

Работы молодых ученых

УДК 551.21

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2026-3-71-96-107>

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ИНКРУСТАЦИЙ ЗОНАЛЬНЫХ ФУМАРОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ВУЛКАНА АВАЧИНСКИЙ, КАМЧАТКА

© 2026 Е.Ю. Плутахина

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006;
e-mail: e.plutakhina@gmail.com*

Поступила в редакцию 31.10.2024; после доработки 20.08.2026; принята в печать 25.09.2026

Представлены результаты комплексного минералогического исследования трех фумарольных полей вулкана Авачинский — Северо-западный гребень, Западное и Восточное. Методами оптической микроскопии, рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии изучены 142 образца гидротермально измененных пород и фумарольных инкрустаций, собранные во время полевых сезонов 2013–2025 гг. В инкрустациях диагностировано 37 минеральных видов и три рентгеноаморфные фазы. По преобладающему цвету инкрустаций и температурам фумарольных газов выделены четыре зоны минеральных ассоциаций: бело-желтая ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), желтая ($80\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$), оранжевая ($200\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$) и серая ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$). Впервые описано существенное увеличение площади распространения и мощности агрегатов сассолина на Восточном фумарольном поле после Камчатского мегаземлетресения 29 июня 2025 г., что может свидетельствовать об активизации глубинных флюидов.

Ключевые слова: Авачинский вулкан, фумаролы, минеральные ассоциации, инкрустации.

ВВЕДЕНИЕ

Минеральные ассоциации фумарольных полей активных вулканов привлекают внимание исследователей уже более ста лет (Серафимова, 1979; Balić-Žunić et al., 2016). Это связано с возможностью изучения уникальной среды минералообразования, характеризующейся высокой температурой, давлением, близким к атмосферному, и кристаллизацией минералов в результате взаимодействия вулканических газов, растворов и горных пород (Stoiber, Rose, 1974). Изменения в минеральных ассоциациях при постоянном мониторинге могут быть использованы в разработке новых подходов к прогнозу вулканических извержений, так как между минеральными ассоциациями, температурой их образования, составом и окисленностью вулканических газов есть прямая связь (Africano et al., 2003; Stoiber, Rose, 1974).

Вулкан Авачинский ($53^{\circ}15.3'\text{с.ш.}$, $158^{\circ}49.8'\text{в.д.}$, 2751 м над уровнем моря) — один из активных

вулканов на полуострове Камчатка (рис. 1а). Документально подтверждено 14 извержений вулкана в XVII–XX вв. и слабая эксплозивная активизация в 2001 г. (Мелекесцев и др., 1994). Преимущественно эксплозивный характер современных извержений вулкана, и явления, связанные с его извержениями, обуславливают потенциальную опасность для туристов и населения близлежащих городов — Петропавловска-Камчатского и Елизово (Базанова и др., 2001). В настоящее время вулкан находится в межэруптивном периоде, характеризующемся постоянной фумарольной активностью.

Морфология вулкана Авачинский отвечает типу Сомма-Везувий: породы позднеплейстоценовой соммы варьируют по составу от базальтов до дацитов, тогда как активный Молодой конус сложен андезибазальтами (Масуренков и др., 1991) (рис. 1б). Кратер заполнен андезибазальтовой лавой, нарушенной системой трещин общего СЗ простирания (Мелекесцев и др., 2002).

Современные высокотемпературные фумарольные поля приурочены к местам пересечения наиболее длинной из трещин с кромкой кратера, низкотемпературные поля и прогретые участки расположены на кромке и на внешней стороне кратера (Дрознин, Дубровская, 2006; рис. 1*б*).

Первое описание фумарол и возгонов вулкана Авачинский сделано во время экспедиции 1931 г. (Заварицкий, 1935). Детальное описание фумарольных площадок проведено в 1960-х гг. (Зубин и др., 1964, Кирсанов и др., 1964). Данные о продуктах фумарольной деятельности, отобранных после извержения 1991 г., обобщены

в работе (Серафимова и др., 2002). В 2012 г. возобновлены регулярные наземные исследования фумарольной активности, включающие измерение температур, а также отбор проб газов, конденсатов, измененных пород, инкрустаций и сублиматов в кварцевые трубки (Округин и др., 2016; Плутахина, Малик, 2025; Плутахина и др., 2025).

В настоящей статье обобщены опубликованные данные (2012–2025 гг.) и представлены новые результаты детального изучения минеральных ассоциаций фумарольных полей вулкана Авачинский.

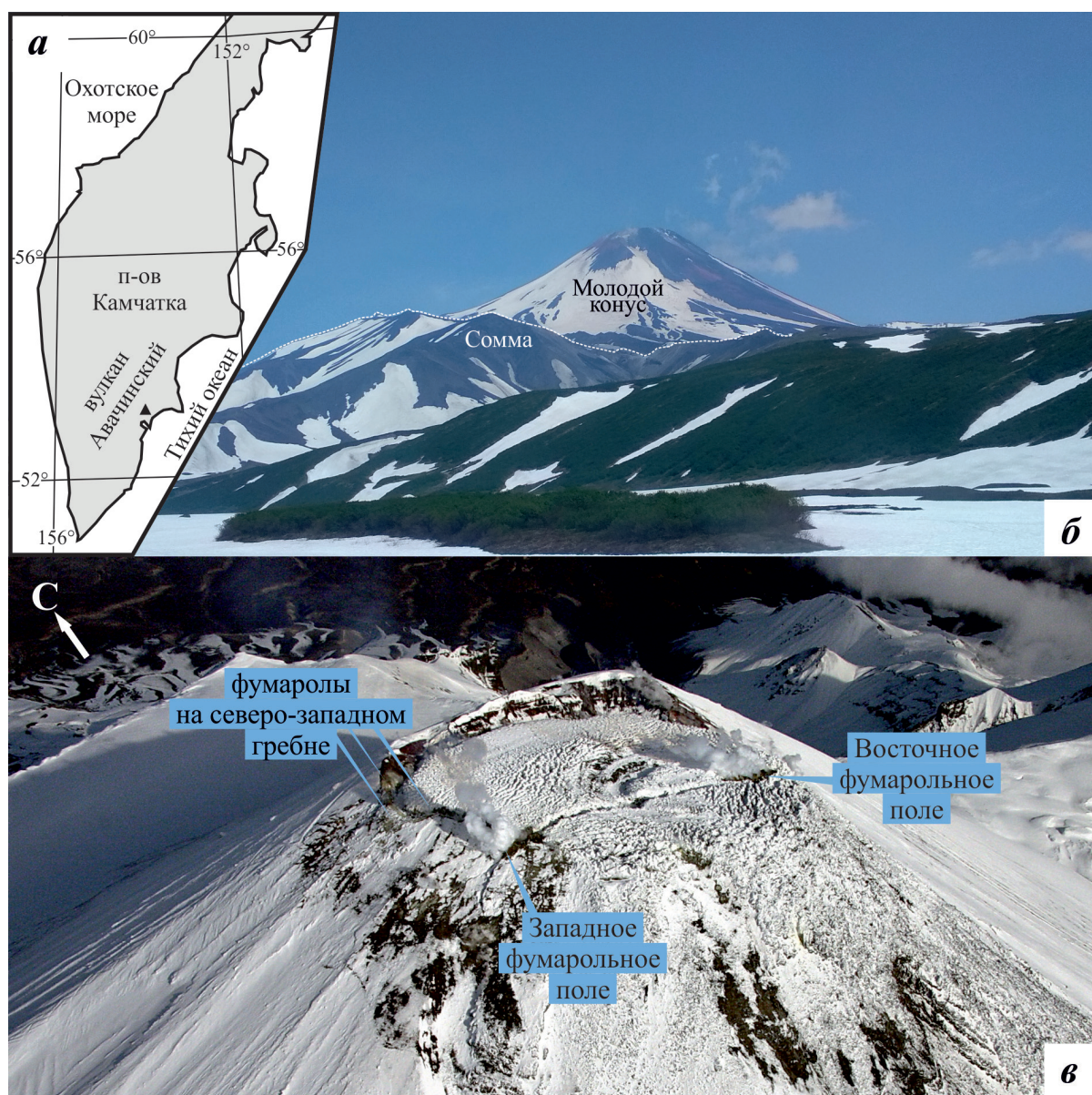


Рис. 1. Авачинский вулкан: *а* — географическое положение; *б* — вид на вулкан с запада (фото автора); *в* — вершина вулкана с отмеченными фумарольными полями (фото А.В. Сокоренко). Пунктирной линией показана граница Молодого конуса и соммы вулкана.

Fig. 1. Avachinsky Volcano: *a* — geographical position; *б* — view of the volcano from the west (photo by the author); *в* — the top of the volcano with marked fumarole fields (photo by A.V. Sokorenko). Dashed line indicates the boundary between the active cone and the somma of the volcano.

ФУМАРОЛЬНЫЕ ПОЛЯ ВУЛКАНА АВАЧИНСКИЙ

Из всех прогретых площадок, низко- и высокотемпературных фумарольных полей вулкана Авачинский наиболее изучены вершинные низкотемпературные фумаролы на северо-западном гребне, Западное и Восточное высокотемпературные фумарольные поля.

Фумаролы на **Северо-западном гребне (СЗГ)** расположены на кромке кратера в пределах зоны размером ~190×5 м (рис. 1б). Монотонный характер гидротермального преобразования пород, наличие мощной серной корки в центральной части гребня, выдержанный состав инкрустаций дают основание рассматривать эти выходы в качестве единого поля (рис. 2а). Температуры газов на многочисленных точечных фумаролах (с жерлами до 20 см в диаметре) и на парящих участках не превышают 100 °С. На ~50 м вниз по внешнему склону Молодого конуса прослеживаются более слабые фумаролы и парящие площадки (Малик и др., 2017).

Западное фумарольное поле (ЗФП) размером около 15×40 м расположено на западном склоне Молодого конуса (рис. 1б). До 2015 г. минеральные инкрустации локализовались вдоль трещины с интенсивной высокотемпературной дегазацией. Частичный обвал стенок канала (предположительно в декабре 2014 г.) привел к увеличению диффузной фильтрации газов сквозь шлаково-обломочный материал и постепенному расширению площади прогретого склона (Малик и др., 2020) (рис. 2б). Максимальные температуры фумарольных газов остаются высокими: в 2023 г.

— 760 °С, в 2024 г. — 820 °С (Плутахина и др., 2025); значительно увеличилось количество разрозненных фумарол с температурами > 100 °С. Усиление интенсивности гидротермального метасоматоза повлекло за собой увеличение мощности новообразованных инкрустаций и формирование серных конусов высотой до 15 см вокруг нескольких устьев фумарол (Плутахина, Малик, 2025).

Восточное фумарольное поле (ВФП) размером ~30×60 м состоит из парящих площадок, трещинных и разрозненных одиночных газовых выходов в юго-восточной части лавовой пробки (рис. 1б). Инкрустации сконцентрированы на поверхности лавовых глыб, в трещинах между ними и в толще гидротермально измененного шлака (рис. 2в–г). Температура газов, измеряемая в фумаролах «Режимная № 1» и «Режимная № 2», находящихся в северо-западной части ВФП, понижается с > 600 °С в 2013 г. до 420 °С в 2024 г. Единичный замер температуры фумаролы «Режимная № 1» в августе 2025 г. показал 275 °С, тогда как на северной части ВФП температуры достигали 463 °С.

Средний состав фумарольных газов вулкана Авачинский характеризуется преобладанием H_2O (967–978 ммоль/моль) и CO_2 (16.9–17.2 ммоль/моль). В высокотемпературных газах (ВФП, «Режимная № 1», 2013–2023 гг., 28 отборов, $T = 630\text{--}410$ °С) зафиксированы максимальные концентрации кислотных компонентов: SO_2 (10.3), H_2S (2.61) и HCl (1.71 ммоль/моль), а также водорода (1.73 ммоль/моль). В низкотемпературных выходах (СЗГ, 2015–2020 гг., 3 отбора, $T \leq 100$ °С) содержание сернистых соединений

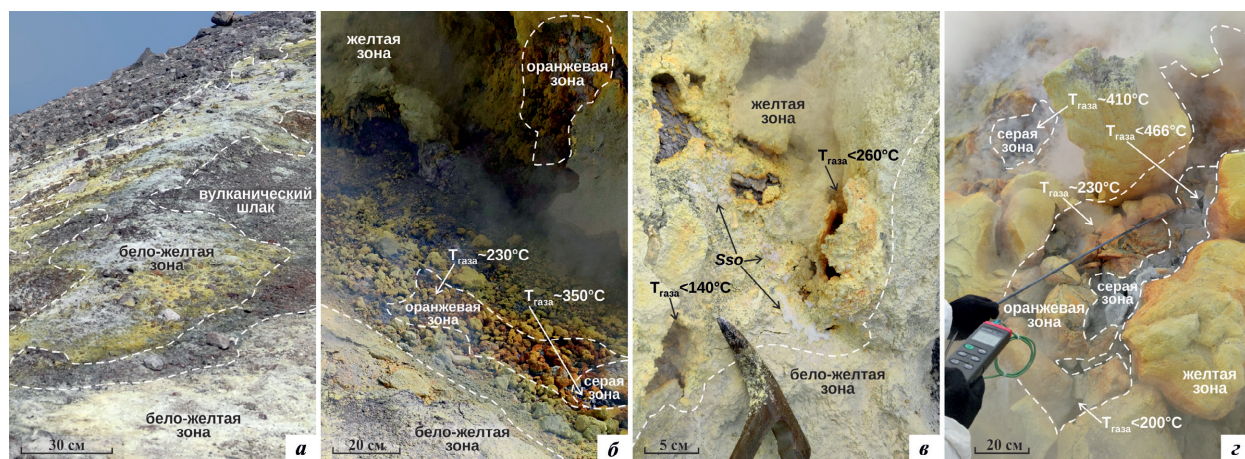


Рис. 2. Участки фумарольных полей Авачинского вулкана: а — на СЗ гребне кратера; б — на Западном фумарольном поле; в — на северной стороне Восточного фумарольного поля; г — на юго-восточной стороне Восточного фумарольного поля. Пунктирной линией показаны условные границы бело-желтой, желтой, оранжевой и серой зон минеральных ассоциаций. Sso — сассолин.

Fig. 2. Areas of fumarole fields of Avachinsky Volcano: а — at the NW crater rim; б — at the Western fumarole field; в — at the northern side of the Eastern fumarole field; г — at the southeastern side of the Eastern fumarole field. Dashed lines indicate the conventional boundaries of the white-yellow, yellow, orange, and gray zones of mineral association zones. Sso — sassolite.

составляет: SO_2 — 2.99, H_2S — 1.83, концентрация HCl — 0.045 ммоль/моль (Малик и др., 2024).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы на фумарольных полях вулкана Авачинский выполнялись автором в период с 2013 по 2025 г., преимущественно в летне-осенний сезон (июнь–сентябрь), что позволило собрать образцы с минимальным воздействием атмосферных осадков. Проведение работ на фумаролах сопряжено с рядом объективных трудностей: высокой изменчивостью погодных условий; подъемом оборудования на вершину вулкана; пересечением лавовой пробки, рассеченной трещинами шириной до 2 м; применением альпинистской страховочной системы на склоне; использованием защитных костюмов и противогазов с фильтрами (из-за высоких температур и концентраций агрессивных газов).

В рамках совместных работ с сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и Камчатского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» собрана представительная коллекция, состоящая из 142 образцов гидротермально измененных пород и фумарольных инкрустаций. Образцы отбирали на участках с различными температурами, текстурами и морфологией фумарол. Инкрустации извлекали титановой лопаткой и остужали естественным образом. Температуры газов и вмещающих пород в точках отбора измерялись *in situ* с помощью термпары. Все образцы документировали (фото, описание, фиксация координат) и герметично упаковывали в пластиковые контейнеры, пакеты или полиэтиленовую пленку в месте отбора с учетом их гигроскопичности и окисляемости, следуя методикам консервации нестабильных минералов (Яхонтова, Зверева, 2000).

Отбор ряда образцов, содержащих самородную серу и арсеносульфурит (рентгеноаморфную смесь серы и мышьяка), из наиболее высокотемпературных фумарол осложнялся их спонтанным вскипанием с выделением ярко-оранжевого газа. Охлаждение этого материала сопровождалось утратой ассоциировавших минеральных фаз и превращением в рентгеноаморфное мышьяковисто-серное стекло, подобное по составу стеклу сублиматов из кварцевых трубок (Плутахина и др., 2025).

Микроморфология поверхности и сколов каждого образца исследовалась с помощью оптической микроскопии (Stemi 2000C, Carl Zeiss; EZ4B, Leica). Анализ минерального и химического состава проводился в 2013–2025 гг. на базе оборудования Центра коллективного пользования ИВиС ДВО РАН «Камчатский центр элементного, минерального, изотопного

анализа». Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре XRD 7000 MAXima (Shimadzu), рентгенофлуоресцентный анализ — на спектрометре S4 Pioneer (Bruker). Образцы раскалывали, квартовали, вручную отбирали монофракции минералов, квартованные валовые пробы измельчались в агатовой ступке. Локальный химический состав и микроструктура всех образцов исследованы методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на VEGA 3 LMN (Tescan) с энергодисперсионным спектрометром X-Max 80 мм² и программным обеспечением AZtec (Oxford Instruments). Для качественного и количественного анализа агрегаты до 2 см закрепляли в эпоксидном компаунде холодного отверждения, полировали без применения воды и напыляли углеродом; отдельные кристаллы монтировали на углеродный скотч. Измерения проводили при вакууме ~0,02 Па, ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 1 нА. В качестве калибровочных эталонов использовали чистые элементы, синтетические соединения и стехиометричные минералы известного состава (Zn, Se, Te, Re, Bi, SiO_2 , BaSO_4 , CaF_2 , NaCl, MnO, MgO, Al_2O_3 , CePO_4 , FeS_2 , KBr, TiO_2 , CuFeS_2 , ZnS, As_2S_3 , CdS, SnO_2 , Sb_2S_3 , BaF_2 , HgS, Tl_2S , ReS_2 , PbS, диопсид, родонит, альбит, хромшпинель).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Минеральный состав инкрустаций. В образцах инкрустаций с фумарольных площадок вулкана Авачинский диагностировано 37 минеральных видов и три аморфные фазы (табл. 1). Наиболее часто в образцах присутствуют самородная сера, опал, кристобалит и сассолин.

Самородная сера (орторомбическая) образует полнокристаллические, скрытокристаллические и зернистые корки мощностью до 30 см. Она заполняет трещины и каверны в измененных породах, формирует друзы и щетки у фумарольных жерл (рис. 2б–г, 4а, 4и). Облик отдельных кристаллов варьирует от дипирамидального (со скульптурами роста на гранях), усечено-дипирамидального и толстопризматического до копьевидных и скелетных сростков (рис. 3а–б, 4б). В порах агрегатов самородной серы фиксируется механическая примесь обломков порообразующих минералов (плагиоклазов, пироксенов, рутила, магнетита) и ассоциирующих минералов.

Кремнеземистая матрица в низкотемпературных инкрустациях представлена преимущественно опалом, формирующим скрытокристаллические пористые корки мощностью до нескольких см (рис. 3в, 4а–б); в высокотемпературных — опалом и кристобалитом, диагностированными методами XRD (рис. 3г, 4е).

ПЛУТАХИНА

Таблица 1. Минералы и аморфные фазы фумарольных инкrustаций Авачинского вулкана: химические формулы и распространенность

Table 1. Minerals and amorphous phases fumarolic incrustations of Avachinsky Volcano: chemical formulas and occurrence

1	2	3	4	5		
				СЗГ	ЗФП	ВФП
Сера	S	$(S_{0.92-1.00}Se_{0-0.05}Te_{0-0.2}As_{0-0.01})_1$	+	*****	*****	*****
Кристобалит	Crs	$(Si_{0.96-1.00}Al_{0-0.04})_1(O_{1.8-2.0}F_{0-0.2})_2$	+	+	*****	*****
Опал	Opl	$(Si_{0.96-1.00}Al_{0-0.04})_1O_{2 \times n}H_2O$	+	****	*****	*****
Гематит	Hem	Fe_2O_3	+	***	*	*
Касситерит	Cst	SnO_2	-	-	*	*
Арсенолит	Aso	As_2O_3	-	-	*	*
Сассолин	Sso	$B(OH)_3$	+	***	***	***
Лимонит	-	$Fe_2O_3 \times nH_2O$	+	-	-	-
Ральстонит	Hkra	$Na_xMg_xAl_{2-x}(F,OH)_6 \times H_2O$	+	-	-	-
Галит	Hal	$(Na_{0.95-1.00}K_{0-0.05})_1Cl_1$	+	***	**	**
Сильвин	Syl	$(K_{0.83-1.00}Na_{0-0.17})_1Cl_1$	-	*	*	**
Нашатырь	Sam	$NH_4(Cl_{0.9-1.0}F_{0-0.1})_1$	-	**	**	*
Наталиамаликит	Nml	$Tl_1(I_{0.64-1.00}Br_{0-0.12}Cl_{0.0-0.24})_1$	-	-	*	*
Лавоссайт	Lfs	$Tl_1(Cl_{0.41-1.00}Br_{0-0.45}I_{0-0.14})_1$	-	-	-	*
Пирит	Py	FeS_2	+	**	**	**
Марказит	Mrc	FeS_2	+	-	-	-
Реальгар	Rlg	$(As_{0.94-1.00}Sb_{0-0.06})_1S_1$	-	-	*	**
Аурипигмент	Orp	$(As_{1.9-2.0}Sb_{0-0.1})_2S_3$	-	-	*	**
Галенит	Gn	$(Pb_{0.95-1.00}Bi_{0-0.05})_1(S_{0.88-1.00}Se_{0-0.12})_1$	-	-	-	*
Гринокит	Gnk	$(Cd_{0.9-1.0}Zn_{0-0.1})_1S_1$	-	-	-	*
Киноварь	Cin	HgS	-	*	-	*
Сфалерит	Sp	$(Zn_{0.95-1.00}Cd_{0-0.05})_1S_1$	-	-	-	*
Халькопирит	Ccp	$CuFeS_2$	-	*	-	*
Рениит	Rhn	$(Re_{0.85-1.00}Mo_{0-0.15})_1S_2$	-	-	-	*
Висмутин	Bit	Bi_2S_3	-	-	-	*
Англезит	Ang	$PbSO_4$	-	-	*	*
Барит	Brt	$(Ba_{0.9-1.0}Sr_{0-0.1})_1SO_4$	-	*	*	*
Тенардит	Thn	$(Na_{1.95-2.00}K_{0-0.05})_2SO_4$	-	-	*	**
Арканит	Acn	$(K_{1.96-2.00}Na_{0-0.04})_2SO_4$	-	-	-	**
Ангидрит	Anh	$(Ca_{0.95-1.00}Na_{0-0.05})_1SO_4$	+	***	-	**
Масканьит	Msc	$(NH_4)_2SO_4$	-	-	-	*
Глауберит	Glb	$Na_{1.9-2.0}Ca_{1.0-1.05}(SO_4)_2$	+	**	-	**
Афтиталит	Att	$(K_{1.00-1.15}Na_{0.85-1.00})_1Na_2(SO_4)_2$	-	-	-	**
Годовиковит	God	$NH_4(Al,Fe) \times (SO_4)_2$	-	*	-	*
Гипс	Gp	$CaSO_4 \times 2H_2O$	+	****	-	*
Халькантит	Cct	$CuSO_4 \times 5H_2O$	+	-	-	-
Алунит	Alu	$K(Al_{2.8-3.0}Fe_{0-0.2})_3(SO_4)_4(OH)_6$	-	***	**	**
Натроалунит	Nalu	$Na(Al_{2.9-3.0}Fe_{0-0.1})_3(SO_4)_4(OH)_6$	-	**	*	*
Алуноген	Alg	$Al_2(SO_4)_3 \times 17H_2O$	+	****	*	-
Вольтаит	Vlt	$K_2Fe^{2+}_5Fe^{3+}_3Al(SO_4)_{12} \times 18H_2O$	+	-	-	-
Галотрихит	Hth	$(Fe_{0.8-1.0}Mg_{0-0.2})_1Al_2(SO_4)_4 \times 22H_2O$	+	*****	*	*
Пиккерингит	Pkg	$(Mg_{0.8-1.0}Fe_{0-0.2})_1Al_2(SO_4)_4 \times 22H_2O$	+	*****	*	-
Арсеносульфурит	-	$(S_{3.0-4.5}As_{3.0-4.5}Se_{0-0.4}Te_{0-0.2}Sb_{0-0.2}I_{0-0.2})_8$	-	-	**	***
-	-	(Se,Te)	-	-	*	*
-	-	As-O-I	-	-	*	*

Примечание. 1 — название минерала. 2 — аббревиатура минерала по классификации Международной минералогической ассоциации. 3 — идеальные формулы минералов и формулы с учетом примесей по данным СЭМ. 4 — компиляция данных предыдущих исследований (Заварицкий, 1935; Кирсанов и др., 1964; Серафимова и др., 2002). 5 — распространенность минералов в образцах, исследованных в рамках настоящей

работы. СЗГ — фумарольное поле на северо-западном гребне кратера. ЗФП — Западное фумарольное поле. ВФП — Восточное фумарольное поле. «+» означает, что минерал был обнаружен; «-» означает, что минерал не был обнаружен; * — единичные кристаллы (~1 %); ** — редкие минералы (< 5 %); *** — минералы средней распространенности (< 30 %); **** — распространенные минералы (< 50 %); ***** — главные минералы (> 50 %).

Note. 1 — mineral name. 2 — mineral abbreviation according to the International Mineralogical Association (IMA) classification. 3 — ideal formulas of minerals and formulas accounting for impurities based on SEM data. 4 — compiled data from previous studies (Zavaritsky, 1935; Kirsanov et al., 1964; Serafimova et al., 2002). 5 — mineral abundance in the samples examined in this study. СЗГ — fumarolic field on the North-Western crater ridge; ЗФП — Western fumarolic field; ВФП — Eastern fumarolic field. «+» means that the mineral was found; «-» means that the mineral was not found; * — single crystals (~1 %); ** — rare minerals (< 5 %); *** — minerals of moderate occurrence (< 30 %); **** — common minerals (< 50 %); ***** — major minerals (> 50 %).

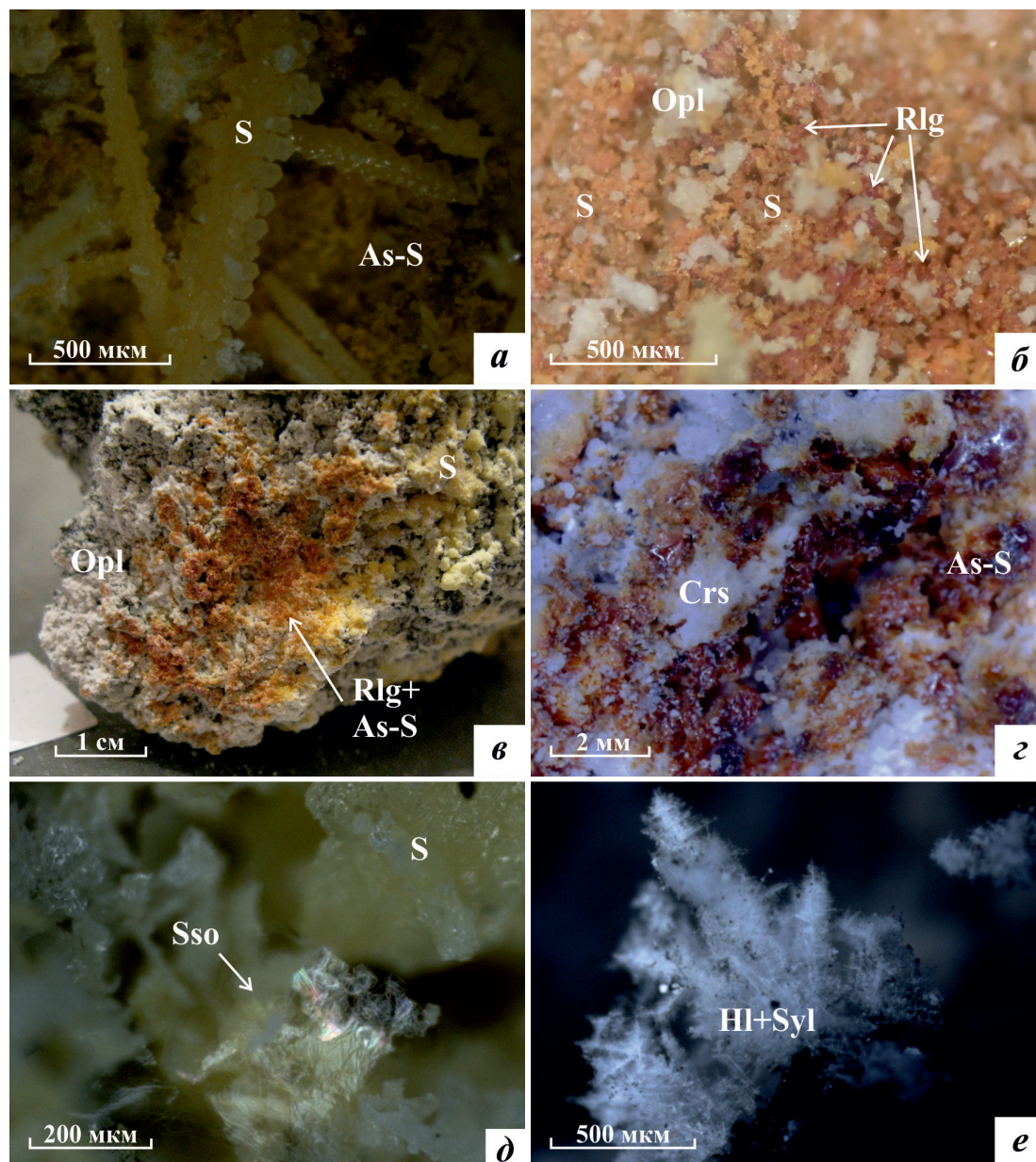


Рис. 3. Образцы высокотемпературных инкрустаций: *a* — кристаллы самородной серы со скелетной и копьевидной структурой на пористом агрегате арсеносульфурита; *б* — микрокристаллы опала, серы и реальгара на поверхности образца; *в* — фрагмент белого опалита с шетками желтой самородной серы, скоплениями микрокристаллов оранжевого реальгара и каплями красного арсеносульфурита; *г* — рыхлая поверхность агрегата кристобалита (и опала?) с пленкой арсеносульфурита; *д* — кристаллы сассолина на самородной сере; *е* — агрегат игольчатых кристаллов сильвина и кубических кристаллов галита. Изображения в отраженном свете. Opl — опал, S — самородная сера, Rlg — реальгар, As-S — арсеносульфурит, Syl — сильвин, Hl — галит.

Fig. 3. Samples of high-temperature incrustations: *a* — native sulfur crystals with skeletal and spear-like structures on a porous arsenosulfurite aggregate; *b* — opal, sulfur, and realgar microcrystals on the sample surface; *в* — a fragment of white opal with clusters of yellow native sulfur, aggregates of orange realgar microcrystals, and drops of red arsenosulfurite; *г* — a loose surface of a cristobalite (and opal?) aggregate with an arsenosulfurite glaze; *д* — sassolite crystals on native sulfur; *е* — an aggregate of acicular sylvite crystals and cubic halite crystals. Images in reflected light. Opl — opal, S — native sulfur, Rlg — realgar, As-S — arsenosulfurite, Syl — sylvite, Hl — halite.

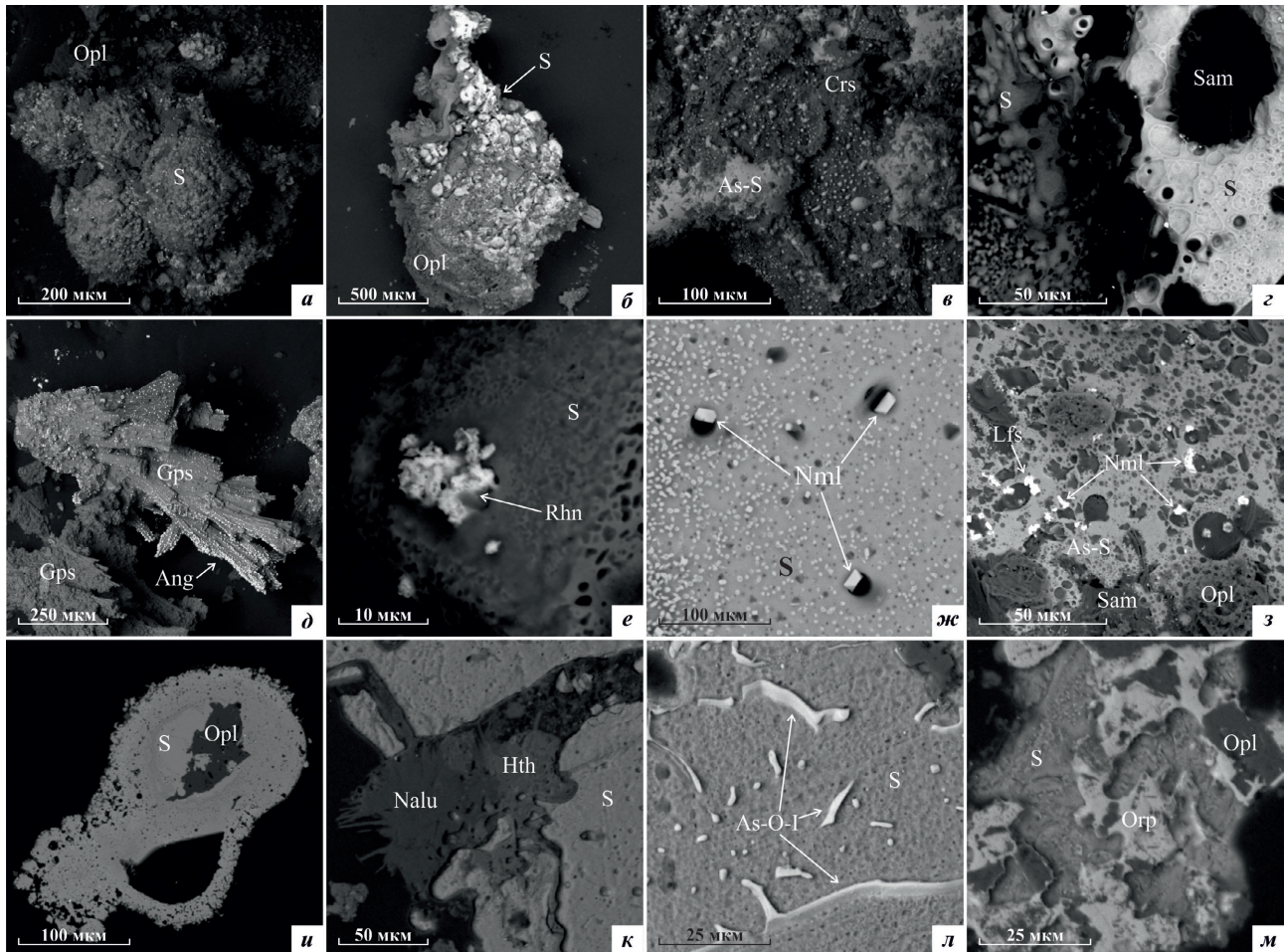


Рис. 4. Микроморфология неполированной поверхности инкрустаций: *a* — агрегаты самородной серы и опала; *б* — идиоморфные кристаллы самородной серы на опализованном андезите; *в* — капли арсеносульфурита на матрице кристобалита; *г* — оплавленная самородная сера с кристаллами нашатыря на поверхности; *д* — агрегат кристаллов гипса покрытый микрокристаллами англезита; *е* — рениит на кристалле самородной серы; *ж* — кристаллы наталиямаликита в порах поверхности самородной серы, светлые нанокристаллы также содержат таллий и йод; *з* — микрокристаллы наталиямаликита, лафоссаита и агрегаты опала на поверхности самородной серы. Микротекстура инкрустаций в полированном аншлифе: *и* — срез агрегата с рис. 4а; *к* — заполнение трещин в агрегате серы галотрихитом и натроалунитом; *л* — не идентифицированные фазы с йодом в сере; *м* — прорастания серы и аурипигмента. Изображения в обратно рассеянных электронах. S — самородная сера, Opl — опал, As-S — арсеносульфурит, Crs — кристобалит, Sam — нашатырь, Gps — гипс, Ang — англезит, Rhn — рениит, Nml — наталиямаликит, Lfs — лафоссаит, Hth — галотрихит, Nalu — натроалунит, Orp — аурипигмент, «As-O-I» — не идентифицированные фазы с йодом.

Fig. 4. Micromorphology of the unpolished incrustations surfaces: *a* — aggregates of native sulfur and opal; *б* — idiomorphic crystals of native sulfur on opalized andesite; *в* — droplets of arsenosulfurite on a cristobalite matrix; *г* — melted native sulfur with salammoniac crystals on the surface; *д* — an aggregate of gypsum crystals covered with anglesite microcrystals; *е* — rheniite on a native sulfur crystal; *ж* — nataliyamalikit crystals in the pores of the native sulfur surface, light nanocrystals also contain thallium and iodine; *з* — microcrystals of nataliyamalikit, lafossaite and opal aggregates on the surface of native sulfur. Microtexture of incrustations in a polished section: *и* — cross-section of the aggregate from Fig. 4а; *к* — fracture filling in a sulfur aggregate by halotrichite and natroalunite; *л* — unidentified phases with iodine in sulfur; *м* — intergrowths of sulfur and orpiment. Backscattered electron images. S — native sulfur, Opl — opal, As-S — arsenosulfurite, Crs — cristobalite, Sam — salammoniac, Gps — gypsum, Ang — anglesite, Rhn — rheniite, Nml — nataliyamalikit, Lfs — lafossaite, Hth — halotrichite, Nalu — natroalunite, Orp — orpiment, «As-O-I» — unidentified iodine-bearing phases.

Сассолин в образцах 2013–2024 гг. был представлен в виде прозрачных гексагональных кристаллов (до 500 мкм) с перламутровым блеском, ассоциирующих с самородной серой (рис. 3д). В полевом сезоне 2025 г. на ВФП впервые описаны белые агрегаты кристаллов сассолина, мощностью до 15 мм, развитые по трещинам в фумарольных корках (рис. 2в).

Макроскопическая зональность фумарольных полей. Каждое фумарольное поле неоднородно по температурам газовых выходов, текстурно-структурным особенностям агрегатов инкрустаций, минеральным ассоциациям. Наиболее наглядным признаком, объединяющим однотипные участки, служит преобладающий цвет агрегатов, по которому выделены четыре зоны: 1 — бело-желтая; 2 — желтая; 3 — оранжевая; 4 — серая. Установлено, что в одноименных зонах разных фумарол минеральный состав демонстрирует заметную степень сходства (табл. 2).

Бело-желтая зона ($T_{\text{газа}} \leq 100^\circ\text{C}$, $T_{\text{обр.}} 30\text{--}80^\circ\text{C}$) распространена на СЗГ и в краевых частях ВФП и ЗФП. Измененные породы рыхлые и слабосцементированные, покрыты агрегатами самородной серы и сульфатов; в подчиненном количестве присутствуют сильвин, галит и сассолин (рис. 2а–б). Характерны белые и зеленоватые игольчатые агрегаты и корочки галотрихит-пикерингита мощностью до 3 мм. Алуноген (рентгенофазовым анализом определен как метаалуноген) образует нечеткие прослойки толщиной до 4 мм в кристаллических агрегатах самородной серы (рис. 4к). Белые щетки кристаллов гипса образуют тонкие обособленные участки в полостях измененных пород и инкрустациях. Галит, сильвин и нашатырь, выполняют поры в опаловых агрегатах, реже образуют отдельные кристаллы (рис. 3е, 4г).

Желтая зона ($T_{\text{газа}} 80\text{--}200^\circ\text{C}$, $T_{\text{обр.}} 80\text{--}110^\circ\text{C}$) представлена на СЗГ, ВФП и ЗФП. Сложена преимущественно самородной серой, в массивных кристаллических корках которой встречаются обломки агрегатов опала и редкие кристаллы других минералов, как новообразованных, так и привнесенных (рис. 2б–г, 4б). В пустотах развиваются щетки белых кристаллов ангидрита и гипса, часто покрытые микрокристаллами сульфатов или сульфидов (рис. 4д). В порах опаловых и серных агрегатов сохраняются бесформенные тонкие прозрачные со стекляннным блеском агрегаты галита, редко встречаются белые агрегаты кубических кристаллов галита с иголками сильвина (рис. 3е). Сульфаты щелочных металлов и аммония (англезит, тенардит, арканит, масканьит, глауберит, афтиталит, годовиковит) встречаются в виде агрегатов кристаллов до 300 мкм. Барит диагностирован в виде пластинчатых кристаллов <10 мкм и их агрегатов

до 150 мкм. Йодсодержащие фазы присутствуют в виде аморфных пленок на самородной сере (йод до 15 вес. % по данным СЭМ) и четко ограниченных фаз переменного состава, содержащих по данным СЭМ: мышьяк (22–58 вес. %), йод (15–28 вес. %), кислород (15–30 вес. %) (рис. 4л).

Оранжевая зона ($T_{\text{газа}} \geq 200\text{--}350^\circ\text{C}$, $T_{\text{обр.}} \geq 110^\circ\text{C}$) на ВФП занимает значительно большую площадь чем на ЗФП, и не проявлена на СЗГ. Макроскопическая окраска фумарольных корок варьирует от оранжевой до темно-красной, блеск жирный до стекляннного (рис. 2б–г). Вариативность цвета серы обусловлена концентрациями примесей и изменениями при нагреве (Naranjo, 1985). В оранжевой зоне на ВФП самородная сера содержит максимальные примеси As, Sb, Te, Se и I (рис. 4м). На оплавленных поверхностях серы и арсеносульфурита найдены наибольшие количества микрокристаллов: реальгара (призматические кристаллы до 50 мкм), аурипигмента (короткопризматические кристаллы с искривленными гранями до 50 мкм и натечные агрегаты), галенита (кубические и гексоктаэдрические кристаллы до 150 мкм), сфалерита (тетраэдрические кристаллы до 20 мкм и зернистые агрегаты), пирита (кубические кристаллы до 300 мкм), киновари (ромбоэдрические кристаллы < 10 мкм), висмутита и халькопирита (< 50 мкм), касситерита (< 40 мкм), арсенолита (октаэдрические кристаллы < 30 мкм). Единичные зерна рениита ксеноморфные и не превышают 20 мкм, агрегаты — 50 мкм (рис. 4е). Изометричные кристаллы наталиямаликита и, редко, лафоссаита, находятся в кавернах оплавленной поверхности самородной серы (рис. 4ж–з) (Okrugin et al., 2017).

Серая зона ($T_{\text{газа}} \geq 350^\circ\text{C}$) приурочена к наиболее высокотемпературным фумарольным жерлам на ЗФП и ВФП (рис. 2б–г). Вулканическая порода (андезибазальт, андезит) в таких корках выглядит макроскопически черной. Инкрустации тонким слоем покрывают породу и состоят из агрегатов кристобалита, щеток безводных сульфатов и кристаллов сульфидов As, Fe, Pb, Cd, Zn, Cu, Hg. Размер отдельных кристаллов сульфидов редко превышает 50 мкм. Самородной серы в таких образцах не встречено.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пространственная неоднородность фумарольных полей вулкана Авачинский (различия температурного режима отдельных фумарол, их морфологии и структуры) обуславливает взаимное частичное перекрытие разнотемпературных минеральных ассоциаций в пределах каждого из них.

Таблица 2. Зонирование минеральных ассоциаций инкрустаций фумарол Авачинского вулкана

Table 2. Zoning of mineral associations in fumarolic incrustations of the Avachinsky volcano

		Фумарольные поля		
		СЗГ	ЗФП	ВФП
Зоны минеральных ассоциаций	Серая $T_{\text{газа}} \geq 350^{\circ}\text{C}$	-	Anh >> Py	Crs >> Anh > Gn, GnK, Sp, Ccp, Rhn
	Оранжевая $T_{\text{газа}} \geq 200 \sim 350^{\circ}\text{C}$	-	S, Crs >> As-S, Rlg, Orp, Syl, Brt, Aso, Cst, As-O-I, Nml	S, Crs >> As-S, Orp > Rlg, Aso, Nml, As-O-I, Lfs, Gn, GnK, Sp, Ccp, Rhn, Bit, God, Msc, Cin
	Желтая $T_{\text{газа}} \sim 80-200^{\circ}\text{C}$	S, Opl >> Gp	S, Opl, Crs >> Sso > Sam, Hl, Hem, Py, Syl, Ang, Brt, Thn	S, Opl >> Sso > Hl, Py, Thn, Arc, Glb, Att, Gp, Sam, Cst, Ang, Brt
	Бело-желтая $T_{\text{газа}} \leq 100^{\circ}\text{C}$	S, Opl, Pkg, Hth > Alg, Gp, Alu, Anh, Hem, Hl, Sso > Sam, Glb, Nalu, Py, God, Syl, Brt, Ccp, Cin	S >> Alu > Nalu, Alg, Hth, Pkg	Opl, S >> Alu, Syl, Hl, Nalu, Hth, Hem, Cin

Примечание. Аббревиатуры минералов расшифрованы в табл. 1. Преобладание (>) и резкое преобладание (>>) предыдущих минеральных фаз над последующими. СЗГ — фумарольное поле на СЗ гребне кратера. ЗФП — Западное фумарольное поле. ВФП — Восточное фумарольное поле.

Note. Mineral abbreviations are given in Table 1. Preponderance (>) and sharp preponderance (>>) of preceding mineral phases over the following ones. СЗГ — fumarole field on the northwestern crater ridge; ЗФП — Western fumarole field; ВФП — Eastern fumarole field.

На протяжении длительного периода исследований (2013–2025 гг.) резких изменений в соотношениях главных минералов инкрустаций фумарольных полей (самородной серы, опала, кристобалита) не отмечено. В изученной коллекции отсутствуют минералы низкотемпературной стадии и зоны гипергенеза (лимонит, ральстонит, вольтаит, халькантит), отмеченные в ранних публикациях (Серафимова и др., 2002). Вероятно, зона образования этих фаз в настоящее время сместилась в периферийную часть фумарольных полей и парящих площадок, где они локализируются в виде сезонных выцветов. Возможные причины — вариации температурного режима и состава вулканических газов в разные периоды отбора, а также долговременная эволюция морфологии фумарольных площадок.

Минеральный состав инкрустаций ЗФП характеризуется большей изменчивостью. В 2013–2015 гг. инкрустации были сконцентрированы в непосредственной близости от трещины и

представлены желтыми и зеленоватыми кристаллическими и натечными агрегатами самородной серы, кристобалитом, опалом, нашатырем и, редко, сассолином. Образцы 2023–2025 гг. ($T_{\text{газа}} 150-650^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{обр.}} 95-350^{\circ}\text{C}$) представляют собой массивные агрегаты желто-оранжевой серы, опаловые корки с серой и алунитом, корки с серой и арсеносульфуритом. Локальные скопления мощностью до 1 мм образуют агрегаты полупрозрачных кристаллов нашатыря, сильвина, галита, ярко-красного реальгара. Наибольшее разнообразие аксессуарных минералов диагностировано на оплавленной поверхности серы и пленках арсеносульфурита (табл. 1). Низкотемпературные инкрустации, обрамляющие фумарольное поле вплоть до верхней кромки кратера, сложены алунитом, натроалунитом, алуногеном, галотрихитом, пиккерингитом (Плутахина, Малик, 2025).

Полевые работы на ВФП в августе 2025 г. проводились после Камчатского мегаземлетрясения

(29 июля 2025 г., 23:24 UTC; (Chebrov et al., 2026)). Помимо незначительного изменения рельефа лавовой пробки непосредственно рядом с ВФП, зафиксировано существенное увеличение площади распространения и мощности агрегатов сассолина (по сравнению с полевыми сезонами 2013–2024 гг.).

Рост борсодержащих минералов в инкрустациях после сейсмического события может указывать на активизацию глубинных флюидов, обогащенных летучими В и Cl. Это согласуется с данными по андезитовым вулканам, где бор рассматривается как индикатор магматической дегазации (Inostroza et al., 2025). Увеличение доли боратов может служить одним из предварительных признаков изменения режима дегазации, особенно в условиях межэруптивной стадии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С момента последнего извержения (2001 г.) на Авачинском вулкане наблюдается стабильная фумарольная активность, формирующая обширные минеральные ассоциации уникального состава. Проведенные исследования позволили получить и систематизировать информацию о минеральных ассоциациях инкрустаций фумарольных полей вулкана.

Продолжение режимных наблюдений может способствовать выявлению конкретных минералого-геохимических критериев активизации вулкана.

Автор выражает признательность коллегам за помощь в получении, подготовке и обработке каменного материала, изготовлении сложных полированных препаратов для дальнейших исследований и за ценные советы при работе над рукописью. Особая благодарность анонимным рецензентам за рекомендации, позволившие улучшить работу.

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР ИВиС ДВО РАН № FWME 2024 0006 «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества в процессах минерало-рудогенеза».

Список литературы [References]

Базанова Л.И., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др. Потенциальная опасность от извержений Авачинского вулкана // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. С. 390–407 [Bazanov L.I., Braytseva O.A., Melekestsev I.V. et al. Potential hazards from the Avachinsky volcano eruptions // Geodinamika i vulkanizm Kurilo-Kamchatskoy ostrovoduzhnoy

sistemy. Petropavlovsk-Kamchatskiy: IVGiG DVO RAN. 2001. P. 390–407 (in Russian)].

Дрознин В.А., Дубровская И.К. Фумарольная активность вулкана Авачинский в 2004–2005 гг. (дистанционные измерения) // Проблемы взрывчатого вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Материалы первого международного симпозиума. 25–30 марта 2006 г. Отв. редактор чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 120–126 [Droznin V.A., Dubrovskaya I.K. Avachinsky volcano fumarolic activity in 2004–2005 (remote sensing measurements) // Explosive volcanism phenomena (for the 50th anniversary of the catastrophic eruption of Bezymianny volcano). Proceedings of the First International Symposium. March 25–30, 2006. Editor-in-chief E.I. Gordeev. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2006. P. 120–126].

Заварицкий А.Н. Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г. // Труды ЦНИГРИ. 1935. № 35. С. 3–36 [Zavaritsky A.N. The Avacha volcano in Kamchatka and its condition in the summer of 1931 // Trudy TsNIGRI. 1935. № 35. P. 3–36 (in Russian)].

Зубин М.И., Федоров М.В., Чирков А.М. и др. Кратер вулкана Авача и его состояние летом 1961 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 36. С. 24–36 [Zubin M.I., Fedorov M.V., Chirkov A.M. et al. Krater vulkana Avacha i ego sostoyanie letom 1961 g. // Bulletin vulcanologicheskikh stantsii. 1964. №36. P. 24–36 (in Russian)].

Кирсанов И.Т., Медведева Г.Г., Серафимова Е.К. Фумарольная деятельность Авачинского и Корякского вулканов // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 38. С. 3–32 [Kirsanov I.T., Medvedeva G.G., Serafimova E.K. Fumarol'naya deyatel'nost' Avachinskogo i Koryakskogo vulkanov // Byulleten' vulkanologicheskikh stantsiy. 1964. № 38. P. 3–32 (in Russian)].

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., Плутахина Е.Ю., Николаева И.Ю. Вынос микроэлементов фумаролами Авачинского вулкана (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2024. № 3. Вып. 63. С. 74–90. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-3-63-74-90> [Malik N.A., Plutakhina E.Y., Nikolaeva I.Y. Trace Element Emission by Fumaroles of Avachinsky Volcano (Kamchatka). Russian Journal of Pacific Geology. 2025. V. 19. Suppl. 1. P. 27–41. <https://doi.org/10.1134/S1819714025700125>].

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)].
- Масуренков Ю.П., Егорова И.А., Пузанков М.Ю. и др. Вулкан Авачинский / Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука. 1991. Т. 2. С. 244–273 [Masurenkov Yu.P., Yegorova I.A., Puzankov M.Yu. et al. Vulkan Avachinskiy / Deystvuyushchiye vulkany Kamchatki. M.: Nauka. 1991. V. 2. P. 244–273 (in Russian)].
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н. и др. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926–1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3–23 [Melekestsev I.V., Braitseva O.A., Dvigalo V.N. et al. 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. II (1926–1991) // *Volcanology and Seismology*. 1994. V. 16. № 2. P. 93–114].
- Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеньюков С.Л. Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79–80 [Melekestsev I.V., Seliverstov N.I., Senyukov S.L. Informationsnoye soobshcheniye ob aktivizatsii v oktyabre 2001 vulkana Avachinskiy na Kamchatke i provedennykh issledovaniyakh // *Volcanology and Seismology*. 2002. № 2. P. 79–80 (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 XIX 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 vosgonah i sublimatah Avachinskogo vulkana (2014–2015 gg.) // *Materialy XIX regionalnoy nauchnoy konferencii «Vulkanizm i svyazannye s nim processy», posvyashchyonnoy Dnyu vulkanologa*, March 29–30 2016. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2016. P. 400–405 (in Russian)].
- Плутахина Е.Ю., Малик Н.А. Минеральный и фазовый состав возгонов Западного фумарольного поля Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога, 2025. С. 305–307 [Plutakhina E.Yu., Malik N.A. Mineral and phase composition of exhalations of the Western fumarole field of Avachinsky volcano (Kamchatka) // *Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVIII annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day*. 2025. P. 305–307 (in Russian)].
- Плутахина Е.Ю., Малик Н.А., Николаева И.Ю. Фазовый и химический состав высокотемпературных сублиматов Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2025. № 4. С. 22–41. <https://doi.org/10.31857/S0203030625040028> [Plutakhina E., Malik N., Nikolaeva I. The Chemical and Phase Composition of High Temperature Sublimates: Avachinsky Volcano, Kamchatka // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2025. № 19. P. 319–336. <https://doi.org/10.1134/S0742046325700204>].
- 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. Vulkanicheskiye eksglyatsii vulkana Avachinskiy v posteruptivnom protsesse posle izverzheniya v 1991 // *Volcanology and Seismology*. 2002. V. 4. P. 22–30 (in Russian)].
- Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза. Владивосток: Дальнаука, 2000. 336 с. [Yakhontova L.K., Zvereva V.P. The principles of hypergenesis mineralogy. Vladivostok: Dalnauka, 2000. 336 p. (in Russian)].
- Africano F., Bernard A., Korzhinsky M. High temperature volcanic gas geochemistry (major and minor elements) at Kudryavy volcano, Iturup island, Kuril arc, Russia // *Vulcanica*. 2003. V. 1. P. 87–94.
- Balić-Zunić T., Garavelli A., Jakobsson S.P. et al. Fumarolic Minerals: An Overview of Active European Volcanoes / Updates in Volcanology – From Volcano Modelling to Volcano Geology. 2016. P. 267–322. <http://dx.doi.org/10.5772/64129>
- Chebrov D., Matveenko E., Abubakirov I. et al. The July 29, 2025 Kamchatka Earthquake, MW 8.9: Examination Based on Regional Data Through End-2025 // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2026. V. 26. P. 1–32. <https://doi.org/10.2205/2026es001116>
- Inostroza M., Moune S., Aguilera F. et al. Lastarria volcano, a major emitter of boron and chalcophiles in northern Chile and the Central Volcanic Zone // *Chemical Geology*. 2024. № 670. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122416>
- Naranjo J.A. Sulphur flows at Lastarria volcano in the North Chilean Andes. // *Nature*. 1985. V. 313. P. 778–780. <https://doi.org/10.1038/313778a0>
- Okrugin V., Favero M., Liu A. et al. Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: nataljamalikit, TII, 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>
- Stoiber R.E., Rose W.I.J. Fumarole incrustations at active central American volcanoes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1974. V. 38. P. 495–516.

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИИ ИНКРУСТАЦИЙ
**MINERAL ASSOCIATIONS OF INCRUSTATIONS
FROM ZONAL FUMAROLE FIELDS OF AVACHINSKY VOLCANO, KAMCHATKA**

E.Yu. Plutakhina

*Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006;
e-mail: e.plutakhina@gmail.com*

Received October 31, 2024; revised August 20, 2026; accepted September 25, 2026

The results of a comprehensive mineralogical study of three fumarole fields of Avachinsky Volcano — the Northwestern crater rim, Western, and Eastern fields — are presented. A total of 142 samples of hydrothermally altered rocks and fumarolic incrustations collected during the field seasons of 2013–2025 were examined using optical microscopy, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. In the incrustations, 37 mineral species and three X-ray amorphous phases were identified. Based on the predominant color of the incrustations and the temperatures of the fumarolic gases, four zones of mineral assemblages were distinguished: white-yellow (< 100 °C), yellow (80–200 °C), orange (200–350 °C), and gray (> 350 °C). For the first time, a significant increase in the distribution area and thickness of sassolite aggregates in the Eastern fumarolic field following the Kamchatka megathrust earthquake of June 29, 2025, is described, which may indicate the activation of deep-seated fluids.

Keywords: Avachinsky volcano, fumaroles, mineral associations, incrustations.