состав воды из некоторых скважин. Вакин и др. [2], сравнивая Нижнее и Верхнее поля, указывают на гораздо более значительную долю поверхностной грунтовой воды в геотермальном паре Нижнего поля.

В цитируемых работах не обсуждаются такие особенности состава газов, как высокие концентрации метана в газах Нижнего поля, отношения C_1/C_2 и N_2/Ar , а также причины существенного различия геохимических характеристик газов обоих полей.

Высокие концентрации метана в геотермальных газах связаны исключительно с наличием достаточно мощного комплекса осадочных пород в разрезе геотермальных систем. Примером может служить известная паро-доминирующая система Гейзеры в Калифорнии [8]. В случае Нижне-Кошелевского поля – это, скорее всего, эоцено-олигоценые осадочные толщи Охотского шельфа – источники газоконденсатных месторождений Западной Камчатки [3]. Типичный для месторождений природного газа изотопный состав углерода метана (-39 ‰) и низкое отношение CH_4/C_2H_6 подтверждают эту гипотезу. В то же время газы Верхнего поля имеют типичный «термогенный» изотопный состав углерода метана (-25 ‰), близкий к изотопному составу метана Мутновской системы и вообще к среднему изотопному составу метана высокотемпературных геотермальных систем [9]. Изотопный состав углерода CO_2 в Нижне-Кошелевских газах (-9.3 ‰) также сильно облегчен по сравнению с CO_2 Верхнего поля (-6.3 ‰). Облегченный состав соответствует вкладу «органического» CO_2 , в то время как CO_2 Верхнего поля имеет типичный «магматический» изотопный состав.

Таким образом, необходимо понять, по каким причинам два термопроявления одной геотермальной системы, несмотря на их сходство – мощные выходы перегретого пара, означающие непосредственную связь с паро-доминирующими резервуарами – значительно отличаются своими геохимическими характеристиками. Существует или

некий (тектонический?) барьер между резервуарами, питающими Верхнее и Нижнее термальные поля Кошелёвского массива, и (или) некая локальная особенность геологического разреза под Нижним полем, где гидротермальный флюид должен находиться в контакте с газогенерирующими осадочными породами. Для решения этой проблемы необходимы более детальные геохимические и геофизические исследования.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME 2025-0001 «Исследование современных гидротермальных систем и геотермальных месторождений с целью оценки их теплоэнергетического потенциала, геотехнологических и бальнеологических свойств термальных вод».

Список литературы

1. *Вакин Е.А.* Гидротермы вулканического массива Большой Семьяик // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 212-236.
2. *Вакин Е.А., Декусар З.Б., Серёжников А.И., Спиченкова М.В.* Гидротермы Кошелёвского вулканического массива // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток, 1976. С. 58-84.
3. *Кирюхина Т.А., Соловьёва А.А., Санникова И.А., Франчук А.А.* Геохимические предпосылки нефтегазоносности кайнозойских отложений западнокамчатского шельфа // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2017. № 3 (31). С. 151-161.
4. *Писарева М.В.* Зона природного пара Нижне-Кошелёвского гидротермального месторождения // Вулканология и Сейсмология. 1987. № 2. С. 52-63.
5. *Серёжников А.И., Спиченкова М.В.* Геология и подземные воды Кошелёвского вулканического массива (Камчатка) // ДАН СССР. 1978. Т. 240. № 3. С. 681-684.
6. *Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона // Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона. М.: Наука, 1982. С. 93-107.
7. *Giggenbach W.F.* Chemical techniques in geothermal exploration // UNITAR/UNDP Handbook on application of Geochemistry in geothermal reservoirs development. 1991. P. 119-144.
8. *Lowenstern J.D., Janik C.J.* The origin of reservoir liquids and vapors from The Geysers Geothermal Field, California // Society of Economic Geologists. INC. Sp. Publ. 10. 2003. P. 181-196.
9. *Zelenski M., Taran Y.* Geochemistry of volcanic and hydrothermal gases of Mutnovsky volcano, Kamchatka: evidence for mantle, slab and atmosphere contribution to fluids of a typical arc volcano // Bulletin of Volcanology. 2011. V. 73. P. 373-394.