

ВЫНОС МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ФУМАРОЛАМИ АВАЧИНСКОГО ВУЛКАНА (КАМЧАТКА)

© 2024 Н.А. Малик¹, Е.Ю. Плутахина¹, И.Ю. Николаева²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: maliknataliya@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 06.06.2024; после доработки 12.09.2024; принята в печать 25.09.2024

Исследован микроэлементный состав высокотемпературных газов Авачинского вулкана. Для этого были проанализированы 25 проб конденсатов газа и сублиматы, осевшие в четырех кварцевых трубках. Суммарная средняя концентрация микроэлементов (не считая S, Cl, F, Si) в конденсатах 87 мг/л, максимальная 210 мг/л, среди которых преобладают В, К, Na, Br, As. Большое количество проб, отобранных в течение 2013–2023 гг., позволило оценить пределы вариаций концентраций элементов, их зависимость от температуры фумарол и сезона отбора. Факторы обогащения, нормированные на магний, позволили определить элементы, для которых характерен перенос в шлейфе в виде летучих соединений (Te, I, В, Br, Cd, As, Re, Se, Bi, Tl, Hg, Sn, Sb, Pb и др.) и в виде силикатного аэрозоля (Ti, Fe, Ga, Al, Ca, Mn, РЗЭ и др.). По концентрации рудных элементов в газах Авачинский вулкан сравним с Мутновским (Камчатка) и существенно уступает таким вулканам в стадии стационарной дегазации, как Кудрявый и Пик Палласа (Курильские о-ва), что может объясняться более высокими концентрациями HCl в газах последних.

Ключевые слова: Авачинский вулкан, вулканический газ, сублиматы, вынос микроэлементов вулканами.

ВВЕДЕНИЕ

Вулканические газы — это растворенные в магме летучие, отделившиеся от нее в результате дегазации и достигшие поверхности. Они состоят из воды (>90% для вулканов зоны субдукции), CO₂, SO₂, H₂S, HCl и HF («кислые» компоненты), а также в меньших количествах содержат неконденсирующиеся газы: H₂, N₂, He, CO, CH₄, Ar, Ne, и различные летучие соединения микроэлементов. Если для определения основных компонентов в настоящее время развиваются дистанционные методы (Carn, 2015), то основным методом изучения микроэлементов фумарольных эмиссий остается отбор и анализ конденсата фумарольного газа. Несмотря на то, что большинство элементов имеет крайне низкие концентрации (мг/л–мкг/л в конденсате газа), общий вынос микроэлементов с вулканическими газами значителен и влияет на их распределение на планете. Это особенно заметно для некоторых редких летучих элементов (As, Se, Te, Re, Cd, Tl, Bi),

демонстрирующих заметное обогащение в вулканических газах (Zelenski et al., 2021).

Геологический эффект газовых эмиссий вулканов обычно сводится к образованию фумарольных инкрустаций и рассеиванию элементов в виде аэрозолей в окружающей среде. Поэтому при исследовании форм и количеств выноса микроэлементов фумаролами кроме отбора и анализа конденсата газа применяют также следующие методы: изучение естественных инкрустаций (1), сублиматов, отложившихся в установленных в выходы фумарол кварцевых трубках (2), и аэрозолей, осажденных на фильтры из фумарольного шлейфа (3) (Зеленский, 2003; Zelenski et al., 2013).

Вынос микроэлементов вулканическими газами определяется концентрацией главных компонентов (HCl, HF, SO₂, H₂S), фугитивностью кислорода, а также составом магмы или раскаленных, дегазирующих пород (Zelenski et al., 2013). Поэтому для понимания особенностей микрокомпонентного состава вулканических

газов необходим комплексный подход, включающий как знание их макрокомпонентного состава, так и состава изверженных пород данного вулкана.

Исследования микроэлементов в вулканических газах вносят вклад в оценки глобального выноса вещества и изучение их круговорота, природного загрязнения атмосферы, а также в уточнение вопросов теории рудообразования (формы переноса и концентрирования вещества, источники рудообразующих флюидов и др.). Экспериментально подтверждено, что вулканические газы являются примером возможных рудообразующих флюидов, так как разогретый водяной пар может быть эффективным агентом переноса рудных компонентов (Williams-Jones, Heinrich, 2005).

Несмотря на многочисленные публикации в мировой науке на тему вулканических газов, исследований микроэлементного состава высокотемпературных ($\geq 450^\circ\text{C}$) фумарол, выполненных методом непосредственного отбора газа и проанализированных на современном уровне не так много. Одна из причин — это то, что доступные для отбора высокотемпературные фумаролы — нечастое явление. Именно высокотемпературные газы — наиболее информативны, как наименее измененные и содержащие существенную долю летучих компонентов, отделяющихся непосредственно от магмы или остывающего интрузивного тела.

Эмиссия металлов вулканическими газами изучается уже более ста лет, с тех пор как Дж. Шипли собрал конденсаты и фумарольные инкрустации в Долине десяти тысяч дымов в 1917 г. (Shipley, 1920). Ранние исследования вулканических газов и связанных с ними фумарольных отложений, проведенные до 1959 г., были рассмотрены в (White, Waring, 1963). Позже в ряде работ были описаны составы микроэлементов фумарольных конденсатов, собранных по всему миру (Birnie, Hall, 1974; Gemmell, 1987), в т.ч. на Камчатке в районе вулкана Толбачик во время Большого трещинного извержения (БТТИ) 1975–76 гг. (Меняйлов и др., 1980) и на вулкане Эбеко (о. Парамушир) для низкотемпературных фумарол (Никитина и др., 1989). Последующий период в изучении газообразного переноса микроэлементов начался с разработки новых методов сбора вулканических сублиматов с помощью кварцевых трубок (Le Guern, Bernard, 1982) и термодинамического моделирования газообразного переноса и осаждения элементов (Quisefit et al., 1989; Symonds et al., 1987; Taran et al., 2001; Wahrenberger et al., 2002). Помимо отбора конденсатов, что может быть опасно или даже невозможно на активных вулканах с дегазацией через открытый кратер, выбросы микроэлементов

в атмосферу широко изучаются с помощью фильтров (Aiuppa et al., 2003; Mandon et al., 2019; Moune et al., 2010), в то время как работ по непосредственному отбору газов в последнее время становится все меньше.

На Камчатке комплекс работ по изучению фумарольных минералов и вулканических газов, включая микроэлементы, был проведен в 1975–1976 гг. на БТТИ (Меняйлов и др., 1980). Детальное изучение эмиссии микроэлементов эруптивными газами, но на современном аналитическом уровне, было проведено в этом же районе во время Трещинного Толбачинского извержения (ТТИ-50) 2012–2013 гг. (Zelenski et al., 2014). На вулкане Горелый во время газового извержения 2010–2013 гг. были отобраны и проанализированы пробы конденсата газа с температурой $\sim 900^\circ\text{C}$ (Чаплыгин и др., 2015). Единственный вулкан на Камчатке, на котором для изучения транспорта элементов фумарольными газами, помимо непосредственного отбора газа, конденсата и возгонов, был применен метод кварцевых трубок — вулкан Мутновский (Зеленский, 2003; Zelenski, Bortnikova, 2005).

На Курильских о-вах всесторонние исследования микроэлементов в газах, инкрустациях, сублиматах в кварцевых трубках были проведены рядом авторов (Taran et al., 1995; Wahrenberger et al., 2002; Yudovskaya et al., 2008) на вулкане Кудрявый (о. Итуруп). Для высокотемпературных фумарол вулкана Пик Палласа (о. Кетой) опубликован микрокомпонентный состав конденсатов (Taran et al., 2018).

Несмотря на близость Авачинского вулкана к городам Петропавловск-Камчатскому и Елизово (23–30 км) и наличие доступных высокотемпературных фумарол, публикации о детальном геохимическом исследовании выноса микроэлементов его фумаролами отсутствуют. С 1930-х до начала 2000-х гг. результаты изучения состава газов и минералов эксгаляций представлены в ряде работ (Кирсанов и др., 1964; Серафимова, 1979; Серафимова и др., 2002; Taran et al., 1997). С 2013 г. нами начаты регулярные наземные исследования на фумаролах Авачинского вулкана, которые включают измерение температур, отбор проб газа, газового конденсата, естественных инкрустаций и сублиматов в кварцевых трубках. Опробования фумарол вулкана в течение 11 лет по 4–5 раз в год позволили определить макрокомпонентный и изотопный состав высоко- и низкотемпературных газов и выявить сезонные вариации и тенденции изменения температуры, состава газа, включая изотопный состав воды конденсата, режимной высокотемпературной фумаролы (Малик и др., 2017; Малик, Некрасова, 2020). Опубликованы первые результаты изучения фумарольных минералов

и сублиматов (Округин и др., 2016а, 2016б; Плу- тахина, Малик, 2015, 2023). Одним из результатов исследования возгонов высокотемпературных полей стало открытие нового минерала, наталиямаликита, состава ТП (Okrugin et al., 2017).

В настоящей работе представлены результаты исследования микрокомпонентного состава газа высокотемпературных fumarol, выполненного методами отбора и анализа 25 проб конденсата газа и сублиматов в кварцевых трубках. Длительный ряд наблюдений, в течение 11 лет: 2013–2023 гг., позволяет сделать выводы о вариациях содержания микрокомпонентов в газе и предположить причины этих вариаций. На основе опубликованных данных о мощности fumarol и расходе SO_2 сделаны оценки выноса микроэлементов fumarолами Авачинского вулкана. Сравнение с составами конденсатов других вулканов позволило выявить особенности микроэлементного состава газа Авачинского вулкана.

АВАЧИНСКИЙ ВУЛКАН И ЕГО ФУМАРОЛЬНЫЕ ПОЛЯ

Авачинский вулкан расположен в Восточном (фронтальном) вулканическом поясе Камчатки (рис. 1). Вместе с активным вулканом Корякским и потухшими вулканами Ааг, Арик и Козельский

он формирует Авачинско-Корякскую группу вулканов, вытянутую вкост Восточному поясу вдоль системы северо-западных разломов (Логинов и др., 2023). Согласно комплексной геолого-геофизической модели земной коры под Авачинским вулканом, созданной по результатам гравиметрических, сейсмических и электромагнитных исследований, выявлены: коровый магматический очаг на глубине ~15–25 км н.у.м., перекрывающая его интрузия и периферический очаг на глубине ~1–3 км н.у.м., а также зона в юго-западном секторе в Авачинском грабене, насыщенная жидкими флюидами (Логинов и др., 2023).

Авачинский (2751 м) — Вулкан типа Сомма-Везувий среднеплейстоценового возраста: в сомме диаметром 4 км, сформировавшейся около 30 тыс. л.н., расположен голоценовый (3800 л.н.) стратоконус высотой около 500–700 м (Мелекесцев и др., 1993). Породы вулкана представлены составами от базальтов до андезитов. Породы Молодого конуса — андезибазальты, последнего извержения 1991 г. — двупироксеновые андезибазальты с содержанием SiO_2 55–57% (Иванов и др., 1995; Vissaro et al., 2012).

Авачинский вулкан расположен в непосредственной близости к наиболее населенной территории Камчатки: Петропавловск-Елизовской агломерации (23–30 км) (рис. 1). В историческое



Рис. 1. Авачинский вулкан, вид из г. Петропавловск-Камчатский, 2014 г. Фото Н.А. Малик. На врезке показано расположения вулкана (треугольник) и ближайших городов (кружки): 1 — Елизово и 2 — Петропавловск-Камчатский.

Fig. 1. Avachinsky volcano, view from Petropavlovsk-Kamchatsky, 2014. Photo by N.A. Malik. The inset shows Avachinsky volcano (triangle) and the nearest cities (circles): 1 — Yelizovo, 2 — Petropavlovsk-Kamchatsky.

время отмечено 14 его извержений, последнее из которых произошло в 1991 году (Мелекесцев и др., 1993). В период между извержениями для вулкана характерна умеренная до мощной фумарольная активность. В результате последнего эффузивно-эксплозивного извержения 1991 г. лава заполнила кратер вулкана, образовав «пробку». В октябре 2001 г. в результате слабой эксплозивной активизации лавовую «пробку» и прилегающие склоны конуса рассклала трещина северо-западного простирания. К ее концам приурочены две группы высокотемпературных газовых выходов — Западное и Восточное фумарольное поле (рис. 2). Низкотемпературные ($\leq 100^\circ\text{C}$) выходы газов и термальные площадки расположены по периферии кратера, в т.ч. на внешних склонах конуса, на участках контакта лавы 1991 г. с его стенками, по трещинам в древнем лавовом потоке на юго-западном склоне.

Максимальные температуры газа измерены нами на **Западном фумарольном поле** — 839°C в 2016–2017 гг., 760°C — в 2023 г. Но отбирать пробы газа, конденсата газа и устанавливать кварцевые трубки для сбора сублиматов здесь пока невозможно, т.к. до 2015 г. истечение газа происходило из глубокой трещины в виде мощной струи с характерным аэродинамическим

шумом, а после обвалов стенок трещины, предположительно, в декабре 2014 г., — газ просачивается из-под шлака и камней, т.е. отсутствуют сформированные устья фумарол. Кроме того, начиная с 2015 г. здесь происходят непрерывные деформации склона конуса: проседания, оползания, осыпания гидротермально измененных пород (Малик, Некрасова, 2020). На этом поле нами производился только отбор фумарольных инкрустаций и низкотемпературных ($\leq 93^\circ\text{C}$) газов.

Восточное фумарольное поле размером около 30×60 м вытянуто вдоль трещины, к северу от нее, в юго-восточной части лавовой пробки (рис. 2) и состоит из многочисленных газовых выходов с максимальной температурой 665°C в 2013 г. Измерения температуры, отбор газа и газового конденсата проводились 2–4 раза в год из выбранной для мониторинга фумаролы (№ 1) на северном краю поля (рис. 2, 3 а, б). В 2013 г. ее температура составляла 630°C , в 2023 — 410°C , тенденция к понижению отмечается начиная с 2017 г. Сублиматы из трех кварцевых трубок (№ 12, 14, 15), установленных в эту фумаролу, были изучены на предмет их микрокомпонентного состава. Максимальная температура (665°C в 2013 г.) на этом поле была измерена в его южной части в фумароле (№ 2) с высокотемпературной частью размером ~ 1.5 м, определяемой по черному цвету обломков породы (рис. 2, 3 в, д). Температура этой фумаролы также снизилась за период наблюдений и в 2023 г. составила 510°C . Из-за более сложного доступа к ней, высокой температуры и загазованности отобрать пробы газа и конденсата из нее удалось только летом 2023 г. На предмет микроэлементного состава сублиматов из этой фумаролы была изучена одна трубка (№ 16).

В северо-западной части гребня кратера расположено низкотемпературное ($\leq 100^\circ\text{C}$) фумарольное поле, выделяющееся по площади отложений самородной серы. Из его фумарол несколько раз производился отбор газа и его конденсата (табл. 1).

Содержание в высокотемпературных фумарольных газах Авачинского вулкана главных компонентов (H_2O , $S_t = \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{S}$, CO_2 , HCl , HF), соотношения этих компонентов, а также изотопный состав серы близки к средним значениям для высокотемпературных газов вулканов зон субдукции (Fischer, 2008; Taran, Zelenski, 2014), за исключением более низких концентраций HCl , а также отношений CO_2/S_t (табл. 1), что характерно и для других вулканов Курило-Камчатской и Японской островных дуг (Малик и др., 2017). Относительно низкое содержание HCl также отмечено в высокотемпературных газах Мутновского вулкана (Зеленский и др., 2012).

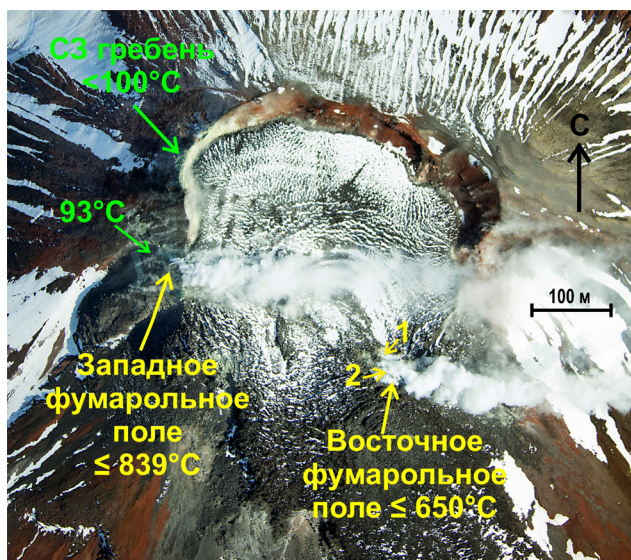


Рис. 2. Кратер Авачинского вулкана, 30.08.2019 г. Фото А.В. Шевченко. Желтыми стрелками отмечены высокотемпературные фумарольные поля с их максимально измеренной температурой за 2013–2023 гг., зелеными — места отбора низкотемпературных газов. 1, 2 — режимные фумаролы № 1 и 2.

Fig. 2. Crater of Avachinsky volcano, 30.08.2019. Photo by A.V. Shevchenko. Yellow arrows mark high-temperature fumarolic fields with their maximum measured temperature in 2013–2023, green arrows mark the sites of low-temperature gas sampling. 1, 2 — monitored fumaroles № 1 and 2.



Рис. 3. Режимная фумарола № 1 Восточного поля: отбор пробы конденсата газа (а); трубка с отложившимися в ней сублиматами (б); режимная фумарола № 2 Восточного поля: вид фумаролы с трубкой для сбора сублиматов (в), отбор проб конденсата газа (г). Фото Н.А. Малик, А.И. Задверняка.

Fig. 3. Monitored fumarole № 1 of the Eastern field: gas condensate sampling (а); tube with deposited sublimates (б); monitored fumarole № 2 of the Eastern field: view of the fumarole with a tube for collecting sublimates (в), gas condensate sampling (г). Photo by N.A. Malik, A.I. Zadvernyak.

Таблица 1. Химический состав фумарольных газов Авачинского вулкана, ммоль/моль

Table 1. Chemical composition of Avachinsky volcano fumarolic gases, mmol/mol

№	Дата	T, °C	H ₂ O	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	HCl	HF	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	Ar
ВП1	2013–2023	630–410	967	16.9	2.61	10.3	1.71	0.16	0.037	0.0076	1.73	0.31	0.0031
СЗГ	2015–2020	≤100	978	17.2	1.83	2.99	0.045	0.0059	7.2·10 ⁻⁴	0.094	0.16	0.35	0.0011

Примечание. н.п.о. — ниже порога определения, ВП1 — фумарола № 1 Восточного поля, средний состав газа из 28 отборов проб за 2013–2023 гг., СЗГ — низкотемпературное фумарольное поле на северо-западном гребне кратера, средний состав газа из трех отборов проб в 2015–2016 и 2020 гг.; содержание N₂ и Ar скорректировано с учетом загрязнения воздухом, содержание He в большинстве проб было н.п.о., в четырех пробах составило (5–8)×10⁻⁵ ммоль/моль.

Note. н.п.о. — below the detection limit, ВП1 — fumarole № 1 of the Eastern field, average gas composition from 28 sampling events during 2013–2023, СЗГ — low-temperature fumarolic field on the northwestern ridge of the crater, average gas composition from the three sampling events in 2015–2016 and 2020; N₂ and Ar contents are corrected for contamination by air pollution, Ne content in most samples was below the detection limit, in 4 samples was (5–8)×10⁻⁵ mmol/mol.

Изотопный состав воды (δD - $\delta^{18}O$) конденсата газа фумарол, отобранного в холодный период года, попадает в область магматических вод зоны субдукции, т.е. примесь метеорного компонента отсутствует или минимальна; в летний период наблюдается увеличение доли метеорной воды до 30–50% (Малик, Некрасова, 2020). Сезонные вариации отмечены и для некоторых основных компонентов газа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор и анализ конденсата газа. Температура фумаролы измерялась ХА термопарой. Для отбора проб конденсата в выход фумаролы помещали трубку из кварцевого стекла диаметром ~20 мм длиной 1–1.5 м. В нее вставляли более тонкую кварцевую трубку диаметром 7–8 мм, которая соединялась при помощи шланга из силиконовой резины с тремя последовательно соединенными пустыми барботерами из боросиликатного стекла, через которые с помощью электрического насоса прокачивали газ со скоростью 1 л/мин (рис. 3а). Барботеры охлаждались снежно-водяной смесью. Отсутствие содержимого в третьем барботере говорило о полноте конденсации. Содержимое всех барботеров объединялось.

Как правило, конденсаты представляли собой мутную жидкость желтоватого цвета из-за примеси коллоидной серы.

Содержание микроэлементов в пробах конденсата, отобранных в 2013–2017 гг., было определено методами ICP-MS и -AES в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (ИПТМ) РАН, в пробах 2017–2019 гг. — в Аналитическом сертификационном испытательном центре Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (АСИЦ ВИМС). Пробы конденсата, отобранного в 2020–2023 гг., были проанализированы на Геологическом факультете Московского государственного университета (МГУ) им. Ломоносова с использованием оборудования для высокочувствительного элементного анализа состава природных объектов (масс-спектрометр Superc 7000 приобретенного по Программе развития МГУ) и -OES (Agilent 7500 CE).

При анализе в ИПТМ РАН для удаления серы конденсат кипятили с царской водкой, при этом сера коагулировала. Отдельно проводили анализ жидкости и коагулировавшей серы, а полученные концентрации суммировали с соответствующими весовыми коэффициентами (Зеленский, 2003). По методике, применяемой в МГУ, из пробирки отбиралась аликвота жидкой фазы, разбавлялась 3% HNO_3 в 10 раз, вводили индий или рений в качестве внутреннего стандарта.

Полученный раствор анализировали. Затем конденсат из пробирки аккуратно сливался, сера на стенках окислялась концентрированной HNO_3 на водяной бане. После полного окисления серы добавлялась деионизированная вода, и этот раствор анализировался аналогично конденсатам. Результаты складывались с учетом разбавления. При анализе использовались стандарты ВНВО-2, CRM-TMDW.

В конденсате также анализировали содержание HCl и HF в Аналитическом центре (АЦ) Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН методами классического химического анализа. Полученные концентрации сверялись с концентрациями этих компонентов, полученными методом отбора газа в вакуумированные ампулы, частично заполненные щелочным поглотителем. Также в конденсате определяли изотопный состав H (δD) и O ($\delta^{18}O$) воды (Малик и др., 2017; Малик, Некрасова, 2020).

Содержания I- в конденсате после предварительной обработки было измерено ионоселективным электродом в АЦ ИВиС ДВО РАН. Однако высокие концентрации в пробах ряда компонентов приводят к искажению сигнала, и полученные результаты характеризуются большими неточностями ($\pm 60\%$). Тем не менее, полученные концентрации йода в 5 пробах конденсата высокотемпературных газов Авачинского вулкана — 1.5–3.7 мг/л (в среднем 2.5 ± 1.5 мг/л) вполне согласуются с данными по вулканам Мутновский 1–2 мг/л (Zelenski, Bortnikova, 2005), Горелый 0.33 мг/л (Чаплыгин и др., 2015) на Камчатке и Кудрявый 0.5–12 мг/л на Курильских островах (Taran et al., 1995; Wahrenberger et al., 2002). В одной пробе конденсата была получена концентрация йода 50 мг/л методом ICP-MS. Проблема значительных вариаций аналитических концентраций йода требует дальнейших исследований, т.к. присутствие значительного количества часто встречающихся минералов йода в сублиматах Авачинского вулкана (по нашим данным) не исключают его высоких концентраций.

Неопределенности, связанные с отбором и анализом конденсатов фумарольного газа. Методы отбора конденсата газа и связанные с ними неопределенности освещены в работах (Zelenski et al., 2013, 2014, 2021). Одна из проблем — присутствие в конденсатах частиц коллоидной серы, сорбирующей на себе некоторые компоненты и усложняющей анализ. Для предотвращения образования коллоидной серы был проведен отбор конденсата в азотную кислоту, что также решает проблему потери аэрозольных частиц на начальных стадиях отбора в пустой барботер (Никитина и др., 1989). Азотная кислота была также отдельно проанализирована методом ICP-MS. Результаты анализа конденсата,

отобранного в азотную кислоту, пересчитаны с учетом объема кислоты, ее химического состава и прибавки конденсата. Учитывались только элементы, концентрация которых в конденсате, отобранном в азотную кислоту, отличалась от фоновой концентрации в чистой азотной кислоте более чем в два раза.

Отбор конденсата производится в барботеры из боросиликатного стекла. Поскольку конденсат высокотемпературных газов содержит плавиковую кислоту 0.1–0.3 г/л, из стекла в раствор могут переходить Si и B, увеличивая их содержание. Оценить такое увеличение бора возможно, используя барботеры из кварцевого стекла.

Другая проблема — осаждение части веществ из газа на стенках трубок и шлангов пробоотборной системы. Эта проблема частично учитывается изучением состава сублиматов из кварцевых трубок.

С потоком газа в конденсат могут попадать частицы породы со стенок трещин, таким образом, существенно увеличивая концентрации петрогенных элементов в конденсате. Чтобы разделить вклад летучей и аэрозольной фракции в общее содержание элементов в вулканическом газе, вычисляют фактор обогащения (EF), для чего необходимо знать состав породы, с набором элементов таким же, как и для конденсатов газа (Zelenski et al., 2013, 2014; Zoller, 1974).

Отбор и анализ сублиматов и пород. Образцы лавы 1991 г. Авачинского вулкана были проанализированы для определения микрокомпонентного состава методами ICP-MS и -OES на Геологическом факультете МГУ и методами ICP-MS и XRF в Университете Хоккайдо и Геологическом институте РАН (Element 2). Общее количество определенных элементов составило 58. Также использовались данные (38 элементов) по составу лавы 1991 г. из работы (Vissaro et al., 2012). Концентрации элементов в породе (Cl, F, I, Bi, Hg, Au, Se, Te, Re, Pd, Br), которые не удалось измерить этими методами, были взяты из работ для вулканов с близким составом пород Курило-Камчатской дуги (Taran et al., 1995, 2018; Yudovskaya et al., 2008).

Для осаждения сублиматов трубку из кварцевого стекла длиной 1.5 м и внутренним диаметром 1.7–2 см помещали в устье фумарол № 1 и 2 на период времени от двух недель до 14 месяцев (рис. 3 б, в). В лаборатории для определения химического состава сублиматов трубку делили на интервалы по 10 см, сублиматы отделяли от стекла трубки и взвешивали. При недостаточном для анализа количестве сублиматов с одного интервала, сублиматы с двух и более интервалов объединялись. Химический состав сублиматов анализировался методами ICP-MS, -AES и XRF в ИПТМ РАН и АСИЦ ВИМС, а также методами

ICP-MS и -OES на Геологическом факультете МГУ. Были проанализированы сублиматы трех трубок из фумаролы № 1 и одной трубки из фумаролы № 2.

Образцы сублиматов из трубок также изучались методами XRF и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в ИВиС ДВО РАН.

Сублиматы и порода переводились в раствор стандартным мультикислотным методом (Бычкова и др., 2016). В тefлоновые бюксы помещалась навеска, добавлялась смесь $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{HCl}$. Бюксы прогревались под лампой трое суток, затем упаривались до сухих солей, при этом частично терялись Si, Ge и B, образующие летучие фториды, а также Re и Se, но потери последних невелики. Затем проводилось трехкратное выпаривание с концентрированной HCl. Сухой остаток переводился в 3% HNO_3 и готовился к измерениям, как и жидкие пробы. Использовался стандарт ВНВО-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микрокомпонентный состав газа. Было получено 26 анализов состава 25-и отобранных в 2013–2023 гг. проб конденсатов высокотемпературных газов Авачинского вулкана методами ICP-MS, -AES и -OES (71 элемент), потенциометрии (F⁻, I⁻) и титрометрии (Cl⁻). Всего было определено 72 элемента, рутений и осмий были ниже предела обнаружения во всех пробах, бериллий, иридий, родий и палладий были определены только в одной пробе (табл. 2). Для каждого элемента были рассчитаны средние значения и диапазон вариаций концентраций, стандартное отклонение, в т.ч. в % от среднего (рис. 4, табл. 2). Аномально низкие или высокие значения (более чем в 5 раз отличающиеся от ближайшего по величине значения) отбраковывались. Наибольшие концентрации в порядке убывания отмечены для S (8 г/л), Cl (3.2 г/л), F (0.17 г/л), Si (87 мг/л), B (55 мг/л). Высокие концентрации Si и B частично могут объясняться выщелачиванием кислыми растворами из боросиликатного стекла барботеров, что уже предполагалось и другими авторами (Zelenski et al., 2014). Суммарная концентрация остальных металлов и металлоидов в среднем составляет 32 мг/л, в т.ч. 7.5 мг/л K, 6.4 мг/л Na, 4.9 мг/л Br, 3.2 мг/л As (табл. 2).

Опыт с отбором конденсата в азотную кислоту показал, что в этом случае заметно повышены концентрации K, Na, Se, Sn, Sb, Rb, Bi, In, а концентрации выше средних отмечены для S, Fe, As, Pb, Cd, Te, Hg, Mo. Т.о. конденсаты, отобранные в азотную кислоту, обогащены в основном халькофильными элементами и щелочными металлами. Конденсаты в HNO_3 были обеднены бромом (в 2.5 раза), что вероятно отражает

ВЫНОС МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ФУМАРОЛАМИ

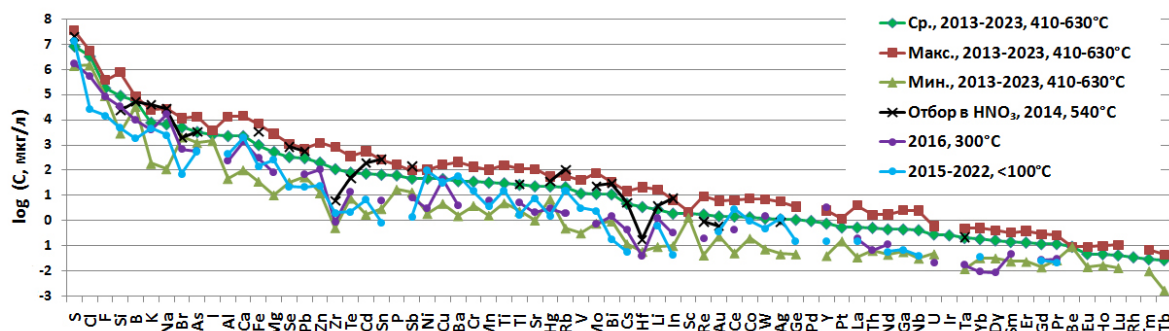


Рис. 4. Концентрации элементов в конденсате газа режимной фумаролы Восточного поля: средняя, максимальная и минимальная концентрации за 2013–2023 гг. при отборе в пустые барботеры и при отборе в азотную кислоту. Приведены составы конденсатов 300°C фумаролы и среднее из четырех анализов для низкотемпературных (<100°C) фумарол.

Fig. 4. Concentrations of elements in the gas condensate of the Eastern Field monitored fumarole: average, maximum, and minimum concentrations for 2013–2023 when sampling into empty bubblers and when sampling into nitric acid. The compositions of condensates of the 300°C fumarole and the average of four analyses for low-temperature (<100°C) fumaroles are given.

окисление HBr до Br_2 и последующее выделение летучего брома, а также Zr и Hf (в 25–30 раз), что также было отмечено в подобном эксперименте для газов вулкана Эрта-Але, Эфиопия (Zelenski et al., 2013).

Состав конденсатов низкотемпературных (<100°C) газов был изучен в результате опробования фумарол на северо-западном гребне кратера весной 2015 и 2016 гг. и нижней части Западного фумарольного поля в 2022 г. (рис. 2, 4). Низкотемпературные газы существенно обеднены HF и HCl (табл. 1). Из трех анализов для фумарол западного гребня только 26 элементов были определены хотя бы один раз, для Западной фумаролы — 45 элементов, остальные оказались ниже предела обнаружения. Концентрации почти всех элементов оказались в среднем в ~20 раз (до 300) ниже средних концентраций, определенных для высокотемпературной фумаролы № 1. Наибольшее снижение (>15 раз) концентраций по сравнению с высокотемпературными фумаролами отмечено для летучих элементов (B , Pb , Hg , Tl , Bi , Br , Se , Te , In , Sn , Sb), а также Cs , Zr , Si . Концентрации труднолетучих элементов, поступающих в конденсат в основном с силикатным аэрозолем (см. п. Коэффициент обогащения для элементов в газах), снижены меньше, в ~5 раз. Концентрация кремния в конденсатах низкотемпературных фумарол (3.1–5.5 мг/л) в 15–30 раз ниже, чем в высокотемпературных, что вероятно, является следствием более низких (в 10–30 раз) концентраций HF , который выщелачивает SiO_2 из стекла барботеров, а также способствует переносу Si в виде SiF_4 . Также была отобрана одна проба конденсата газа из среднетемпературной (300 °C) фумаролы Восточного поля. Концентрации большинства элементов в нем находятся между значениями для высокотемпературных и низкотемпературных фумарол (рис. 4).

Коэффициент обогащения для элементов в газах. Для определения элементов, попадающих в конденсат с частицами породы (силикатного аэрозоля), было проведено сопоставление состава конденсатов и лавы извержения 1991 г. (рис. 5). Наиболее летучие элементы хорошо выделяются по пикам на линии для конденсата. Линия, показывающая гипотетические концентрации элементов в конденсате, полученные растворением 40 мг породы, наглядно обозначает элементы, поступающие с силикатным аэрозолем.

Для разделения вклада летучей и аэрозольной (силикатной) фракции в общую сумму элементов в вулканическом газе в мировой практике используется коэффициент обогащения (EF) (Zoller et al., 1974):

$$EF = (C_i / C_{г})_{газ} / (C_i / C_{г})_{порода},$$

где C_i и $C_{г}$ — концентрации элемента i и эталонного в газе и породе. Предполагается, что состав аэрозолей совпадает с составом лавы. В качестве эталонного был взят малолетучий и распространенный элемент Mg (рис. 6). Предполагается, что элементы, характеризующиеся высоким EF, переносятся в газе в виде летучих соединений, а элементы с малыми значениями EF попадают в пробы конденсата с частицами породы (силикатного аэрозоля). Более наглядно демонстрирует вклад силикатного аэрозоля величина «массовая фракция аэрозоля» ($WAF = 1/EF * 100\%$, Aiuppa et al., 2003). Наименьшее значение WAF ($\leq 0.1\%$) отмечено для 20 наиболее летучих элементов: S , Cl , Te , I , B , Br , Cd , As , F , Re , Se , Bi , Tl , Hg , Sn , Sb , Pb , Ag , Au , In . Четыре элемента (Ti , Fe , Ga , Al) характеризуются $WAF > 100\%$.

В целом, факторы обогащения для элементов в конденсатах Авачинского вулкана сходны с соответствующими значениями для высокотемпературных газов других вулканов, например,

Таблица 2. Средние концентрации элементов в конденсатах газа (410–630°C) Авачинского вулкана за период с 2013 по 2023 гг., массовая доля силикатного аэрозоля (WAF) и оценка выноса элементов.**Table 2.** Mean concentrations of elements in the Avachinsky volcano gas condensates (410–630°C) for the period 2013–2023, weight fraction of silicate aerosol (WAF) and estimate of elements emission.

Эл-т	мкг/л	N	SD, %	WAF, %	Вынос, г/д	Эл-т	мкг/л	N	SD, %	WAF, %	Вынос, г/д
S	21.8·10 ⁶	24	123	0.0001	1.2·10 ⁸	Cs	4.53	22	89	0.24	100 *
Cl	3.19·10 ⁶	24	36	0.0003	1.7·10 ⁷	Hf	3.34	21	182	1.7	18
F	174467	24	45	0.005	9.4·10 ⁵	Li	2.7	23	152	9.5	44 *
Si	87291	23	185	7.8	4.7·10 ⁵	In	1.82	14	111	0.22	81 *
B	55192	24	30	0.001	3.0·10 ⁵	Sc	1.78	2	38	39	10
K	7481	14	109	1.9	4.0·10 ⁴	Re	1.7	19	130	0.005	65 *
Na	6429	23	117	10	2.2·10 ⁵ *	Au	1.42	6	160	0.09	8
Br	4898	23	52	0.002	2.6·10 ⁴	Ce	1.42	20	102	22	8
As	3209	25	81	0.005	1.7·10 ⁴	Co	1.31	10	170	43	7
I	2500	5		0.0005	1.4·10 ⁴	W	1.17	21	148	3.2	8 *
Al	2193	24	143	112	11850	Ag	1.1	9	175	0.084	6
Ca	2180	21	155	70	11770	Ge	1.04	18	75	0.78	12 *
Fe	972	23	166	149	5250	Pd	0.94	1		0.055	5
Mg	518	21	151	100	2800	Y	0.735	16	109	70	4
Se	324	22	86	0.007	3340 *	Pt	0.519	4	91		2.8
Pb	292	24	70	0.06	4720 *	La	0.511	18	179	24	2.8
Zn	195	24	144	0.89	1050	Th	0.498	13	102	3.6	2.7
Zr	106	25	220	2	580	Nd	0.437	16	109	54	2.4
Te	77.6	25	116	0.0003	4860 *	Ga	0.431	11	179	114	2.3
Cd	71.1	24	167	0.004	380	Nb	0.403	18	175	7.4	2.2
Sn	64.4	25	112	0.022	350	U	0.273	9	82	3.2	1.5
P	60	8	80	23	330	Ir	0.252	1			1.4
Sb	45.5	25	51	0.028	250	Ta	0.197	11	95	1.1	1.1
Ni	45.2	15	67	1.2	240	Yb	0.178	10	96	30	1
Cu	43.5	22	83	3.1	360 *	Dy	0.159	12	78	56	0.9
Ba	35.9	24	158	18.7	195	Sm	0.137	11	76	50	0.74
Cr	34.3	15	130	2.1	185	Er	0.13	12	86	43	0.7
Mn	31.1	22	103	97	240 *	Gd	0.113	14	83	70	0.61
Ti	29.4	17	136	201	160	Pr	0.113	12	72	43	0.61
Tl	25.6	25	90	0.007	140	Be	0.089	1		15	0.48
Sr	22.3	16	137	41	120	Eu	0.046	7	64	52	0.25
Hg	22.1	9	69	0.01	120	Ho	0.045	7	61	42	0.24
Rb	20.7	15	99	1.2	112	Lu	0.04	8	86	21	0.22
V	11.5	17	81	56	62	Rh	0.034	1			0.18
Mo	11.1	25	158	0.23	760 *	Tm	0.028	7	74	29	0.15
Bi	10.6	23	77	0.007	220 *	Tb	0.026	7	62	53	0.14

Примечание. Вынос элементов рассчитан для валовой эмиссии водяного пара 5400 т/день. Концентрация серы пересчитана по данным табл. 1 (SO₂+H₂S), т.к. в конденсате содержится не вся сера из газа. * — При пересчете выноса для элементов Na, Se, Pb, Te, Cu, Mn, Mo, Bi, Cs, Li, In, Re, W, Ge использовались их скорректированные с учетом осаждения в трубках концентрации. N — количество результатов для каждого элемента, SD — стандартное отклонение в % от среднего.

Note. Element emission is calculated for total steam emission of 5400 t/day. Sulfur concentration is recalculated from Table 1 (SO₂+H₂S) as the condensate does not contain all the sulfur from the gas. * — The concentrations of elements Na, Se, Pb, Te, Cu, Mn, Mo, Bi, Cs, Li, In, Re, W, Ge corrected for deposition in tubes were used in calculating the emission. N — number of results for each element, SD — standard deviation (% of mean).

ВЫНОС МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ФУМАРОЛАМИ

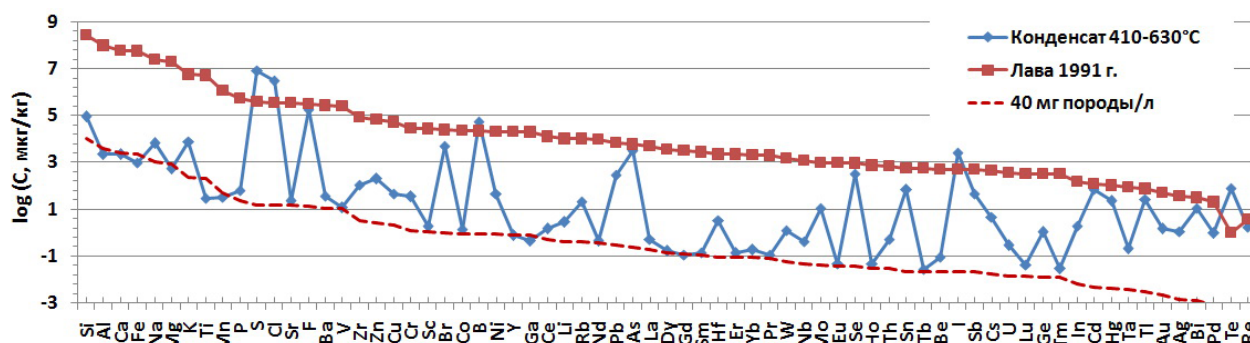


Рис. 5. Средние концентрации элементов в конденсате газа и образце лавы 1991 г. Авачинского вулкана. Элементы расположены в порядке убывания концентраций в породе. Концентрации Au, Bi, Pd, Se и Te в породе из работы (Taran et al., 2018), Cl и Re (Yudovskaya et al., 2008), Br, F, Hg и I (Taran et al., 1995). Пунктирной линией показаны гипотетические концентрации элементов в конденсате, если бы они были извлечены исключительно из силикатного аэрозоля с концентрацией 40 мг/л.

Fig. 5. Average concentrations of elements in gas condensate and the 1991 lava sample from the Avachinsky volcano. Elements are arranged in descending order of concentrations in the rock. Au, Bi, Pd, Se and Te concentrations in lava from (Taran et al., 2018), Cl and Re (Yudovskaya et al., 2008), Br, F, Hg and I (Taran et al., 1995). The dotted line shows the hypothetical concentrations of elements in the condensate if they were extracted solely from the silicate aerosol with a concentration of 40 mg/L.

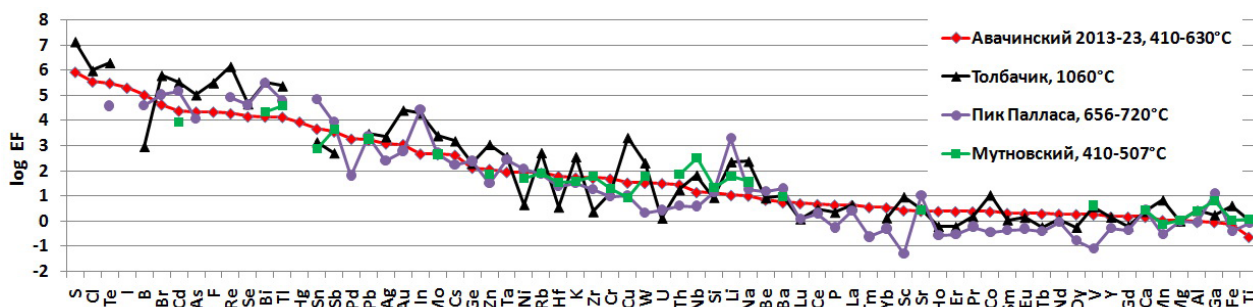


Рис. 6. Факторы обогащения (EF), нормированные на Mg, для конденсатов высокотемпературных газов Авачинского вулкана в сравнении с данными для других вулканов. Факторы обогащения для конденсатов вулканов Толбачик из работы (Zelenski et al., 2014), Мутновский и Пик Палласа рассчитаны по данным (Зеленский, 2003; Taran et al., 2018).

Fig. 6. Enrichment factors (EF) normalized to Mg for condensates of high-temperature gases from Avachinsky volcano in comparison with data for other volcanoes. Enrichment factors for Tolbachik condensates are from (Zelenski et al., 2014), Mutnovsky and Pallas Peak volcanoes are calculated from data (Zelenski, 2003; Taran et al., 2018).

Палласа и Мутновского, но обнаруживают существенные различия с факторами обогащения для газов эффузивного извержения вулкана Толбачик 2012-13 гг., несмотря на схожесть трендов (рис. 5).

Вариации концентраций элементов в конденсатах. Несмотря на длительный временной период (11 лет) отбора проб, изменение температуры режимной фумаролы (410–630 °С), разные условия отбора (длина трубки и др.) и анализ проб в различных лабораториях, диапазон вариаций концентраций (отношение максимального значения к минимальному) в конденсатах для большинства элементов в основном не превышают двух порядков (рис. 4). Исключение составляют труднолетучие элементы: Mg, Al, Si, Fe, Li, с максимальным разбросом значений для Zr и Hf, а также Na, Cd и Re. Как показано в ряде работ (Zelenski et al., 2021 и ссылки в ней), измеренные в газе концентрации одного и того же элемента,

в пробах, взятых в одном вулкане при примерно одинаковых условиях, могут различаться до четырех порядков величины. Наименьшие вариации концентраций и стандартного отклонения (в % от среднего) в конденсате характерны для Cl, F, S, V, As, Se, Br, Hg, Br, Hg, Pb, Sb (рис. 4, табл. 2). Все эти элементы относятся к летучей фракции вулканического шлейфа, т.е. переносятся в газовой фазе или образуют аэрозоли конденсации.

Так как за время наблюдений температура фумаролы снизилась с 630 до 410 °С, то можно было предположить также снижение концентрации элементов в конденсате. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между температурой фумаролы и концентрацией отдельных элементов для 24 проб. Связь ($0.5 < R < 0.8$) с температурой наблюдается для большинства труднолетучих элементов: Ba, Mg, Al, Ti, Ga, Sr, Li, Rb, Y, Zr, Hf, Nb, Cs, Y и лантаноидов, U, некоторых летучих

в (Zelenski et al., 2013): сравнивалось отношение элементов к «эталонному» ($X/X_{э}$) в конденсате и в сублиматах, и бралось в расчет большее отношение (рис. 8). В качестве элемента сравнения был выбран мышьяк, т.к. он присутствует в сублиматах всех зон всех трубок и в конденсате в значительных количествах при умеренных вариациях.

Для 14 элементов (Na, Se, Pb, Te, Cu, Mn, Mo, Bi, Cs, Li, In, Re, W, Ge) отношение X/As было больше в сублиматах, отобранных из трубок. Для расчета их концентрации в газе отношение X/As в сублиматах умножалось на среднюю концентрацию As в конденсате (3210 ppb). Для остальных элементов брались их средние концентрации в конденсате. Коэффициент «конденсат/газ» (массовое отношение конденсируемой фракции газа к общей массе всех компонентов газа), для Авачинского вулкана равный ~ 0.94 , не учитывался.

По данным двух дистанционных измерений, выполненных в 2013 г. УФ спектрометрами DOAS, эмиссия SO_2 фумаролами Авачинского вулкана составляла 200 т/сутки (Мельников, Ушаков, 2013). При средней концентрации за 2013–2023 гг. в высокотемпературных газах диоксида серы 3.4 мас.% и воды 92 мас.% это соответствует выносу ~ 5400 т водяного пара в сутки.

Валовая разгрузка фумарол Авачинского вулкана была оценена в 1970-е гг. на основании геотермического опробования в 75 МВт (Федотов и др., 1977). В работе (Федотов, 1982) была оценена тепловая мощность фумарол Авачинского вулкана для четырех эпизодов в апреле-мае 1981 г. в 22–142 МВт (в среднем 60 МВт) по их высоте и скорости ветра по данным зондирования атмосферы, используя формулу:

$$Q = 0.136 \times h^2 \times v^{1.5},$$

где Q — тепловая мощность струи в кВт, h — высота средней линии горизонтальной части шлейфа в м, v — средняя скорость ветра от жерла до верха струи.

Нами были проведены подобные расчеты для 10 эпизодов 2014–2024 гг., использовались

снимки, сделанные как можно ближе по времени к метеозондированию (12:00) Были получены значения тепловой мощности 25–160 МВт, в среднем 95 МВт. Используя значение энтальпии пара при 250–400 °С, для мощности фумарол 60–70 МВт был рассчитан расход водяного пара: 2500–2700 т/сутки, что приблизительно в два раза меньше, чем расход пара (5400 т/сутки), полученный через расход SO_2 и состав газа.

Причина более низких оценок по формуле для дымовых струй, кроме погрешностей каждого метода, по нашему мнению, — это то, что применяемая формула выведена для расчета мощности одиночных струй (Федотов, 1982), в то время как Восточное фумарольное поле Авачинского вулкана, а с 2015 г. и Западное поле, представляет собой выходы многочисленных фумарол.

К сожалению, опубликованные данные дистанционных измерений SO_2 за последние 10 лет отсутствуют. Визуально общая фумарольная эмиссия мало изменилась за этот период. Поэтому в качестве первого приближения мы принимаем значение по расходу SO_2 в 2013 г. — 200 т/сутки для оценки выноса летучих фумаролами Авачинского вулкана. Используя полученные с учетом осаждения в трубках концентрации элементов в газе и расход водяного пара (5400 т/сутки), был рассчитан вынос всех элементов газами Авачинского вулкана (табл. 2).

Сравнение выноса микроэлементов с другими вулканами Курило-Камчатской островной дуги. Концентрации элементов в конденсатах Авачинского вулкана, полученные в наиболее высокотемпературный (610–630 °С) период отбора, были сопоставлены со всеми опубликованными результатами опробования высокотемпературных газов вулканов Курило-Камчатской дуги: это три вулкана с постоянной высокотемпературной дегазацией: Пик Палласа, Мутновский и Кудрявый, вулкан Горелый в стадии газового извержения и эффузивное Толбачинское

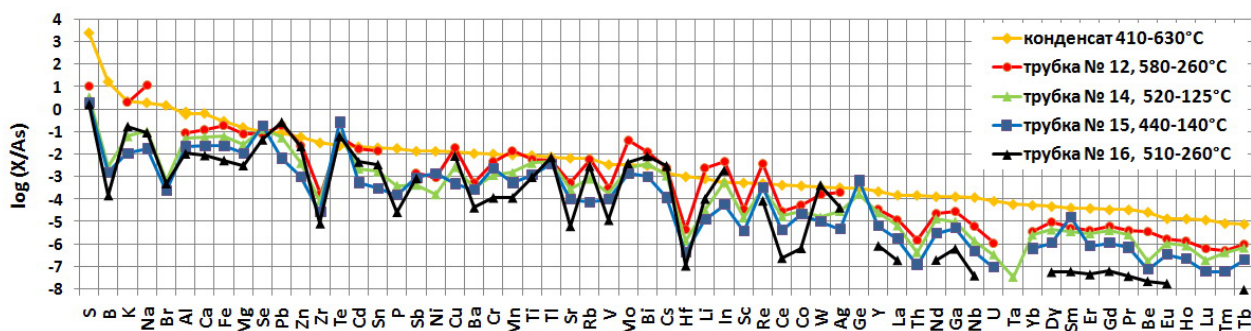


Рис. 8. Сравнение отношения X/As в конденсате газа и сублиматах трубок № 12, 14, 15, 16 высокотемпературных фумарол Авачинского вулкана.

Fig. 8. Comparison of X/As ratio in gas condensate and sublimates of tubes № 12, 14, 15, 16 of high-temperature fumaroles of Avachinsky volcano.

трещинное извержение 2012–2013 гг. (рис. 9). Максимальные концентрации большинства элементов отмечаются в эруптивных газах вулканов Горелый и Толбачик. Концентрации элементов в газах Авачинского вулкана находятся в пределах концентраций для других вулканов, при этом превышают значения для Мутновского вулкана более чем для 20 элементов. Можно отметить относительно высокие концентрации в газах Авачинского вулкана ряда труднолетучих элементов: Zr, Hf, РЗЭ. Концентрация золота в конденсате, отобранном при максимальной температуре газа 630 °С режимной fumarолы № 1, в несколько раз превышает средние концентрации в конденсатах вулканов Кудрявый и Пик Палласа (рис. 9), при том что средняя концентрация для шести проб (1.4 мкг/л) близка к ним. Для Hg, Tl, Bi, In, Li, Ge в конденсатах Авачинского вулкана отмечаются сравнительно низкие концентрации, но при нанесении на диаграмму их скорректированных с учетом отложения в трубках значений заметные отклонения исчезают, а концентрации Re даже превышают значения для вулкана Кудрявый (рис. 9), известного своей рениевой минерализацией (Yudovskaya et al., 2006, 2008). Вероятно, в данном случае играет роль не высокая концентрация элементов в газе, а особые условия кристаллизации на вулкане Кудрявый.

Вынос элементов магматическими газами вулканов зависит от их концентрации в газе и от расхода fumarол, и поэтому максимален для вулканов, характеризующихся наибольшими значениями температуры fumarол и валовой эмиссии газов. Эмиссия SO₂ (рис. 9) составляет:

Авачинский — 200, Толбачик — 850 (Мельников, Ушаков, 2013), Пик Палласа — 480, Кудрявый — 330–380 (Taran et al., 2018), Мутновский 200–500 (Зеленский, 2003; Мельников, Ушаков, 2013), Горелый — 800 (Чаплыгин и др., 2015) в т/сутки. Вынос рудных элементов (Cu, Zn, Pb, Mo, Cd, In, Sn, Tl, Bi) сопоставим для вулканов Горелый (30 т/год), Кудрявый (20–80 т/год) (Чаплыгин и др., 2015) и Пик Палласа (26 т/год, рассчитано по данным (Taran et al., 2018)), но существенно ниже для вулканов Авачинский (3 т/год) и Мутновский (1–2 т/год, рассчитано по данным (Зеленский, 2003; Мельников, Ушаков, 2013)). Такие существенные различия (более чем в 10 раз) в выносе металлов между вулканами в стадии стационарной дегазации с близкими объемами эмиссии SO₂ можно объяснить более высокой температурой и содержанием HCl (10–14 г/л Cl⁻ в конденсате) в fumarолах вулканов Кудрявый и Палласа, по сравнению с Мутновским и Авачинским вулканами (3–4 г/л Cl⁻ в конденсате). Большая часть вышеперечисленных рудных металлов переносится в газе преимущественно в форме галогенидов, и поэтому их вынос вулканами зависит от содержания HCl в вулканических газах (Mason et al., 2023; Zelenski et al., 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые представлен микрокомпонентный состав высокотемпературных fumarол Авачинского вулкана. Концентрации элементов определены в результате непосредственного отбора конденсата газа и его анализа методами ICP-MS, -AES, -OES. Всего в течение 11 лет,

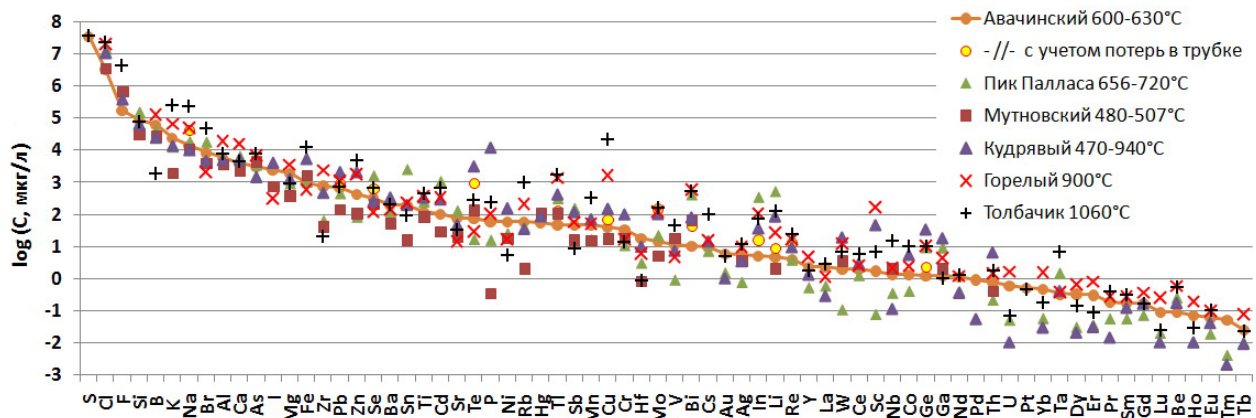


Рис. 9. Сравнение составов конденсатов высокотемпературных газов вулканов Курило-Камчатской дуги. Элементы расположены в порядке убывания в конденсате Авачинского вулкана. Данные для вулканов Пик Палласа из работы (Taran et al., 2018), Мутновский (Zelenski, Bortnikova, 2005), Кудрявый (Taran et al., 1995, 2018; Wahrenberger et al., 2002; Yudovskaya et al., 2006, 2008), Горелый (Чаплыгин и др., 2015) и Толбачик (Zelenski et al., 2014).

Fig. 9. Comparison of compositions of high-temperature gas condensates of volcanoes in the Kuril-Kamchatka arc. The elements are arranged in descending order in the condensate of Avachinsky volcano. Data for Pallas Peak volcano from (Taran et al., 2018), Mutnovsky (Zelenski, Bortnikova, 2005), Kudryavy (Taran et al., 1995, 2018; Wahrenberger et al., 2002; Yudovskaya et al., 2006, 2008), Gorely (Chaplygin et al., 2015), Tolbachik (Zelenski et al., 2014).

с 2013 по 2023 гг., было отобрано и проанализировано 24 пробы, что значительно повышает достоверность и представительность полученных результатов. Количество проанализированных элементов — 69, не считая S, F, Cl, одно из самых высоких среди подобных работ.

Был рассчитан фактор обогащения для элементов в конденсате газа относительно породы вулкана, нормированный на магний. Он позволяет разделить элементы, для которых характерен перенос в шлейфе в виде летучих соединений (S, Cl, Te, I, B, Br, Cd, As, F, Re, Se, Bi, Tl, Hg, Sn, Sb, Pb, Ag, Au, In и др.) и в виде силикатного аэрозоля (Ti, Fe, Ga, Al, P3Э, Ca, Mn и др.).

Для расчета фактора обогащения был получен самый многокомпонентный (58 элементов) на данный момент анализ породы Авачинского вулкана.

В пределах температур 410–630 °С выраженная зависимость концентраций элементов в газе от температуры выявлена только для небольшого числа летучих элементов (B, S, Hg, Pb, Ag, In, Sn) и для большинства труднолетучих элементов. Последнее объясняется одновременным уменьшением скорости газа, ведущим к уменьшению выноса силикатного аэрозоля потоком газа. Газы с температурой 300 и 100 °С существенно обеднены всеми элементами, в большей степени летучими.

Так как часть элементов осаждается на выходе из фумаролы и в пробоотборной системе, были изучены валовые составы сублиматов, осевших в четырех кварцевых трубках, установленных в выходы фумарол. Для учета потерь при осаждении в трубке использовался метод сравнения отношений концентраций элементов к эталонному (Zelenski et al., 2013), в нашем случае As, в сублиматах и конденсатах. Скорректированные таким образом концентрации использовались для расчета выноса элементов. Однако, при выборе разных эталонных элементов, результаты существенно различаются, поэтому методика учета потерь за счет осаждения требует дополнительных исследований.

Вынос рудных элементов (Cu, Zn, Pb, Mo, Cd, In, Sn, Tl, Bi) Авачинским вулканом сравним с Мутновским вулканом и существенно ниже выноса такими вулканами в стадии стационарной дегазации, как Кудрявый и Пик Палласа. Причиной этого могут быть более низкие температуры и концентрации HCl в газах Авачинского и Мутновского вулканов.

Представленное исследование дополняет имеющиеся мировые данные по микроэлементному составу высокотемпературных вулканических газов, вносит вклад в оценки выноса веществ из зоны субдукции на поверхность Земли и решение проблем рудообразования.

Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ № 23-27-00156 (<https://rscf.ru/project/23-27-00156/>). Авторы выражают благодарность за плодотворное обсуждение материалов статьи Ю.А. Тарану и М.Е. Зеленскому, за помощь в проведении полевых работ сотрудникам Камчатского филиала ГС РАН: В.В. Ящуку, А.Н. Биченко, В.В. Яковенко, А.А. Авдееву и ИВиС ДВО РАН: А.А. Платонову, Ш.С. Кудяевой; за выполнения химических анализов сотрудникам АЦ ИВиС ДВО РАН.

Список литературы [References]

- Бычкова Я.В., Синицын М.Ю., Петренко Д.Б. и др.* Методические особенности многоэлементного анализа горных пород методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2016. № 6. С. 56–63. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2016-6-56-63> [Bychkova Ya.V., Sinitsyn M.Yu., Petrenko D.B. et al. Methodical features of multielement analysis of rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry // Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. 2016. № 6. P. 56–63 (in Russian)].
- Зеленский М.Е.* Транспорт элементов и условия минералообразования в зонах разгрузки высокотемпературных фумарол на вулкане Мутновский (Камчатка). Дисс. канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, Институт вулканологии ДВО РАН, 2003. 120 с. [Zelenskij M.E. Transport elementov i usloviya mineraloobrazovaniya v zonah razgruzki vysokotemperaturnyh fumarol na vulkane Mutnovskij (Kamchatka). Dissertaciya kand. geol.-min. nauk. Petropavlovsk-Kamchatskij, Institut vulkanologii DVO RAN, 2003. 120 p.].
- 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 [Zelenski M.E., Taran Yu.A., Dubinina E.O. et al. Sources of Volatiles for a Subduction Zone Volcano: Mutnovsky Volcano, Kamchatka. Geochemistry. 2012. V. 50. P. 502–521. <https://doi.org/10.1134/S001670291204009X>].
- Иванов Б.В., Флеров Г.Б., Масуренков Ю.П. и др.* Динамика и состав продуктов извержения Авачинского вулкана в 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 5–27 [Ivanov B.V., Flerov G.B., Masurenkov Yu.P. et al. The 1991 eruption of Avacha Volcano: dynamics and composition of eruptive products // Journal of Volcanology and Seismology. 1996. № 17. P. 369–394].
- Кирсанов И.Т., Медведева Г.Г., Серафимова Е.К.* Фумарольная деятельность Авачинского и Корьякского вулканов // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 38. С. 3–32 [Kirsanov I.T., Medvedeva G.G., Serafimova E.K. Fumarol activity of the Avacha and Koryak volcanoes // Bulletin of volcanological stations. 1964. № 38. P. 3–32 (in Russian)].
- Логинов В.А., Гонтовая Л.И., Сенюков С.Л.* Авачинско-Корьякская группа вулканов: геофизическая неоднородность литосферы и глубинные процессы (Камчатка) // Вулканология и сейсмология.

2023. № 1. С. 32–43. <https://doi.org/10.31857/S0203030622700031> [Loginov V.A., Gontovaya L.I., Senyukov S.L. The Avacha-Koryaksky Volcanic Group: Geophysical Inhomogeneity of the Lithosphere and Processes at Depth (Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. V. 17. Iss. 1. P. 27–36. <https://doi.org/10.1134/S074204632270004X>].
- Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М. Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013–2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 21–33 [Malik N.A., Zelenski M.E., Okrugin V.M. Temperature and gas composition of the Avachinsky volcano fumaroles (Kamchatka) in 2013–2016 // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2017. № 1 (33). P. 21–33 (in Russian)].
- Малик Н.А., Некрасова М.Ю. Комплексные исследования активности Авачинского вулкана в 2013–начале 2020 гг.: наземные, видео и сейсмические наблюдения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. 46. С. 41–54. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-2-46-41-54> [Malik N.A., Nekrasova M.Yu. The multiple survey of Avachinsky volcano activity in 2013 – early 2020: ground, video and seismic observation // Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle. 2020. № 2 (46). P. 41–54 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В. Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. I (1737–1909 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 13–27 [Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Dvigalo V.N., Bazanova L.I. Historical eruptions of Avacha volcano, Kamchatka. Attempt of modern interpretation and classification for long-term prediction of the types and parameters of future eruptions. Pt. I (1737–1909) // Volcanology and Seismology. 1992. V. 15. Iss. 6. P. 649–665].
- Мельников Д.В., Ушаков С.В. Оценка эмиссии диоксида серы вулканами камчатки (по данным дистанционных измерений) // Доклады Четвертой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 30 сентября – 4 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский. http://www.emsd.ru/conf2013lib/rpdf/1monitoring/Melnikov_Ushakov.pdf [Mel'nikov D.V., Ushakov S.V. Ocenka emissii dioksida sery vulkanami kamchatki (po dannym distancionnyh izmerenij) // Doklady Chetvertoj nauchno-tehnicheskaya konferencii «Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii» 30 sentyabrya – 4 oktyabrya 2013 g., Petropavlovsk-Kamchatskij].
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н. Геохимические особенности эксгаляций Большого Трещинного Толбачинского Извержения. М.: Наука, 1980. 236 с. [Menyailov I.A., Nikitina L.P., Shapar' V.N. Geohimicheskie osobennosti eksgalyacij Bol'shogo Treshchinного Tolbachinskogo Izverzheniya. Moscow: Nauka, 1980. 236 p. (in Russian)].
- Никитина Л.П., Меняйлов И.А., Шапарь В.Н., Гарцева Л.Н. Геохимия и аналитическая химия конденсатов фумарольных газов вулкана Эбеко (остров Парамушир) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 62–72 [Nikitina L.P., Menyailov I.A., Shapar' V.N., Gartseva L.N. Geochemistry and analytical chemistry of fumarolic gas condensates from Ebeko volcano (Paramushir island) // Volcanology and Seismology. 1990. V. 11. Iss. 1. P. 64–74 (in Russian)].
- Округин В.М., Малик Н.А., Москалева С.В. и др. Новые данные о минералах в продуктах фумарольной деятельности Авачинского вулкана (2013–2014 гг.) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 253–260 [Okrugin V.M., Malik N.A., Moskaleva S.V. et al. Novye dannye o mineralah v produktah fumarol'noj deyatel'nosti Avachinskogo vulkana (2013–2014 gg.) // Materialy regional'noj nauchnoj konferencii «Vulkanizm i svyazannye s nim processy», posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa, March 30 – April 1, 2015. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2016. P. 253–260 (in Russian)].
- Округин В.М., Малик Н.А., Плутахина Е.Ю. и др. Новые данные о возгонах и сублиматах Авачинского вулкана (2014–2015 гг.) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2016 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 400–405. [Okrugin V.M., Malik N.A., Plutakhina E.Yu. et al. Novye dannye o vozgonah i sublimatah Avachinskogo vulkana (2014–2015 gg.) // Materialy regional'noj nauchnoj konferencii «Vulkanizm i svyazannye s nim processy», posvyashchyonnoj Dnyu vulkanologa, March 29–30, 2016. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2016. P. 400–405 (in Russian)].
- Плутахина Е.Ю., Малик Н.А. Новые находки в сублиматах Авачинского вулкана // Материалы XXVI конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2023 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2023. С. 162–163 [Plutakhina E.U., Malik N.A. New findings in the sublimate of Avacha volcano // Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVI annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day, March 30–31, 2023. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2023. P. 162–163 (in Russian)].
- Плутахина Е.Ю., Малик Н.А. Хлор и его соединения в продуктах фумарольной деятельности Авачинского вулкана (2013–14 гг.) // Материалы XIV региональной молодежной научной конференции «Природная среда Камчатки». 14 апреля 2015 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 51–60 [Plutakhina E.U., Malik N.A. Chlorine and its compounds in products of fumarolic activity Avachinsky volcano (2013–14 gg.) // Materialy XIV regional'noj molodezhnoj nauchnoj konferencii «Prirodnaya sreda Kamchatki». April 14, 2015. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2015. P. 51–60 (in Russian)].
- Серафимова Е.К. Минералогия возгонов вулканов Камчатки. М.: Наука, 1979. 167 с. [Serafimova E.K. Mineralogiya vozgonov vulkanov Kamchatki. Moscow: Nauka, 1979. 167 p. (in Russian)].

- Серафимова Е.К., Овсянников А.А., Муравьев Я.Д.* Вулканические эксгаляции вулкана Авачинский в постэруптивном процессе после извержения в 1991 г. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 4. С. 22–30 [*Serafimova E.K., Ovsyannikov A.A., Muraviev Ya.D.* Volcanic exhalations of Avacha Volcano following the 1991 eruption // *Volcanology and Seismology*. 2002. V. 4. P. 22–30 (in Russian)].
- Федотов С.А.* Оценки выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 3–28 [*Fedotov S.A.* Evaluation of heat and pyroclastics discharge by volcanic eruptions and fumaroles based on the height of their plums and clouds // *Volcanology and Seismology*. 1982. № 4. P. 3–28 (in Russian)].
- Федотов С.А., Балеста С.Т., Дрознин В.А. и др.* О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана // Бюллетень вулканологической станции. 1977. № 53. С. 27–37 [*Fedotov S.A., Balesta S.T., Droznin V.A. et al.* O vozmozhnosti ispol'zovaniya tepla magmaticheskogo ochaga Avachinskogo vulkana // *Bulletin of volcanological stations*. 1977. № 53. P. 27–37 (in Russian)].
- Чаплыгин И.В., Таран Ю.А., Дубнина Е.О. и др.* Химический состав и металлоносность магматических газов вулкана Горелый (Камчатка) // ДАН. 2015. Т. 463. № 1. С. 85–89. <https://doi.org/10.7868/S0869565215140182> [*Chaplygin I.V., Taran Y.A., Dubnina E.O. et al.* Chemical composition and metal capacity of magmatic gases of Gorelyi volcano, Kamchatka // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 463. № 1. P. 690–694. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15050104>].
- Aiuppa A., Dongarra G., Valenza M. et al.* Degassing of trace volatile metals during the 2001 eruption of Etna / *Volcanism and the Earth's Atmosphere*, Robock A., Oppenheimer C. (Eds.). Geophysical Monograph Series. 2003. V. 139. P. 41–54. <https://doi.org/10.1029/139GM03>
- Birnie R.W., Hall J.H.* The geochemistry of El Misti volcano, Peru fumaroles // *Bulletin of Volcanology*. 1974. V. 38. № 1. P. 1–15.
- Carn S.A.* Gas, Plume and Thermal Monitoring / Sigurdsson, H. (Ed.), *Encyclopedia of volcanoes*. Elsevier, 2015. P. 1125–1149.
- Fischer T.P.* Fluxes of volatiles (H₂O, CO₂, N₂, Cl, F) from arc volcanoes // *Geochemical Journal*. 2008. V. 42. P. 21–38. <https://doi.org/10.2343/geochemj.42.21>
- Gemmell J.B.* Geochemistry of metallic trace elements in fumarolic condensates from Nicaraguan and Costa Rican volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1987. V. 33. № 1. P. 161–181.
- Le Guern F., Bernard A.* A new method for sampling and analyzing volcanic sublimates – application to Merapi volcano, Java // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1982. V. 12. № 1–2. P. 133–146. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(82\)90008-7](https://doi.org/10.1016/0377-0273(82)90008-7)
- Mandon C.L., Christenson B.W., Schipper C.I. et al.* Metal transport in volcanic plumes: A case study at White Island and Yasur volcanoes // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. V. 369. P. 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.11.024>
- Mason E.M., Edmonds M., Hammond S. et al.* Chalcophile element processing at an active continental arc volcano // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2024. V. 367. P. 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.12.014>
- Moune S., Gauthier P.-J., Delmelle P.* Trace elements in the particulate phase of the plume of Masaya volcano, Nicaragua // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2010. V. 193. № 3–4. P. 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.04.004>
- Okrugin V., Favero M., Liu A. et al.* Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: nataljamalikitite, TlI, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *American Mineralogist*. 2017. V. 102. № 8. P. 1736–1746. <https://doi.org/10.2138/am-2017-6057>
- Quisefti J.P., Toutain J.P., Bergametti G. et al.* Evolution versus cooling of gaseous volcanic emissions from Momotombo Volcano, Nicaragua: thermochemical model and observations // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1989. V. 53. № 10. P. 2591–2608. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90131-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90131-2)
- Shipley J.W.* Some chemical observations on the volcanic emanations and incrustations in the Valley of Ten Thousand Smokes, Katmai, Alaska // *American Journal of Science*. 1920. V. 50. P. 141–153.
- Symonds R.B., Rose W.I., Reed M.H. et al.* Volatilization, transport and sublimation of metallic and non-metallic elements in high temperature gases at Merapi Volcano, Indonesia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1987. V. 51. № 8. P. 2083–2101.
- Taran Y., Zelenski M.* Systematics of the water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases / Zellmer, G.F., Edmonds, M., Straub, S.M. (Eds.), *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas*. Geological Society. London. Special Publications. 2014. V. 410. P. 237–262. <http://dx.doi.org/10.1144/SP410.5>
- Taran Y., Zelenski V., Chaplygin I. et al.* Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island arc (NW Pacific): geochemistry and fluxes // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018. V. 19. № 6. P. 1859–1880. <https://doi.org/10.1029/2018GC007477>
- Taran Y.A., Bernard A., Gavilanes J.-C. et al.* Chemistry and mineralogy of high-temperature gas discharges from Colima volcano, Mexico. Implications for magmatic gas–atmosphere interaction // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2001. V. 108. № 1–4. P. 245–264. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(00\)00289-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00289-4)
- Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M. et al.* Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59. № 9. P. 1749–1761. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00079-F](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00079-F)
- Taran Y.A., Cornor C.B., Shapar V.N. et al.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // *Bulletin of Volcanology*. 1997. V. 58. № 8. P. 441–448.
- Viccaro M., Giuffrida M., Nicotra E., Ozerov A.Yu.* Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry // *Lithos*. 2012. V. 140–141. P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.01.019>
- Wahrenberger C., Seward T.M., Dietrich V.* Volatile trace element transport in high temperature gases

- from Kudriavy volcano (Iturup, Kurile Islands, Russia) / Hellmann R., Wood S.A. (Eds.), *Water-Rock Interaction: A Tribute to David A. Crerar*. Geochemical Society Special Publications 7. Washington University, 2002. P. 307–327.
- White D.E., Waring G.A. Volcanic emanations. Washington D.C., 1963. 33 p. <https://doi.org/10.3133/pp440K>
- Williams-Jones A.E., Heinrich C.A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Economic Geology*. 2005. V. 100. P. 1287–1312. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.7.1287>
- Yudovskaya M.A., Distler V. V., Chaplygin I.V. et al. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: evidence from the active Kudryavy volcano, Kurile Islands // *Mineralium Deposita*. 2006. V. 40. P. 828–848. <https://doi.org/10.1007/s00126-005-0034-6>
- Yudovskaya M.A., Tessalina S., Distler V.V. et al. Behavior of highly-siderophile elements during magma degassing: A case study at the Kudryavy volcano // *Chemical Geology*. 2008. V. 248. № 3–4. P. 318–341. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.12.008>
- Zelenski M., Bortnikova S. Sublimate speciation at Mutnovsky volcano, Kamchatka // *European Journal of Mineralogy*. 2005. V. 17. № 1. P. 107–118. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2005/0017-107>
- Zelenski M., Malik N., Taran Yu. Emissions of trace elements during the 2012–2013 effusive eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka: enrichment factors, partition coefficients and aerosol contribution // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. V. 285. P. 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.007>
- Zelenski M., Simakin A., Taran Yu. et al. Partitioning of elements between high-temperature, low-density aqueous fluid and silicate melt as derived from volcanic gas geochemistry // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 295. P. 112–134. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.12.011>
- Zelenski M.E., Fischer T.P., de Moor J.M. et al. Trace elements in the gas emissions from the Erta Ale volcano, Afar, Ethiopia // *Chemical Geology*. 2013. V. 357. P. 95–116. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.08.022>
- Zoller W.H., Gladney E.S., Duce R.A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South pole // *Science*. 1974. V. 183. № 4121. P. 198–200. <https://doi.org/10.1126/science.183.4121.198>

TRACE ELEMENT EMISSION BY FUMARoles OF THE AVACHINSKY VOLCANO (КАМЧАТКА)

N.A. Malik¹, E.Yu. Plutakhina¹, I.Yu. Nikolaeva²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006; e-mail: maliknataliya@mail.ru*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Received June 06, 2024; revised September 12, 2024; accepted September 25, 2024

The trace element composition of high-temperature gases of Avachinsky volcano was investigated. For that purpose 25 samples of gas condensates and sublimates deposited in four quartz tubes were analyzed. The total average concentration of trace elements (excluding S, Cl, F, Si) in the condensates was 87 mg/l, the maximum 210 mg/l, among which B, K, Na, Br, As predominated. A large number of samples taken over a period 2013–2023 allowed us to evaluate the variations of element concentrations, their dependence on fumarole temperature and the season of sampling. The enrichment factors normalized for magnesium, made it possible to determine the elements transported in the plume in the form of volatile compounds (S, Cl, Te, I, B, Br, Cd, As, F, Re, Se, Bi, Tl, Hg, Sn, Sb, Pb, etc.) and in the form of silicate aerosol (Ti, Fe, Ga, Al, Ca, Mn, REE et al.). The ore element emission by Avachinsky volcano is comparable to that of Mutnovsky volcano (Kamchatka) and significantly lower than the emission by volcanoes in the stage of stationary degassing, such as Kudryavy and Pallas Peak (Kuril Islands), which can be explained by higher concentrations of HCl in the gases of the latter.

Keywords: Avachinsky volcano, volcanic gas, sublimates, trace element emission by volcanoes.