

УДК 552.313+549.01

РУДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МИНЕРАЛЫ В ВОЗГОНАХ ВУЛКАНА АЛАИД (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА)

© 2024 г. В. В. Петрова^{а, *}, В. А. Рашидов^{б, **}, А. Б. Перепелов^с,
В. И. Силаев^д, Л. П. Аникин^б, Н. В. Горькова^а, В. В. Михеев^а

^аГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^сИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
ул. Фаворского, 1А, а/я 9, Иркутск, 664033 Россия

^дИнститут геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н.П. Юшкина,
ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167982 Россия

*e-mail: v.petrova.v@gmail.com

**e-mail: rashidva@kscnet.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 06.12.2023 г.

Изучены возгоны, опробованные в 2013–2020 гг. в прикратерной зоне и на склонах вулкана Алаид, расположенного в Курильской островной дуге. Установлено, что в прикратерной зоне присутствуют самородные металлы, приуроченные к зонам кислотного выщелачивания, в пределах которых исходные лавы и туфы превращены в опаловидные образования или породы, резко обогащенные гидроксидами трехвалентного железа. В этих зонах установлено присутствие самородных золота, палладия, серебра, хрома, меди, цинка и сплавов золота и палладия, меди и цинка, меди и вольфрама. На склонах вулкана Алаид номенклатура минералов в возгонах шире, при этом температура их образования — ниже. Из рудных минералов преобладают медьсодержащие и установлены возгоны с ванадийсодержащими минералами, относящимися к водосодержащим оксидам и ванадато-силикатам. Выделено два генетических типа склоновых возгонов: 1) минералы, кристаллизующиеся из гидротермальных или парогидротермальных растворов вблизи выходов приповерхностных фумарол и 2) медные и железистые коломорфные образования, сформированные в результате выпадения осадка из коллоидных растворов на мелководье пересыхающих водоемов, в том числе мелких и крупных луж.

Ключевые слова: вулкан Алаид, возгоны, рудные элементы и минералы, прикратерная зона, склоны, атакамит

DOI: 10.31857/S0203030624020075, EDN: LGGWJX

ВВЕДЕНИЕ

Возгоны — это постоянные или эфемерные минеральные соединения, наблюдаемые в кратерных или трещинных зонах активных вулканов. Их образование обычно объясняется выделением из магмы летучих компонентов (H_2O , HCl , NH_4Cl , H_3BO_3 , H_2S , CO_2 , P_2O_5 и др.) и их соединений с элементами, выщелоченными из окружающих материнских пород или поступающими с гидротермальными растворами.

Новообразованные соединения обычно отвечают по составу оксидам, галогенидам и гидратам таких элементов, как Fe, As, Sb, Hg, Cu и др.

Минеральные соединения возгонов часто бывают короткоживущими (эфемерными) и подверженными изменению. Агрегаты возгонов обычно содержат несколько полиморфных модификаций одного и того же минерала. Эти особенности затрудняют изучение возгонов, но не умаляют, а напротив, увеличивают значимость

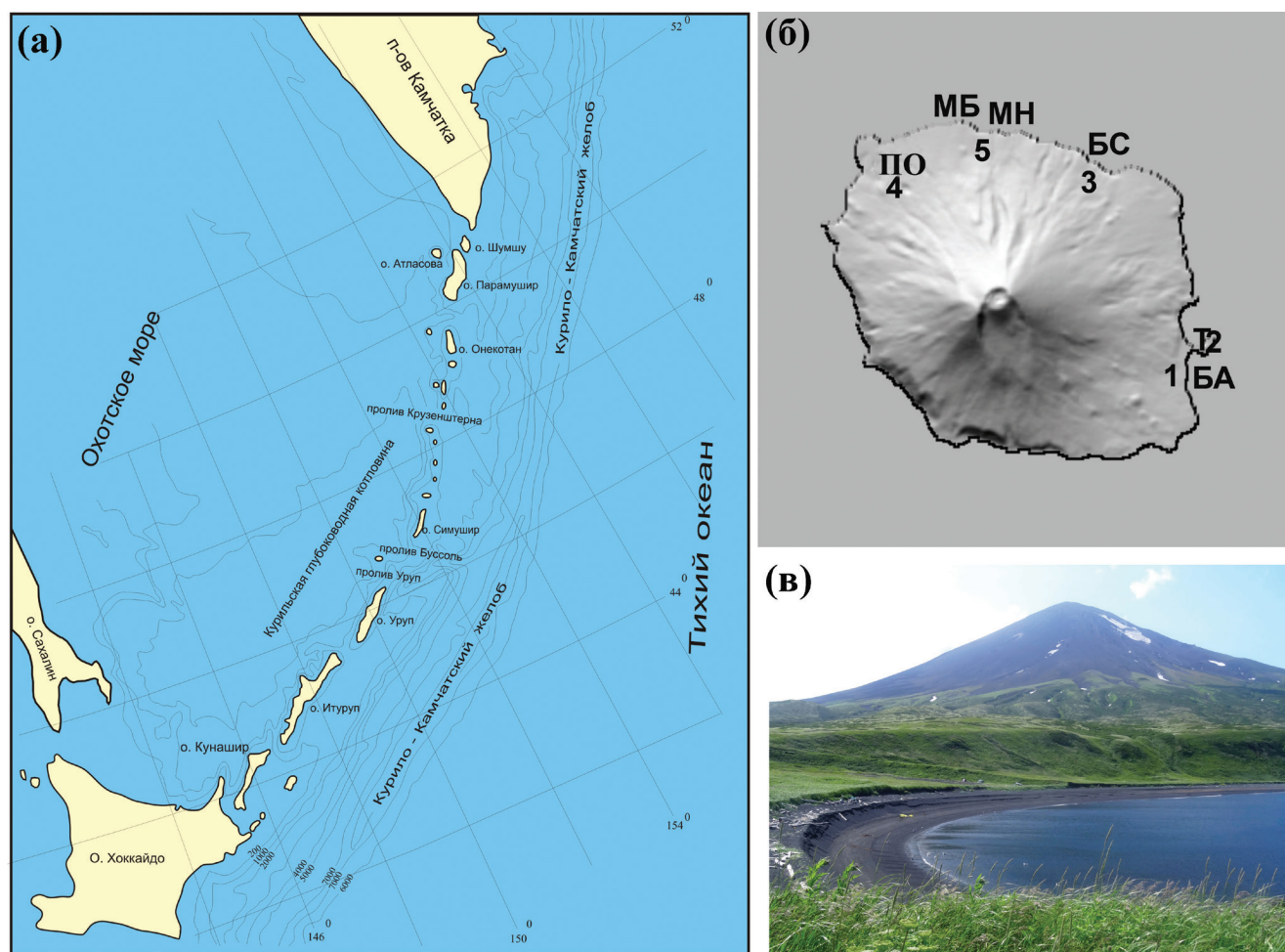


Рис. 1. Местоположение о. Атласова (а), места опробования возгонов (б), вулкан Алаид (в).

1 – бухта Алаидская (БА); 2 – побочный конус Такетомы (Т); 3 – бухта Северная (БС); 4 – прорыв Олимпийский (ПО); 5 – участок между мысами Бородавка (МБ) и Ночной (МН).

минералов этого генезиса для понимания процессов минералообразования на завершающих этапах вулканической активности. Изучение состава возгонов позволяет получить важную информацию о вулканических газах и переносимых ими веществах, в том числе металлических фаз.

Породы вулкана Алаид, расположенного на о. Атласова в северной оконечности Курильской островной дуги (КОД) (рис. 1), представлены трахибазальтами и трахиандеизбазальтами, относятся к высококалиевой известково-щелочной серии и отличаются повышенными содержаниями Al_2O_3 и умеренной магнезиальностью. Редкоэлементные характеристики пород вулкана указывают на их принадлежность к типично надсубдукционным магматическим образованиям с низкими содержаниями HFSE – высокозарядных мелкоионных (Ti, Nb,

Ta) и повышенными концентрациями низкозарядных крупноионных – LILE (K, Rb, Sr, Pb) [Диденко и др., 2021].

В 2013–2020 гг. на склонах и вершине вулкана Алаид, были опробованы возгоны [Петрова и др., 2019, 2020; Рашидов, Аникин, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020а, 2020б; Рашидов и др., 2013]. Настоящая статья посвящена обобщению результатов исследования этих возгонов, отобранных в прикратерной зоне и на склонах вулканической постройки.

РУДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МИНЕРАЛЫ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ КОД

Для того, чтобы оценить вклад возгонов в баланс вещества при протекании вулканических процессов, проведем оценку металлогенической нагрузки, характерной для вулканических пород КОД.

Золото и полиметаллы

Изучению золота в вулканических породах КОД посвящен целый ряд работ [Абдурахманов, Федорченко, 1984; Аношин, 1977; Антонов, 2001; Антонов и др., 1992; Данченко, 1991, 1999, 2003; Курильские ..., 2004; Леонова, 1979; Федорченко и др., 1989; Юдовская и др., 2003; Shevko et al., 2018]. По данным [Леонова, 1979] в пределах КОД среднее содержание золота практически одинаково в породах различной щелочности и кремнекислотности, составляя 0.5–1.5 мг/т. По данным [Аношин, Кепежинкас, 1972] содержание золота изменяется в интервале от 1.96 до 2.98 мг/т и не зависит от основности пород. По данным [Абдурахманов, Федорченко, 1984; Федорченко и др., 1989] в четвертичных лавах вулканов Чипой, Кетой и Броутона концентрации золота варьируют в диапазоне от 0.58 до 1.52 мг/т, а в лавах вулкана Тятя — в диапазоне 1.02–22.10 мг/т.

В работе [Антонов и др., 1992] рассмотрено 19 подводных и 9 наземных вулканических построек в пределах центральной и южной частей КОД и установлено, что количество золота в них находится в диапазоне 0.26–16 мг/т, достигая максимума в базальтах. Позднее в работе [Антонов, 2001] было рассмотрено распределение золота еще в 12 подводных и 9 наземных вулканических постройках северной части и северной оконечности центрального сектора КОД, в которых концентрация этого металла установлена в пределах 0.3–10 мг/т с максимумом в андезибазальтах и андезитах.

В работах [Данченко, 1991, 1999, 2003] установлено, что в пределах КОД наблюдается существенное распространение Au-Ag минерализаций, связанных с гидротермальными системами с температурами 50–580°C и представляющих промышленный интерес. Вместе с Au и Ag в рудопроявлениях отмечены также повышенные концентрации Y, Sc и Re.

Наряду с этим геохимия золота и полиметаллов в возгонах обсуждается лишь в ограниченном количестве публикаций. К настоящему времени наиболее детально исследованы возгоны вулкана Кудрявый на о. Итуруп [Кременецкий, Чаплыгин, 2010; Рыбин и др., 2000; Чаплыгин, 2009; Чугаев и др., 2007; Africano et al., 2003; Ganino et al., 2019; Korzhinsky et al., 1994; Taran et al., 1995; Wahrenberger et al., 2002 и др.].

В работе [Рыбин и др., 2000] отмечается, что содержание Au на вулкане Кудрявый достигает первых г/т на участках развития рениита (ReS_2) при температуре 500–580°C. И.В. Чаплыгин [2009] показывает, что на вулкане Кудрявый золото отлагается как в самородном виде, так и в соединениях с другими металлами (Au-Ag) и (Cu-Au-Ag) в интервале температур 290–870°C. М.А. Юдовская с соавторами [Юдовская и др., 2003] описали находку Au в ассоциации с магнетитом и K-Na-хлоридами в отложениях высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый при температуре ~ 800°C. Новосибирскими исследователями [Shevko et al., 2018] в фумарольных инкрустациях вулкана Эбеко обнаружена Au-Pd минерализация в ассоциации с аргентитом (Ag_2S) и сульфидом меди.

Медь

По данным [Абдурахманов, Федорченко, 1984; Абдурахманов и др., 1989; Федорченко и др., 1989] содержание Cu в породах КОД уменьшается с понижением их основности и достигает минимума в породах умеренной (148 г/т) и повышенной щелочности (150 г/т).

По данным [Подводный ..., 1992] содержание Cu в лавах подводных вулканов КОД изменяется от 1.7 до 279 г/т, но для одного образца, драгированного в северной части КОД на подводном вулкане 1.3, получено значение в 600 г/т. Содержание меди в эффузивных породах на севере о. Парамушир изменяется от 48 до 190 г/т [Газогидротермы ..., 2013].

По данным [Абдурахманов и др., 1978] содержание Cu в лавах постройки вулкана Алайд составляет 23–240 г/т, а в его побочных конусах — 70–260 г/т, а по данным [Подводный..., 1992] — 118 г/т и 233–269 г/т соответственно.

В публикациях сахалинских вулканологов приводятся данные по содержанию меди в отдельных магматических минералах. Количество Cu в плагиоклазах вулкана Эбеко составляет 31–48 г/т, в оливинах базальтов вулкана Алайд — 50–110 г/т, в базальтах вулкана Тятя — 44 г/т, в моноклинных и ромбических пироксенах дацандезитов вулкана Головина, соответственно 11 г/т и 24 г/т [Абдурахманов, Федорченко, 1984; Федорченко и др., 1989].

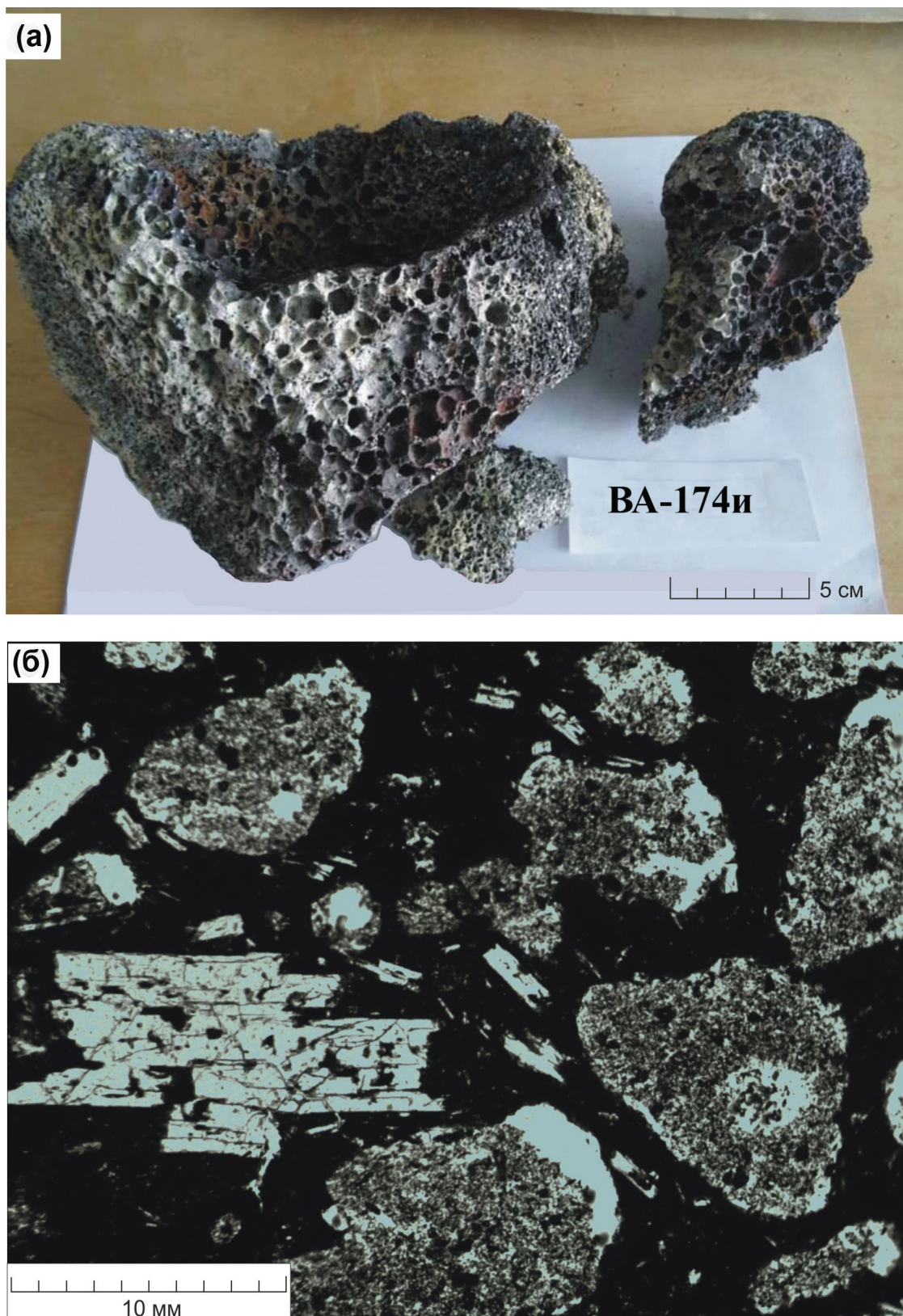


Рис. 2. Пористая прикратерная порода.

а — природный штупф, порода замещена опалом (белое) и гидроксидами железа (кирпично красное); б — участок породы, поровые пространства загрязнены полировочным порошком, вкрапленники плагиоклаза разбиты трещинами, основная масса полностью изменена. Оптический микроскоп, без анализатора.

Таблица 1. Состав пород терминального извержения 2015–2016 гг. вулкана Алаид, содержащих возгоны

№ обр.*	174/1и	174/2и	174/3и	174/4и	195и	198/2и	198/3и	198/4и	198/5и
SiO ₂	49.23	50.56	57.84	55.17	53.55	54.52	55.15	55.36	74.48
TiO ₂	0.97	1.05	1.02	1.02	1.12	1.04	1.07	1.10	1.16
Al ₂ O ₃	20.23	18.47	14.53	15.86	17.64	17.31	17.18	17.14	4.91
Fe ₂ O ₃	9.50	9.51	5.77	6.15	5.21	9.02	3.23	3.62	6.51
FeO	2.31	3.19	4.65	5.36	4.52	0.60	5.94	5.00	0.18
MnO	0.18	0.20	0.19	0.19	0.22	0.18	0.20	0.21	0.05
CaO	2.49	2.44	2.05	2.15	2.28	1.95	2.10	1.93	0.58
MgO	9.58	8.93	7.16	8.12	9.29	7.81	8.65	9.05	1.34
Na ₂ O	2.77	2.42	2.04	2.20	2.23	2.62	2.84	2.42	0.51
K ₂ O	1.81	1.69	1.79	1.75	1.89	1.93	1.99	1.98	1.61
P ₂ O ₅	0.21	0.21	0.19	0.20	0.26	0.23	0.24	0.24	0.09
LOI	0.45	1.02	1.74	1.54	1.10	2.52	0.56	1.16	8.36
Сумма	99.74	99.64	99.49	99.48	99.30	99.73	99.15	99.22	99.77
CO₂	0.24	<0.1	0.27	<0.1	0.28	<0.10	0.23	<0.10	0.22
S	<100	310	344	447	180	391	122	514	944
Sc	28	27	30	27	25	28	32	28	17
V	282	273	281	290	310	272	294	283	190
Cr	11	14	12	14	11	<5.0	<5.0	5.7	9
Co	28	27	19	21	17	13	19	18	8.5
Ni	13	11	8	12	15	12	13	16	8
Cu	114	252	153	140	72	83	111	105	234
Zn	67	76	77	74	74	62	74	71	38
Ga	21	23	20	20	23	22	22	22	13
Rb	40	49	45	47	50	47	50	49	70
Ba	368	401	374	390	423	414	406	439	330
Sr	679	638	571	592	618	596	610	612	250
Y	21	21	22	22	24	17	22	23	7.9
Zr	87	92	92	93	94	90	94	96	134
Nb	3.5	4.1	4.5	4.7	4.3	3.9	4.5	4.0	7.9
Mo	<2.0	<2.0	<2.0	2.4	3.6	<2.0	<2.0	<2.0	5.3
Pb	4.4	22	7.1	8.6	9.4	3.2	5.8	9.8	18.7
Th	3.2	4.8	<2.0	2.0	3.0	3.1	3.1	3.3	2.9

Примечание. Содержания оксидов петрогенных элементов даны в вес. %, редких элементов – в ppm; < – ниже предела обнаружения; № обр.* – индексы образцов “ВА-”. Координаты места отбора образцов: 50°51'13.43" с.ш. и 155°33'24.41" в.д. Анализы выполнены в Аналитическом центре Геологического института (ГИН) РАН.

РУДНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МИНЕРАЛЫ В ВОЗГОНАХ ВУЛКАНА АЛАИД

Остров-вулкан Алаид расположен на о. Атласова в северной оконечности КОД (см. рис. 1).

С северо-запада к нему примыкает подводный вулкан Григорьева. Эти два вулкана составляют единый наземно-подводный вулканический массив Алаид размером 23×30 км, вытянутый

в северо-западном направлении [Блох и др., 2006а, 2006б].

В период с 1 октября 2015 г. по 18 августа 2016 г. происходило очередное терминальное извержение вулкана Алайд. 24 октября 2018 г., 29 сентября 2019 и 2 октября 2020 г. нам удалось попасть на вершину вулкана Алайд и опробовать продукты этого извержения.

Истории вулканической деятельности вулкана Алайд, петрологии и геохимии его лав посвящено большое количество научных работ [Абдурахманов и др., 1978; Авдейко и др., 1974; Горшков, 1967; Федорченко и др. 1989; Флеров и др., 1982 и др.]. Последнее подробное обобщение, включающее результаты исследований продуктов извержения 2015–2016 гг., выполнено А.Н. Диденко с соавторами [Диденко и др., 2021]. Цитируемыми авторами показано, что среди пород, слагающих постройку вулкана Алайд, подавляющую часть составляют лейкократовые (пироксен-плагиоклазовые и плагиоклазовые) и меланократовые (оливиновые) с повышенной калиевой щелочностью базальты, в весьма ограниченном количестве отмечаются пироксен-оливиновые андезибазальты. Продукты последних извержений как терминального, так и побочных конусов, однотипны по химическому и минеральному составам.

Распределение рудных элементов и минералов в возгонах вулкана Алайд изучено на основе коллекции проб и образцов, отобранных в прикратерной зоне и на различных склонах вулкана в 2013–2020 гг. Образование минералов этого генетического типа связывают с деятельностью летучих компонентов, отделившихся от магмы в процессе ее кристаллизации. Предыдущими исследованиями при изучении возгонов, образовавшихся в процессе латерального извержения в 1972 г. (прорыв Олимпийский), было выделено 28 минералов, относящихся к кислотным солям, оксидам, галоидным соединениям и самородным металлам [Авдейко и др., 1974; Вергасова, 1977]. В число этих минералов вошли минералы-концентраторы Al, V и Mo: хлоралюминит $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, шербинаит V_2O_5 , ильземаннит $\text{Mo}_3\text{O}_8 \times n\text{H}_2\text{O}$.

Возгоны вулкана Алайд детально изучались в лабораторных условиях [Житова и др., 2020; Петрова и др., 2019, 2020; Рашидов, Аникин, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020а, 2020б;

Таблица 2. Составы (вес. %) опаловидного материала из пород прикратерной зоны вулкана Алайд

Обр. ВА-174					
Точка	20	46	49	50	59а
№ п/п	1	2	3	4	5
SiO_2	92.63	81.22	91.25	83.29	74.13
Al_2O_3	1.11	7.20	2.78	7.42	6.90
Fe_2O_3^*	5.24		2.36	4.43	6.49
MgO				0.86	2.23
CaO			1.78	1.60	5.77
K_2O				1.02	2.39
P_2O_5				1.38	
PdO					0.91
Au_2O_3					1.19
Сумма	98.98	88.42	98.17	100.00	100.01

Примечание. Fe_2O_3^* – все железо в виде Fe_2O_3 .

Рашидов и др., 2013; Силаев и др., 2021]. Отметим, что в возгонах со склонов вулкана Алайд были сделаны первые для КОД находки атакамита $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ [Рашидов, Аникин, 2016] и фольбортита $\text{Cu}_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \times 2\text{H}_2\text{O}$ [Житова и др., 2020].

Возгоны прикратерной части вулкана приурочены к относительно высокотемпературным зонам кислотного выщелачивания. В этом процессе в породе в первую очередь разрушаются плагиоклазы (рис. 2). Разрушение первичных минералов идет с образованием дырчатой, ситовидной структуры, осуществляется привнос кремния и калия, вынос алюминия и кальция. Пересчеты химических анализов показывают, что при выщелачивании первичный, основной по составу, плагиоклаз превращается сначала в Са-К-, а затем в К-анортоклазы. Появляется низкотемпературный ортоклаз (адуляр). Среди нерудных новообразованных минералов зоны кислотного выщелачивания определен апатит. Его уплощенные кристаллы и “иглы” различных размеров пронизывают с поверхности материнскую породу. Конечной стадией преобразования породы является превращение всех ее компонентов в опал и гидроксиды железа. Химический состав лав терминального извержения 2015–2016 гг., содержащих возгоны, представлен в табл. 1.

Таблица 3. Составы (вес. %) железосодержащих возгонов в прикратерной зоне вулкана Алаид (обр. ВА-174и)

Точка*	1	3	5	6	7	9	12	19	21	23	24	28	32	35	38а	42
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	3.19		1.22	11.56	4.38	11.98	18.96	6.15	10.39	21.84	16.10	10.90	4.00	2.94	3.65	3.42
TiO ₂	9.05	3.16			10.11	8.57	4.50	5.62		2.48	1.59	1.90	8.52		2.01	
Al ₂ O ₃	2.76			0.46	4.47	6.19	4.11	3.97	3.13	0.63	0.38	1.80	5.27			
Cr ₂ O ₃			18.38	15.74					15.38							
FeO*	82.15	96.84	80.16	71.87	76.14	67.98	70.39	84.27	68.50	73.79	81.25	85.40	76.34	97.06	92.53	96.58
MgO	2.85				3.21	4.39			2.19	1.26			2.99			
CaO				0.37		0.89	2.04									
Na ₂ O																
K ₂ O									0.41							
Сумма	100.00	100.00	99.76	100.00	98.31	100.00	100.00	100.01	100.00	100.00	99.32	100.00	97.12	100.00	98.19	100.00

Точка*	4	8	10	11	13	14	15	16а	25	29	33	34	41	20	27	43
№ п/п	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
SiO ₂	46.53	35.23	44.87	51.57	34.80	40.77	27.01	28.20	35.45	33.64	58.53	37.72	33.39	1.13	11.52	7.75
TiO ₂	1.43	9.22	2.78	1.73	4.47	3.37	3.24		1.84	1.55	2.52	2.38	5.39	5.52	1.11	
Al ₂ O ₃	1.83	14.97	4.74	4.63	2.07	3.43	5.85	4.28	2.58	2.44	2.71	7.66		3.14		
Cr ₂ O ₃																0.59
FeO*	49.00	30.91	45.42	41.27	57.81	47.44	60.36	63.62	59.07	60.09	32.60	44.45	61.22	58.99	24.23	39.76
MgO								0.44				1.15		3.60		0.63
CaO		6.36	1.48	0.80		2.08	1.37	1.66		0.94	1.63	1.74				
Na ₂ O		2.54									2.06					
K ₂ O		0.77				2.92	1.16	0.66			0.78	1.94				
CO ₂																
Сумма	98.79	100.00	99.29	100.00	99.15	100.01	98.99	98.86	98.94	98.66	98.77	99.10	100.00	100.01	99.90	98.14

Примечание. Координаты места отбора образца: 50°51'13.43" с.ш. и 155°33'24.41" в.д. Точка* – точка определения состава минерала по данным микро-аналитических исследований; 1–16 – гидроксиды Fe (тетит, гидрогетит), 17–29 – силикаты (алюмосиликаты) Fe, 30–32 – карбонаты Fe. FeO* – все Fe в виде FeO; редкие примеси (вес. %): 5 – Ag₂O (0.24), 7, 15 – MnO (3.21, 1.01), 43 – ZnO (1.81), 32 – V₂O₅ (2.88), 16а – SO₃ (1.13).

Опал. К возгонам этот минералоид относится с определенной долей условности, так как к его образованию часто приводит полный вынос большинства элементов (кроме SiO_2) из вмещающих лав. На вулкане Алаид опал развивается по поверхности базальта в виде корок и натеков белого цвета, разного размера и мощности, а также частично или полностью заполняет поровые пространства. По химическому составу наиболее чистый опал содержит более 90 мас. % SiO_2 и незначительную примесь алюминия (табл. 2). Кроме того, элементами-примесями в нем являются железо, магний, калий и фосфор. Иногда опал содержит включения оксидов или силикатов железа, а также частиц самородных металлов.

Возгоны железа. Покровы, натеки и корки на базальтах рыжего, вишневого, красноватого цвета состоят главным образом из оксигидроксидов железа и оксидов титана с примесями кремния и алюминия. В незначительном количестве присутствуют железистые карбонаты.

В оксидных соединениях количество железа варьирует от 70 до 97%, при этом в образцах с минимальными концентрациями железа присутствует максимальная примесь оксида хрома (табл. 3). В одном случае вместе с оксигидроксидом железа встречено серебро. В единичных случаях совместно с окисным железом в возгонах обнаружены соединения Cu, Zn и V.

Второй разновидностью возгонов железа являются нестехиометричные соединения с кремнием и алюминием с очень широкими вариациями состава: $\text{SiO}_2 = 27\text{--}58$ мас. %, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2\text{--}15$ мас. %, $\text{FeO} = 30\text{--}63$ мас. %. Это свидетельствует о неравновесных условиях кристаллизации, не способствующих образованию минеральных форм. При достижении равновесия это могли бы быть, вероятно, железистые хлориты и (или) слюды.

Наиболее редкой группой железосодержащих возгонов являются карбонаты. Так же, как в случае оксидов, пересчет анализов на формулу минерала не дает стехиометричной формулы сидерита — наблюдается как избыток, так и недостаток железа. Это также указывает на неравновесность условий минералообразования. При своем осаждении карбонатные возгоны захватывали примеси Mg, Ti, Zn, Cr.

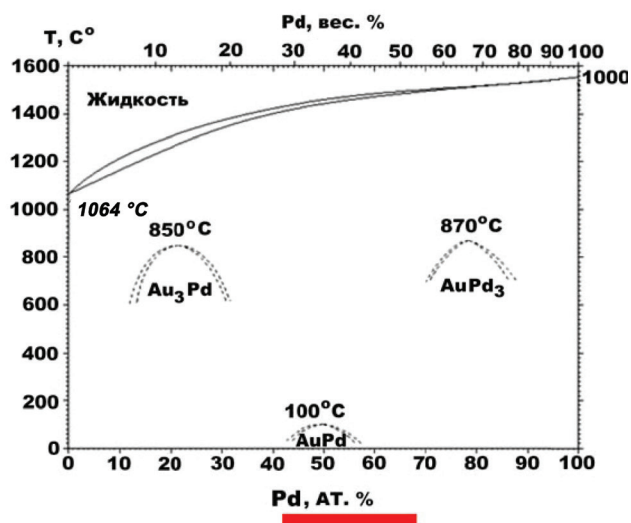


Рис. 3. Фазовая диаграмма для системы Au—Pd. Структурное упорядочение в фазовом поле подтверждено для двух высокотемпературных фаз — Au_3Pd и AuPd_3 , упорядоченная структура для состава Au-Pd может существовать при низких температурах. Красным цветом показан интервал колебаний состава выявленных и исследованных авторами золото-палладиевых сплавов.

Самородные золото, палладий, серебро, хром, медь, цинк, вольфрам. Среди перечисленных элементов в возгонах Алаида наиболее распространены золото и палладий, которые обычно встречаются совместно в форме сплава варьирующего состава — $\text{Pd}_{0.42\text{--}0.68}\text{Au}_{0.32\text{--}0.58}$ (табл. 4). Как правило, атомное количество палладия в этом сплаве превышает количество золота. По сравнению с порпечитом — самородным золотом с примесью Pd = 3–10 мас. % [Рид, 1986] и уже известными природными Au-Pd сплавами, выявленные в возгонах Алаида золото-палладиевые фазы выглядят уникальными. Подобные фазы природного происхождения недавно были обнаружены на поверхности тиманских туффизитовых алмазов [Сухарев и др., 2023]. Согласно диаграмме состояний системы (рис. 3) упорядоченная структура золото-палладия с примерно эквиатомными пропорциями металлов может существовать при температуре ниже 100°C.

Таким образом, в возгонах Алаида обнаружен крайне редко встречающийся золото-палладиевый сплав, присутствующий в виде тонких пластинок или изоморфных зерен размером до 10 мкм, редко крупнее, иногда присутствуют их мелкие прожилки (рис. 4а, 4б). Чаще всего этот

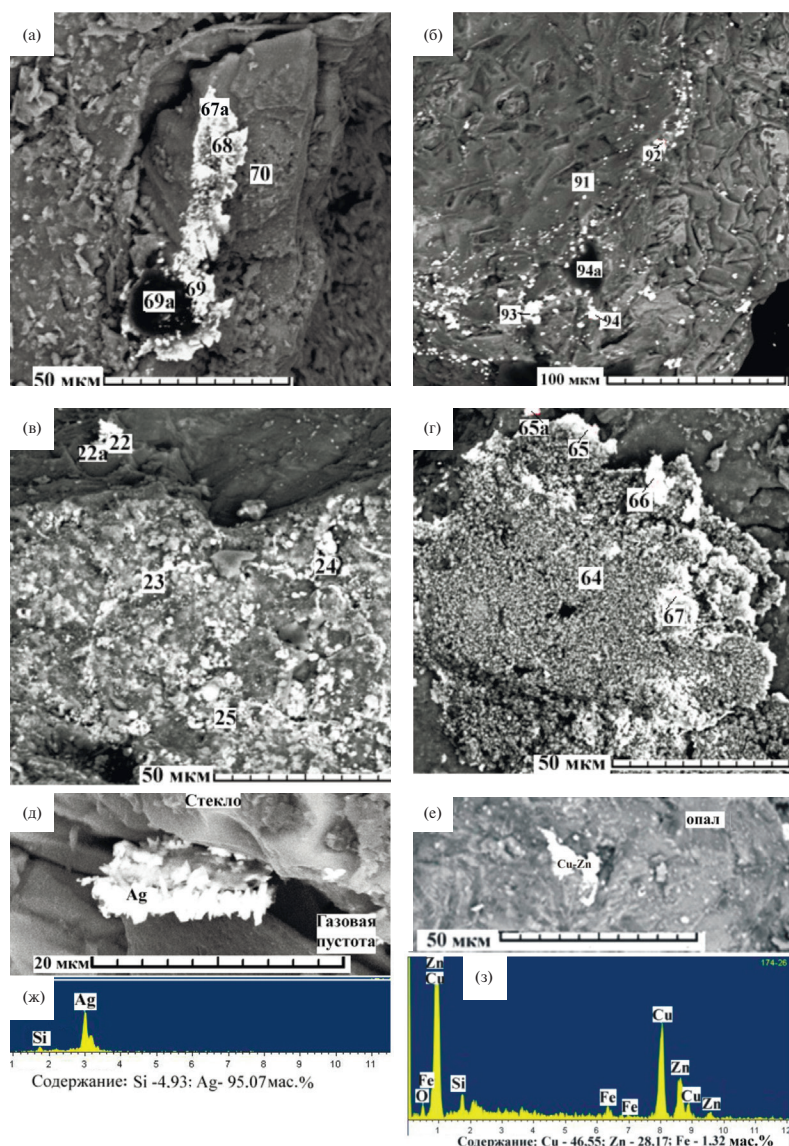


Рис. 4. Морфология возгонов золота, палладия, серебра и хрома – СЭМ-изображения (MV-2300 с приставкой для энергетического дисперсионного рентгеновского микроанализа INCA 200) в режиме упруго-отраженных электронов.

а – золото-палладиевые возгоны вблизи порового пространства, заполненного опалом, вариации содержаний золота и палладия в разных местах ярко белого выделения $\text{Au} = 21\text{--}33$, $\text{Pd} = 19\text{--}26$ мас. %, в центре заполненной опалом газовой пустоты золота нет, а содержание палладия падает до 5 мас. %; б – жилка самородного золота (ярко белые выделения) вблизи газовой пустоты, в бортах которой установлено повышенное CO_2 ; в – выделение самородного серебра вблизи поля развития оксигидроксидов железа; г – возгон хромовой зелени (эсколаит?), отороченный Cr-Au-Pd сплавами (ярко белое); д – выделение самородного серебра вблизи газовой пустоты в пористой стекловатой прикратерной породе; е – включение сплава Cu-Zn в опале; ж, з – типичные энергодисперсионные спектры, полученные от соответственно самородного серебра (рис. 4д) и латуни (рис. 4е).

Цифры на снимках соответствуют номерам точек химических анализов в табл. 2–4.

минерал приурочен к опаловым коркам, газовым пустотам, заполненным опалом, или к поровым пространствам, на стенках которых наблюдаются повышенные содержания углерода.

На Курильских островах золото-палладиевые сплавы были обнаружены и в возгонах вулкана

Эбеко [Shevko et al., 2018]. В этом случае, как и в вулкане Алаид, золото-палладий приурочен к опаловым коркам, срастаясь с сульфидами железа, меди и ртути.

Из сульфидов в возгонах Алаида нами определен только аргентит с незначительным

Таблица 4. Составы (вес. %) возгонов прикратерной зоны вулкана Алаид, содержащих редкие металлы (обр. ВА-174и)

Точка*	22	46	47	48	60	64	65	67	67a	68	69	74	75	76	92	93	94	94a
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	23.65	16.80	4.68	39.24	48.88		16.91		54.27	4.28	2.70	11.54	46.19	76.29	7.11	19.73	9.56	72.46
Al ₂ O ₃	8.83	1.70		1.64	3.07	5.83	8.10	12.81	1.36	4.44	7.19	2.48		2.33	1.98			10.55
Cr ₂ O ₃						94.17	62.63	23.35	4.76	46.33	28.21		2.76					
FeO*																		6.44
MgO	0.31																	
CaO	3.37				4.53									3.16				3.78
Na ₂ O					-			0.84	1.01									1.23
K ₂ O					3.20			7.07										
PdO		37.76	42.41	26.65	-		5.71	22.88	17.19	19.04	30.38	37.72	18.21	5.25				5.38
Au ₂ O ₃	2.00	43.74	52.91	32.47	40.31		6.64	33.05	21.41	25.91	31.51	48.26	32.84	12.96	90.91	80.27	90.44	0.17
Ag ₂ O	44.76																	
SO ₃	17.09																	
Сумма	100.01	100.00	100.00	100.00	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.00	100.00	100.00	100.01
Cr						64.43	42.86	15.98	3.26	31.70	19.30			4.56				4.67
Pd		32.82	36.86	23.17			4.96	19.89	14.94	16.55	26.41	32.79	15.83					
Au	1.78	38.99	47.17	28.94	35.93		5.92	29.46	19.09	23.09	28.09	43.02	29.27	11.56	81.03	71.55	80.62	0.15
Ag	41.67																	

Примечание. Обозначения см. табл. 2.

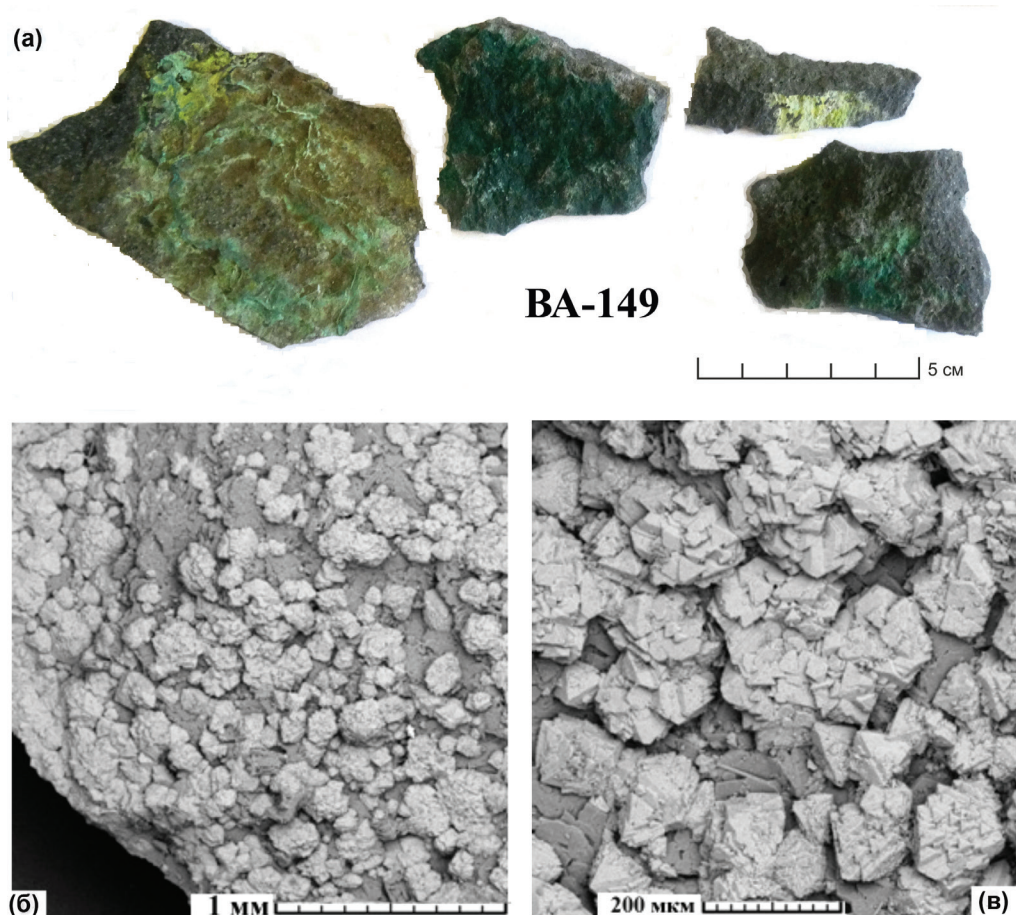


Рис. 5. Зеленые пленки поздних минеральных образований, плотно припаянных к материнским лавам. а — общий вид поздних зеленых минеральных пленок на поверхности материнских лав; б, в — морфология минералов, составляющих пленки (укрупнено, в разных масштабах). Сканирующий электронный микроскоп.

дефицитом серы и небольшой примесью (~1.5 мас. %) золота (см. табл. 4, точка 22). Кроме того, серебро встречено как незначительная примесь (до 0.22 мас. %) в хромшпинелиде.

Хром присутствует в двух минеральных формах — хромшпинелидах, в которых содержание Cr_2O_3 составляет 15–20 мас. %, и эсколаите (см. табл. 3, 4). Кроме того, не исключено, что хром, золото и палладий могут находиться в совместных соединениях с варьированием содержания хрома от 3 до 62 мас. % (см. табл. 4). Анализируя последовательность минералообразования (см. рис. 4в), можно заключить, что наиболее богатые золото-палладиевые соединения находятся в кайме выделений оксида Cr и осаждаются в конце процесса формирования фаз Cr-Au-Pd-состава. Возможно, что это происходит вследствие изменения кислотности минералообразования и при участии бактериального фактора.

Медь, цинк, вольфрам. Эти элементы встречаются в самородной и карбонатной формах (табл. 5). В латунях и карбонатах медь преобладает над цинком в пропорции 1.3–2.6 раз. Латунь встречается в виде тонких пластинок, дендритовидных форм и выделений с нечеткими очертаниями. Карбонаты близки к розазиту $(\text{Cu}, \text{Zn})_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$. Кроме этих минералов, в единичных зернах выявлен медно-вольфрамовый сплав состава $\text{W}_{0.49-0.52}\text{Cu}_{0.42-0.45}\text{Fe}_{0-0.05}\text{Ni}_{0-0.04}$, который еще не упоминался как природный. Все упомянутые фазы приурочены к газовым пустотам и участкам породы с повышенным содержанием CO_2 .

Возгоны на склонах вулкана Алаид. Большая часть таких возгонов наблюдаются в виде поверхностных пленок зеленого, желтого и белесого цвета на материнских лавах площадью до десятков м^2 и толщиной до 1 мм. Форма возгонов хорошо видна на рис. 5–7. Как

Таблица 5. Составы (вес. %) возгонов прикратерной зоны вулкана Алаид, содержащие Cu и Zn (обр. ВА-174)

Точка*	17	18	26	26а	36а	37в	39ав	40	44
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	4.47	21.18	4.97	1.60	15.22	5.83	10.29	8.43	38.62
TiO ₂					1.09				
Al ₂ O ₃	1.29	4.52				0.79	1.80	2.92	0.75
FeO*	6.36	1.83	1.70	1.04	4.72	0.98	2.40	1.05	
CaO					1.00			0.51	
K ₂ O	0.93								
ZnO	32.45	23.34	35.06	14.80	11.67	26.25	28.05	19.65	25.25
CuO	54.51	49.13	58.27	23.95	30.18	42.16	57.45	33.05	35.39
CO ₂				58.51	36.11	23.99		33.25	
SO ₃								1.13	
Сумма	100.00	100.00	100.00	99.99	99.99	100.00	99.99	99.99	100.01
Zn	26.07	18.75	28.17	11.89	9.38	21.09	22.53	15.79	20.28
Cu	43.54	39.25	46.55	19.13	24.11	33.68	45.90	26.41	28.27
C				15.97	9.86	6.55		9.08	

Примечание. Обозначения см. табл. 3.

правило, это плотно налегающие на породу зональные нарастания зеленоватых оттенков, возможно образованные в усыхающих мелко-водных бассейнах —минерализованных ван-нах (см. рис. 5а). Состав образцов, содержащих пленки возгонов, отобранных в различных ча-стях склонов о. Атласова (см. рис. 1), приведен в табл. 6. Обращает на себя внимание повы-шенное в них содержание меди, изменяющееся от 238 (побочный конус Такетоми) до 742 (бухта Северная) г/т. А содержание хрома 648 г/т в об-разце, отобранном на побочном конусе Таке-томи, является вторым по величине в пределах о. Атласова. Известное ранее [Федорченко и др., 1989] высокое содержание хрома, достигающее 720 г/т, определено лишь для образца, отобран-ного на южном побережье острова, а значения, превышающие 400 г/т определены для образцов, опробованных в кратере Хитрый.

Зеленые возгоны — это шаровидные вы-деления двух типов: 1) полнотельные шары,

сложенные единичными индивидами или их сrostками (см. рис. 5б, 5в, рис. 6а—6е) и 2) шары коломорфного строения (см. рис. 7а—7г).

Белесые и желтоватые возгоны сложены ком-ковато-шаровидными формами, состоящими из оксигидроксидов железа с примесью меди и других элементов.

Полнокристаллические рудные образования. Гидрокси- и оксихлориды меди — обычные минералы фумарольных возгонов. В частно-сти, во время трещинных излияний Толбачика (Камчатка) в лавовых потоках вблизи выходов фумарольных газов обнаружены минералы — толбачит CuCl₂, меланоталлит Cu₂OCl₂, нан-токит CuCl, эриохальцит CuCl₂×2H₂O [Вер-гасова, Филатов, 1982, 1983]. Такие минералы характерны именно для фумарольных возгонов [Balic-Zunic, 2016] и образуются в зависимости от температуры, состава, скорости входа фу-марольных газов и ряда других условий. Фумаро-логенные минералы могут быть эфемерными,

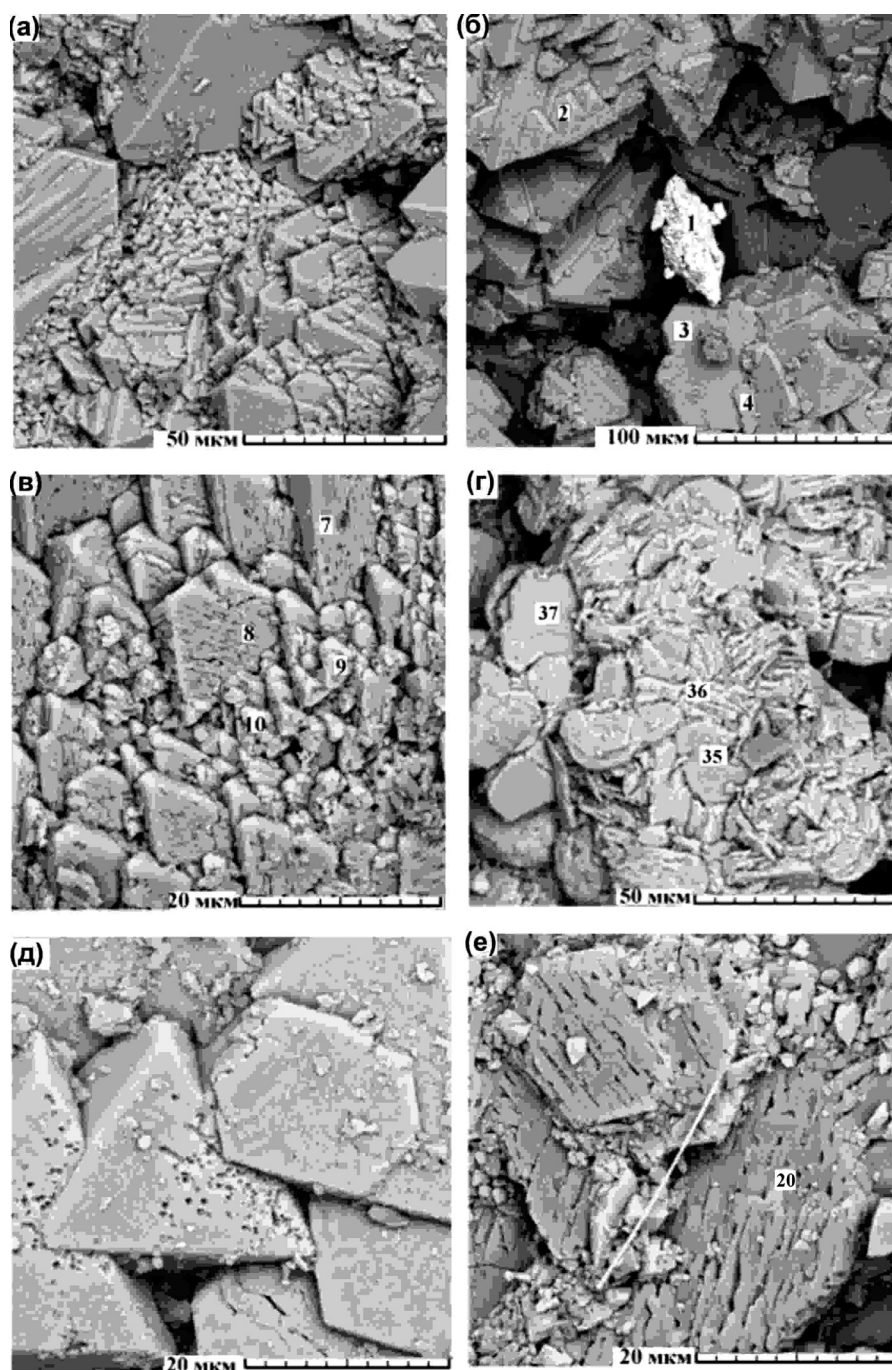


Рис. 6. Морфология возгонов атакамита, образец ВА-149/2.

а — ромбовидные кристаллы атакамита: мелкие кристаллы (предположительно анатакамит) заполняют пространство между образованными ранее крупными кристаллами; б — скопление неизмененных ромбовидных и уплощенных кристаллов атакамита в ассоциации с более поздним выделением оксида меди; в — измененные ромбические кристаллы; г — неизмененные уплощенные кристаллы; д, е — предполагаемые следы биогенных организмов, разрушающих кристаллы атакамита. Сканирующий электронный микроскоп.

Цифры на снимках соответствуют номерам точек химических анализов в табл. 5, 7.

нестабильными — с переменным химическим составом. Единственная стабильная форма, к которой стремится эволюция минералов этого ряда — тенорит CuO .

Значительно шире минералы сходного состава распространены в зонах выветривания медных и медноколчеданных месторождений [Агеева, 2017; Габлина и др., 2018; Прибавкин

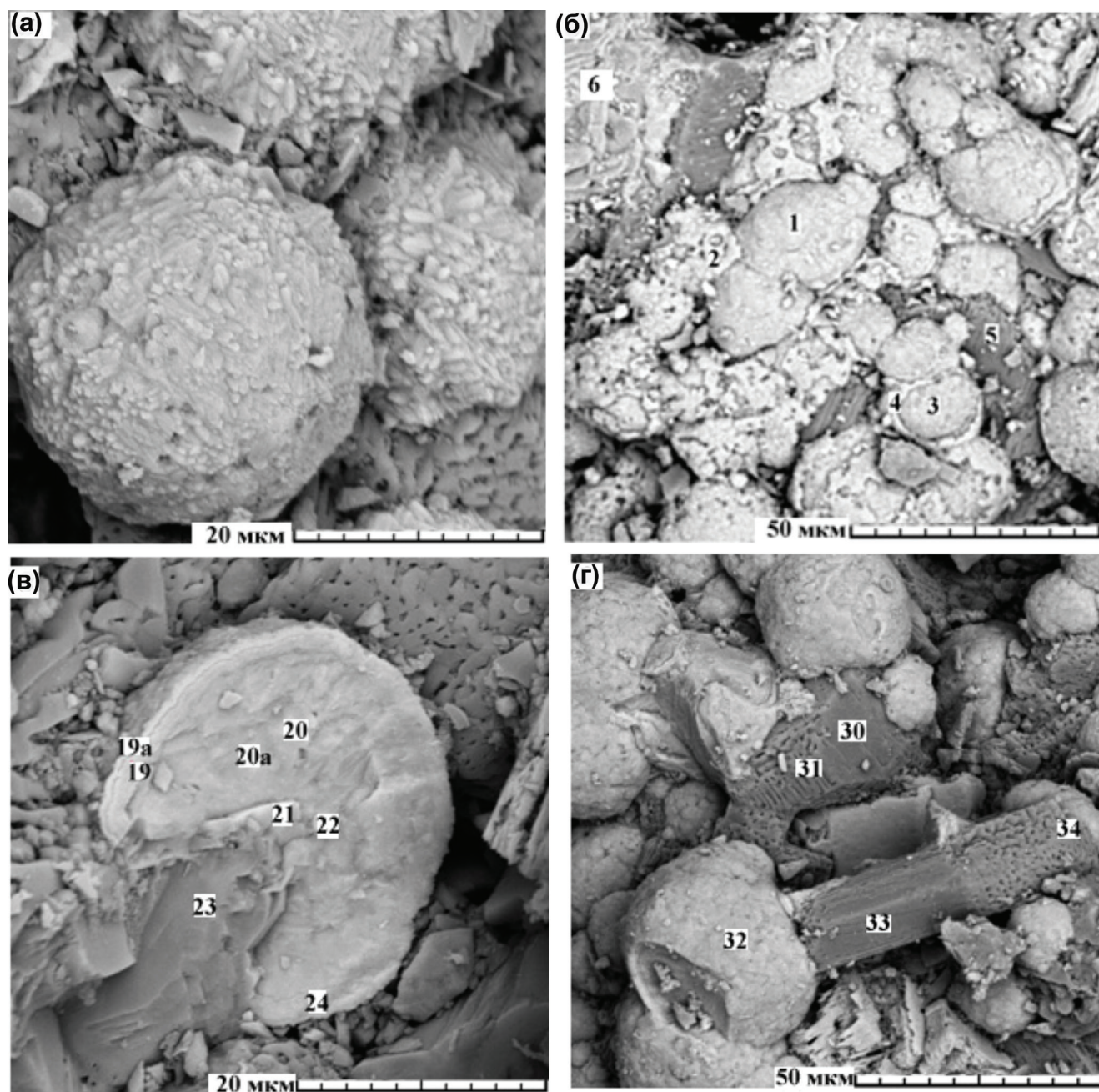


Рис. 7. Морфология коломорфных минералов, составляющих поздние зеленые покровы на лавах склонов Алаида. а–г – глобулы минералов: а – общий вид выделений, б – глобулы в начальной стадии растворения, в – внутреннее строение и состав единичной глобулы, г – разрушающиеся кристаллы плагиоклаза, обогащенные Si, K и обедненные Ca, в основании “корки” поздней медной минерализации. Сканирующий электронный микроскоп. Цифры на рис. 7в соответствуют анализам в табл. 8, на рис. 7б и 7г – в табл. 9.

и др., 2020; Суханова, 2018; Шилов и др., 2012; Hannington, 1993 и др.]. Они встречаются в продуктах извержений различных наземных и подводных вулканов [Дитрехс и др., 1948; Balassone et al., 2019; Imai et al., 2007; Wright et al., 1998 и др.], в драгированных породах в рифтовой зоне Срединно-Атлантического хребта [Габлина и др., 2006, 2016; Добрецова, 2019, 2020; Добрецова,

Яговкина, 2022; Добрецова, Янсон, 2022; Силаев и др., 2022; Суханова, 2018; Шилов и др., 2012; Bonatti et al., 1976], хребта Карлсберг в Индийском океане [Wang et al., 2017] и в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия [Богданов и др., 2006]. Особое значение имеет широко распространенный в упомянутых обстановках атакамит с теоретическим составом $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$,

Таблица 6. Состав пород со склонов вулкана Алайд с инкrustациями возгонов

№ обр.	ВА-128	А-Так-7-15	ВА-109	ВА-175	А-Ол-5-18
с.ш.	50°49'46.49"	50°50'39.37"	50°54'26.21"	50°54'31.25"	50°54'09.36"
в.д.	155°39'13.32"	155°40'38.86"	155°36'48.78"	155°37'56.53"	155°29'11.15"
№ п/п	1	2	3	4	5
SiO ₂	49.67	49.77	48.74	49.52	52.80
TiO ₂	0.92	0.93	1.01	1.05	0.78
Al ₂ O ₃	20.02	19.70	19.86	19.97	19.35
Fe ₂ O ₃ *	10.12*	10.29*	9.92*	0.24	7.72*
FeO	—	—	—	8.50	—
MnO	0.187	0.18	0.179	0.22	0.155
CaO	10.38	9.98	10.31	2.92	8.61
MgO	4.22	3.96	4.09	10.95	2.56
Na ₂ O	2.75	3.03	2.95	3.16	3.36
K ₂ O	1.64	1.78	1.86	2.28	2.64
P ₂ O ₅	0.290	0.298	0.329	0.45	0.395
LOI	0.19	0.13	0.30	<0.1	0.41
Сумма	100.38	99.68	99.53	99.25	99.13
CO ₂				0.21	
Li	7.3	7.5	7.4	—	9.0
Be	0.84	0.85	0.96	—	1.28
Sc	26	24	24	29	15
V	288	280	306	279	648
Cr	313	648	202	54	170
Co	26	24	25	26	15
Ni	20	22	19	30	6
Cu	593	238	636	742	702
Zn	61	56	63	77	47
Ga	18.3	18.2	18.6	23.0	18.7
Ge	1.35	1.25	1.36		1.37
Rb	32	35	39	47	57
Sr	649	629	692	588	642
Y	20	19	20	24	24
Zr	67	74	84	91	107
Nb	3.6	4.7	6.4	4.4	6.9
Sn	0.09	0.94	0.96	—	0.13
Sb	0.09	1.83	0.93	—	0.18
Cs	0.57	0.65	0.63	—	0.83
Ba	308	325	318	418	426
La	11.33	12.29	13.40	—	17.64
Ce	25.32	26.81	29.67	—	39.26

Таблица 6. Окончание

Pr	3.65	3.80	4.13	—	5.20
Nd	15.99	16.25	18.26	—	22.65
Sm	4.25	4.10	4.54	—	5.37
Eu	1.28	1.24	1.37	—	1.50
Gd	3.87	3.78	4.11	—	4.68
Tb	0.58	0.57	0.63	—	0.70
Dy	3.55	3.39	3.57	—	4.34
Ho	0.76	0.72	0.77	—	0.89
Er	2.07	1.98	2.09	—	2.45
Tm	0.30	0.30	0.32	—	0.37
Yb	1.94	1.89	2.03	—	2.39
Lu	0.31	0.30	0.31	—	0.38
Hf	1.83	1.91	2.12	—	2.62
Ta	0.15	0.21	0.32	—	0.36
W	0.44	0.43	0.94	—	0.58
Pb	8.44	5.43	5.52	6.8	4.84
Bi	0.03	0.04	0.07	—	0.03
Th	2.14	2.39	2.55	3.4	3.93
U	0.76	0.83	0.91	<2.0	1.49

Примечание. Содержания оксидов петрогенных элементов даны в вес. %, редких элементов — в ppm. Географическая привязка образцов: ВА-128 — бухта Алаидская; А-Так-7-15 — побочный конус Такетомы; ВА-109, ВА-175 — бухта Северная; А-Ол-5-18 — прорыв Олимпийский. Fe_2O_3^* — все Fe в виде Fe_2O_3 . Анализы выполнены в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (1–3, 5) и аналитическом центре ГИН РАН (4).

представленный в природе четырьмя полиморфами — ромбическим (собственно атакамит), моноклинным (баталлактит), тригональным (паратакамит) и триклинным (анатакамит). Эти минералы были изучены в фумарольных покровах медьсодержащей минерализации на склонах вулкана Алаид, широко распространенных вдоль береговой линии о. Атласова [Житова и др., 2020; Рашидов, Аникин, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020а, 2020б; Рашидов и др., 2013; Силаев и др. 2021]. Такая минерализация легко диагностируется по зеленовато-бирюзовому цвету, иногда сопровождается медными ванадато-силикатами желтого цвета и состава (мас. %): SiO_2 21.37 ± 10.36 ; V_2O_5 13.66 ± 4.59 ; Al_2O_3 3.76 ± 3.22 ; CuO 41.2 ± 5.19 ; Cl 0.71 ± 0.68 . Эмпирическая формула — $(\text{Cu}_{1.07-2.96}\text{Al}_{0.16-0.7})_{1.77-3.12}\text{H}_{0.68-3.68}[\text{SiO}_4]_{0.76-1.88}[\text{VO}_4]_{0.12-1.24}\text{Cl}_{0.04-0.24}$.

Соответствующие выделения варьируют по толщине от долей до нескольких мм, имеют

плотное сложение, нарастая на поверхность застывших лав без признаков их замещения.

В результате проведенных исследований зеленых наростов на лавы на склонах побочного конуса Такетомы вулкана Алаид (время извержения 1933–1934 гг.) установлено следующее. Основным минералом в зеленоватых наростах является атакамит, представленный двумя модификациями. Преобладает ромбическая модификация (собственно атакамит) с параметрами элементарной ячейки (Å): $a = 6.06 \pm 0.03$; $b = 6.86 \pm 0.04$; $c = 9.12 \pm 0.07$. Дополнительная более редкая фаза тригонального паратакамита характеризуется параметрами (Å): $a = 6.18 \pm 0.013$; $c = 13.94 \pm 0.03$. В работе [Силаев и др., 2021] приводятся электронно-микроскопические снимки этих модификаций, химический состав и данные спектров ИК-поглощения. Состав атакамитов характеризуется сводной эмпирической формулой $\text{Cu}_2\text{Cl}_{1.02-1.12}(\text{OH})_{2.92-3.13}$. Средние значения формульных коэффициентов при

Таблица 7. Состав (ат. %) атакамита $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ из возгонов со склонов вулкана Алайд и побочного конуса Такетоми

Обр. №	ВА-149/2				ВА-116/2							ВА-149/2	Такетоми*
Точка*	1	2	3	4	35	36	37	7	8	9	10	1	
№ п/п	1	2	3	4	10	5	6	7	8	9	11	12	13
Si					0.75	0.74	0.67	1.65	2.34	2.18	3.55	8.05	1.61
Al					0.23			1.1	1.28	1.04	16.15	3.42	1.07
Fe										0.85		2.20	
Mg						0.54				0.95		1.34	
Ca									0.38				
K									0.36			1.34	
O	20.64	16.18	16.15	16.18	18.67	39.50	16.97	20.64	22.08	19.03	28.78	26.50	21.86
C						10.73							
Cl	6.01	19.58	19.71	19.57	10.40	9.94	18.00	6.01	1.87	17.37	10.30	7.89	16.83
Cu	70.60	64.25	64.14	64.25	69.95	38.55	64.36	70.60	71.68	58.59	41.22	44.75	58.64
Co												0.42	
Ni												4.10	
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Примечание. Составы приведены к 100%; Такетоми* – средний состав атакамита побочного конуса Такетоми, по [Силаев и др., 2021], 20 анализов; Точка* – привязку точек анализа см. рис. 6 (б, в, г, е); ВА-116/2 – бухта Северная ($50^{\circ}50'39''$ с.ш. и $155^{\circ}40'39''$ в.д.); ВА-149-2 – участок между мысами Ночной и Бородавка ($50^{\circ}55'16''$ с.ш. и $5^{\circ}32'19''$ в.д.). Другие обозначения см. табл. 3.

Cl и (OH) определяются, соответственно, как 1.04 ± 0.07 и 2.96 ± 0.07 , что довольно близко к теоретической формуле.

В дополнение к описанию атакамита, отобранного со склонов побочного конуса Такетоми, в настоящей работе приводятся некоторые сведения о хлоридах меди, образовавшихся на склонах вулкана Алайд. Описываемые возгоны были отобраны в северо-западной части о. Атласова (см. рис. 1). Четкие кристаллографические очертания минералов хорошо видны на электронно-микроскопических снимках (см. рис. 5, 6). Наиболее ранними и наиболее крупными являются ромбоэдрические кристаллы атакамита. Интерстиции между крупными кристаллами заполнены мелкими островершинными кристаллами (см. рис. 6а), сходными по морфологии с триклинным анатакамитом,

описанным в зоне окисления медных руд в Чили [Смолянинова, 2011], где он образует треугольно-таблитчатые зубьевидные наросты на грянях призматических кристаллов атакамита.

Детальные микрозондовые анализы отдельных крупных кристаллов (см. рис. 6б, табл. 7) показывают, что наиболее плотные неизменные кристаллы имеют стабильный, однородный химический состав, который характеризуется присутствием только меди, хлора и кислорода. Содержание меди стабильное – чуть выше 64 мас. %, хлора и кислорода – соответственно – 19.5–19.7 и 16.1–16.2 мас. %. По сравнению с изученными ранее образцами атакамита [Силаев и др., 2021] здесь наблюдается более высокое содержание меди и хлора, но пониженное содержание кислорода. Формула минерала приближается к составу $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_2$.

Таблица 8. Состав (вес. %) и формульные единицы зонального коллоидного образования со склонов вулкана Алайд (обр. ВА-116/2)

Точка*	23	21	22	20а	20	24	19	19а
№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Si	11.31	7.62	7.50	3.72	2.42	5.70	4.14	2.26
Al	5.56	4.09	3.70	1.29	2.02	3.95	1.89	0.88
Fe	17.26	3.40	1.71	1.69	1.32	2.53	2.38	2.74
Mg	3.64	0.94	2.21			1.07		
Ca	1.45	0.87	0.49	0.94		0.72	0.52	
K				7.12		0.78		
Cu	25.54	52.60	54.93	54.97	69.67	56.76	65.21	70.56
Cl		2.99	1.65	3.30	2.11	2.32	1.93	1.66
O	32.18	27.50	27.81	26.97	22.47	26.17	23.80	21.91
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cl*		2	1	3	2	4	4	2
Cu*	19	47	50	59	78	54	69	81
Fe*	21	5	3	3	2	2	1	4
Прочие*	60	46	46	35	18	40	26	20
Si	0.80	0.54	0.52	0.26	0.16	0.40	0.28	0.16
Al	0.30	0.21	0.18	0.06	0.09	0.21	0.09	0.04
Fe	0.45	0.09	0.03	0.04	0.03	0.06	0.06	0.06
Mg	0.14	0.03	0.09			0.04		
Ca	0.03	0.02	0.01	0.02		0.01	0.01	
K				0.18		0.01		
Cu	0.40	0.83	0.86	0.86	1.09	0.89	1.02	1.11
Cl		0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02
O=>Cu*	2.01	1.72	1.73	1.68	1.40	1.63	1.48	1.37
O=>Катионы*	2.11	1.76	1.71	1.47	1.40	1.65	1.48	1.39

Примечание. Координаты места отбора образца представлены в примечании к табл. 7. Составы приведены к 100%. Cl*, Cu*, Fe*, прочие* – рассчитано на 100%. Точка* – привязку точек анализа см. рис. 7в. O=>Cu* – количество кислорода для образования CuO, O=>Катионы* – количество кислорода для образования других оксидов.

Не исключено, что колебания состава по (ОН) обусловлены неправильным хранением образцов. Но, кроме этого, на электронных снимках видно, что многие кристаллы пронизаны округлыми или удлинёнными пустотами, напоминающими ходы микроорганизмов, что наводит на предположение об изменении химического состава минерала в связи с бактериальной деятельностью (см. рис. бд, бе).

Состав атакмитоподобных минералов в изменённых пористых выделениях отличается

большой изменчивостью (см. рис. бв, бг, бе, табл. 5). Содержание хлора в них колеблется от 2 до 18 мас. %, содержание меди изменяется от 40 до 70 мас. %. Эмпирическая формула рассчитывается как $Cu_2Cl_{0.9-1.62}(OH)_{2.38-3.1}$. Вариации состава такого атакмита коррелируют с колебаниями формы его выделений – сначала их поверхность становится пористой, затем наблюдается разделение на моноклинные плоские частицы.

В зону минералообразования, кроме меди и хлора, поступали калий, железо, кобальт и

Таблица 9. Состав (вес. %) натечных образований на породах со склонов вулкана Алайд (ВА-116/2)

Точка*	1	2	3	4	5	6	32	30	31	33	34
Si	0.60	2.16	2.23	1.79	26.64	1.01		26.09	27.92	28.78	29.26
Ti						2.90					
Al		0.60	0.64		8.63	0.69	1.65	9.70	8.86	11.15	10.15
Fe		1.28	0.51	1.36	0.39	70.04		1.58	1.76		1.09
Mn			1.07			1.23					
Ca					1.18			6.45	3.30	1.92	1.03
K					2.63			2.16	3.56	1.38	2.96
O	16.87	19.02	19.29	19.82	43.14	24.13	17.01	43.96	44.49	46.74	46.20
Cu	64.27	62.20	62.44	69.03	10.60		61.71	8.47	6.68	3.36	3.74
Ta									1.64	6.15	4.50
Cl	18.25	14.73	13.82	8.00	2.98		19.62	1.58	1.80	0.52	1.08
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Примечание. Координаты места отбора образца представлены в примечании к табл. 7. Точка* – привязку точек анализа см. рис. 7б, 7г. Составы приведены к 100%.

никель. В случае дефицита хлора образуется не атакамит, а водные силикаты меди, похожие на Р-V-содержащую хризоколлу с эмпирической формулой $(\text{Cu}_{0.9-1.71}\text{Al}_{0-0.49}\text{Fe}_{0-0.03}\text{Mg}_{0-0.1}\text{Ca}_{0-0.02})_{1.35-1.84}(\text{K}_{0-0.02}\text{H}_{1.39-2})[\text{Si}_2\text{O}_5][\text{VO}_4]_{0.05-0.16}[\text{PO}_4]_{0-0.11}(\text{OH})_{2.22-3.12} \times n\text{H}_2\text{O}$ (минерал подтвержден и данными рентгенофазового анализа) и ахоит $(\text{K},\text{Na})\text{Cu}_7[\text{AlSi}_9\text{O}_{24}](\text{OH})_6 \times 3\text{H}_2\text{O}$. Рост локальной концентрации металлов группы железа приводил к образованию в возгонах рудных обособлений.

Коломорфные рудные образования. Это натечки или опаловидные массы с натечной, иногда пузырчатой поверхностью размером до 20 см в диаметре. Их глобулярность, скорлуповатость и строение в разрезе показаны на рис. 7. Хорошо видно, что затравкой для образования глобул выступали частицы слюдистого облика (см. рис. 7в, точка 23, табл. 8, точка 23), соответствующие по составу хризоколле с некоторым дефицитом алюминия и большим количеством железа. Близко одновременно или вслед за хризоколлоподобным минералом образовались моноклинные кристаллы баталлакита.

Следующая стадия развития глобул – появление в них зон скрытокристаллического строения, состоящих из оксида меди, примесных элементов и небольшого количества хлора (см. рис. 7в, табл. 8, точки 20, 20а). Как видно

на снимке, образование этих зон происходило непрерывно с развитием участков, как с аморфной структурой, так и структурой с признаками кристалличности. Такие участки различаются по содержанию CuO , которое изменяется в пределах 50–80 мас. %. На поверхности глобул формируется оторочка, представляющая собой плотное слоистое образование с максимально высоким содержанием меди (до 81 вес. %). Неоднородность состава этой зоны вызвана, вероятно, вариациями условий осаждения компонентов и изменениями минералообразующей среды.

Пересчеты химических анализов показывают, что атомные количества кислорода, необходимые для связывания меди в оксид, и количества кислорода, связывающие прочие катионы, во всех проанализированных точках примерно равны (см. табл. 8). Это означает, что в каждой из зон в глобулах мы наблюдаем либо весьма неоднородный по составу минерал типа хризоколлы, либо смесь оксидов меди с опалом. Количество хлора в этих образованиях значительно ниже, чем в кристаллах, но количество меди в отдельных оторочках может быть значительно выше.

В отдельных случаях наблюдается разрушение скорлуповатых структур в коллоидных “шарах”, частичное разложение оторочек и

переотложение рудного материала в свободные межглобулярные пространства (см. рис. 7б, табл. 9). В таких случаях содержание меди в рудных образованиях несколько уменьшается, но растет содержание хлора, которое может достигать максимума в кристаллических формах. В меньшей степени межглобулярные пространства могут заполняться оксигидроксидами железа (см. табл. 9, точка 6).

Отметим, что предыдущими исследователями [Авдейко и др., 1974; Вергасова, 1977] при изучении возгонов на лавовых потоках извержения 1972 г. были выявлены минералы, содержащие V, Al, Mo и Pb. На вулкане Алаид в ванадийсодержащих возгонах был установлен щербинаит V_2O_5 [Вергасова, 1977]. В породах северо-западной части вулкана Алаид отмечался водосодержащий оксид меди и ванадия — фольбортит $Cu_3[V_2O_7](OH)_2 \cdot 2H_2O$, детально описанный Е.С. Житовой с соавторами [Житова и др., 2020]. Цитируемые авторы пришли к выводу о том, что фольбортит скорее всего является гипергенным минералом, образующимся по первичным для фумарол минералам — эвхлорину $KNaCu_3O[SO_4]_3$ и щербинаиту при участии вулканического газа.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На вулкане Алаид минералогия возгонов, приуроченных к прикратерной зоне минералообразования, отличается от таковой, наблюдаемой на склонах.

В относительно высокотемпературной и газонасыщенной *прикратерной зоне* присутствуют самородные металлы или рудные оксиды. Они приурочены к зонам кислотного выщелачивания, в пределах которых в результате высокотемпературной проработки вулканическими газами исходные лавы и туфы превращены в опаловидные образования или породы, резко обогащенные оксигидроксидами железа. В этих зонах установлено присутствие самородных металлов — золота, палладия, серебра, хрома, меди, цинка и сплавов — золото-палладия, латуни, меди-вольфрама. Предполагается, что все эти металлы и сплавы могли иметь очаговый генезис, переносились газо-гидротермальными растворами в виде комплексных соединений и осаждались в кислой обстановке приповерхностной зоны. Но не

исключается и вероятность их эпигенетического образования в результате кислотного выщелачивания вулканогенных базальтоидов. Золото, палладий и их сплавы обычно приурочены к зонам распространения опаловых налетов и корок. Хром тяготеет к оксигидроксидам железа, латуни локализуются вблизи газовых пустот с повышенным содержанием углекислого газа. Аргентит — единственный прикратерный рудный возгон, обнаруженный нами в сульфидной форме.

На *склонах* вулкана Алаид возгоны, образовавшиеся в более низкотемпературных условиях, по составу оказались более разнообразными. Из рудных минералов в них преобладают медные оксиды и медьсодержащие хлориды, кроме того, установлены ванадийсодержащие минералы, включая своеобразные медные ванадатосиликаты. Выделено два генетических типа склоновых возгонов. Первый тип — это продукты кристаллизации из гидротермальных или парогидротермальных растворов, часто вблизи приповерхностных выходов фумарол. К этому типу относятся атакмит и его полиморфные модификации. Второй тип возгонов представлен медными и железистыми коломорфными образованиями, появившимися в результате выпадения осадка из коллоидных растворов на мелководье пересыхающих водоемов, в том числе мелких и крупных луж.

Обнаружение возгонов с Au, Pd, Cr, Ag, Cu, Zn, W, V может стать поисковым критерием на соответствующие продуктивные минерализации как в пределах острова Атласова, так и на других островах КОД. Ревизия имеющихся в распоряжении авторов настоящей статьи коллекций горных пород и фотоматериалов показала, что упомянутые минерализации, в частности, имеются на юго-юго-западном берегу о. Чиринкотан и на о. Чирпой. Очевидно, что продолжение минералого-геохимических исследований может поспособствовать решению вопросов вулканогенного рудообразования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзаданий Геологического института РАН (г. Москва), Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

(г. Петропавловск-Камчатский), Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск), Института геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н.П. Юшкина (г. Сыктывкар).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдурахманов А.И., Пискунов Б.Н., Смирнов И.Г., Федорченко В.И. Вулкан Алаид (Курильские острова) // Восточно-Азиатские островные системы (Тектоника и вулканизм). Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1978. С. 85–107.
- Абдурахманов А.И., Федорченко В.И. Закономерности распределения некоторых редких (Sc, Zr, Y) и рудных (Cu, Au) элементов в четвертичных лавах Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 55–65.
- Абдурахманов А.И., Федорченко В.И., Родионова Р.И. Геохимические особенности и зональность состава четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Тихоокеанская геология. 1989. № 3. С. 28–44.
- Агеева О.В. Минералогия гидротермальных сульфидных полей Победа-1 и -2, Срединно-Атлантический хребет // Металлогения древних и современных океанов—2017. Миасс: ИМинУрО РАН, 2017. С. 83–85.
- Аношин Г.Н. Золото в магматических горных породах. Новосибирск: Наука, 1977. 205 с.
- Аношин Г.Н., Копежининская В.В. Распределение золота в кайнозойских вулканических породах Курило-Камчатской провинции в связи с их петрохимическими особенностями // Геохимия. 1972. № 8. С. 909–925.
- Авдейко Г.П., Хренов А.П., Флеров Г.Б. и др. Извержение вулкана Алаид в 1972 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1974. № 50. С. 64–80.
- Антонов А.Ю. Геохимия Au, Ag, Ge, Ga в четвертичных вулканических образованиях Курильской островной дуги // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 29. № 2. С. 62–75.
- Антонов А.Ю., Волынец О.Н., Королева Г.П., Чернигова С.Е., Хлебникова А.А. Золото в четвертичных вулканитах Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 1992. № 2. С. 19–29.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 5. С. 17–26.
- Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Материалы международного симпозиума “Проблемы эксплозивного вулканизма” к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный, 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. член-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006б. С. 135–143.
- Богданов Ю.А., Леин А.Ю., Ульянов А.А. и др. Начальная фаза гидротермального рудонакопления на поле 9°50' с.ш. Восточно-Тихоокеанского поднятия // Океанология. 2006. Т. 46. № 1. С. 88–102.
- Вергасова Л.П. Фумарольные минералы прорыва Олимпийского // Бюллетень вулканологических станций. 1977. № 53. С. 77–89.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К. Химическая формула и кристаллохимическая характеристика меланоталлита Cu_2OCl_2 // ЗВМО. 1982. Т. 111(5). С. 562–565.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К. Новый минерал толбачит CuCl_2 // Доклады АН СССР. 1983. Т. 270. С. 415–417.
- Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Лайба А.А. и др. Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа (17°07'–17°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 6. С. 475–500. <https://doi.org/10.1134/S0024497X18060022>
- Габлина И.Ф., Семкова Т.А., Степанова Т.В., Горькова Н.В. Диагенетические изменения сульфидов меди в современных рудоносных осадках гидротермального поля Логачев-1(Срединно-Атлантический хребет, 14°45' с.ш.) // Литология и полез. ископаемые. 2006. № 1. С. 1–19.
- Газогидротермы активных вулканов Камчатки и Курильских островов: состав, строение, генезис / Отв. ред. О.Л. Гаськова, А.К. Манштейн. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. 270 с.
- Данченко В.Я. Золото-серебряная минерализация Большой Курильской дуги. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1991. 63 с.
- Данченко В.Я. Редкие металлы в рудах Курильских островов /Отв. ред. К.Ф. Сергеев. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1999. 88 с.
- Данченко В.Я. Геологическое положение и вещественно-генетические типы оруденений редких и благородных металлов в Южно-Охотском регионе Тихоокеанского обрамления. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2003. 227 с.
- Диденко А.Н., Рашидов В.А., Марков Г.П. и др. Петромагнитная и геохимическая характеристики вулканитов извержения 2015–2016 гг. вулкана Алаид, Курильская островная дуга // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 3–21. <https://doi.org/10.31857/S0203030621010028>
- Дитрехс Ф.М., Кулаков В.С., Святловский А.Е. Паразитические кратеры Ключевского вулкана, возникшие

- в 1932 году // Труды Камчатской вулканологической станции. 1948. Вып. 2. С. 3–23.
- Добрецова И.Г.* О гидротермальном генезисе минералов группы атакмита в Атлантическом океане // Материала XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 18–22 ноября 2019 г. М.: ИО РАН, 2019. Т. 2. С. 277–280.
- Добрецова И.Г.* Минералы группы атакмита со дна Атлантического океана // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения-2020) // Материалы Российской конференции с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 2020. С. 38–40.
- Добрецова И.Г., Яговкина М.А.* Минералы группы атакмита из рудопроявлений на дне Атлантического океана // Вестник геонаук. 2022. № 2(326). С. 37–45. <https://doi.org/10.19110/geov.2021.2.4>
- Добрецова И.Г., Янсон С.Ю.* Сульфидные руды новых рудных полей Молодежное и Коралловое в Атлантическом океане // Геология морей и океанов // Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 11–15 апреля 2022 г. М.: ИО РАН, 2022. Т. 3. С. 35–38.
- Житова Е.С., Аникин Л.П., Сергеева А.В. и др.* Проявление фольбортита на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова, Россия) // Записки Российского минералогического общества. 2020. Ч. CXLIX. № 3. С. 78–95. <https://doi.org/10.31857/S0869605520030119>
- Кременецкий А.А., Чаплыгин И.В.* Содержание рения и других редких металлов в газах вулкана Кудрявый (остров Итуруп, Курильские острова) // Доклады Академии наук, 2010. Т. 430. № 3. С. 365–370.
- Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / Отв. ред. Т.К. Злобин, М.С. Высокова. Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 2004. 227 с.
- Леонова Л.Л.* Геохимия четвертичных и современных вулканических пород Курильских островов и Камчатки // Геохимия. 1979. № 2. С. 179–197.
- Петрова В.В., Рашидов В.А., Аникин Л.П., Горькова Н.В., Михеев В.В.* Возгоны терминального извержения 2015–2016 гг. острова-вулкана Алаид (Курильская островная дуга) // Геология морей и океанов // Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, Москва, 18–22 ноября 2019 г. М.: ИО РАН, 2019. Т. 2. С. 298–302.
- Петрова В.В., Рашидов В.А., Аникин Л.П., Горькова Н.В., Михеев В.В.* Возгоны вулкана Алаид (о. Атласова, Курильская островная дуга) // Материалы XXIII Региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 2020 г. / Главный ред. доктор геол.-мин. наук. А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 191–194.
- Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.
- Прибавкин С.В., Коровко А.В., Шардакова Г.Ю., Антонишин А.В.* Минералы меди зоны окисления Cu(Mo) – порфирирового рудопроявления Сарышаган (Западное Прибалхашье, Центральный Казахстан) // Минералогия. 2020. Т. 6. № 1. С. 58–68. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2020-6-1-5>
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на прорыве Олимпийский (о. Атласова, Курильские острова) в августе 2014 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 27. С. 198–203.
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в августе 2015 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 3. Вып. 27. С. 102–107.
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2016 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 3. Вып. 31. С. 94–103.
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2017 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 112–117.
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2018 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 3. Вып. 39. С. 12–113. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2018-3-39-105-113>
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2019 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3. Вып. № 43. С. 109–115. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-109-115>
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2020 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020а. № 3. Вып. № 47. С. 112–119. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-3-47-112-119>
- Рашидов В.А., Аникин Л.П.* Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2020 году. Этап 2 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020б. № 4. Вып. № 48. С. 108–113. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2020-4-48-108-113>
- Рашидов В.А., Аникин Л.П., Делемень И.Ф.* Полевые работы на побочном вулкане Такетоми (о. Атласова, Курильские острова) в августе 2013 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 216–224.

- Рид П.Дж. Геммологический словарь / Ред. А.Г. Булах. Л.: Недра, 1986. 287 с.
- Рыбин А.В., Данченко В.Я., Чибисова М.В., Гурьянов В.Б. Магматические комплексы и редкометальное оруденение вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Вестник Сахалинского музея. 2000. № 7. С. 234–259.
- Силаев В.И., Аникин Л.П., Рашидов В.А. и др. Атакамит как продукт фумарольного минералообразования на современных вулканах // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти Чирвинского. 2021. Вып. 24. С. 207–216. <https://doi.org/17072/Chirvinsky.2021.207>
- Силаев В.И., Добрецова И.Г., Антошкина А.И. и др. Гидротермальные сульфидные оруденения в российском разведочном районе Срединно-Атлантического хребта // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского / Сборник научных статей. Пермь: ПГНИУ, 2022. Вып. 25. С. 226–238. <https://orcid.org/0000-0002-4653-5233>
- Смолянинова В.Н. Новые минералы. LXV // Записки Русского минералогического общества. 2011. № 6. С. 45–69.
- Суханова А.А. Минералого-геохимические особенности глубоководных сульфидных руд поля Юбилейное (Российский разведочный район Срединно-Атлантического хребта) / Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2018. 137 с.
- Сухарев А.Е., Силаев В.И., Петровский В.А. и др. Ичтьюские алмазы: конституция, поверхностно-плёночные микроминерализации, генезис // Вестник Пермского университета. Геология. 2023. № 2. С. 1–29.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис. М.: Наука, 1989. 237 с.
- Флеров Г.Б., Иванов Б.В., Андреев В.Н. и др. Вещественный состав продуктов извержения вулкана Алайд в 1981 г. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 6. С. 29–43.
- Чаплыгин И.В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва) / Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2009. 24 с.
- Чугаев А.В., Юдовская М.А., Дистлер В.В. и др. Источники рудообразующего флюида фумарол вулкана Кудрявый (Курильские острова): изотопный состав свинца в газовых конденсатах и минералах сублиматов // Доклады Академии наук. 2007. Т. 412. № 5. С. 685–688.
- Шилов В.В., Бельтнев В.Е., Иванов В.Н. и др. Новые гидротермальные рудные поля на Срединно-Атлантическом хребте: Зенит-Виктория (20°08 с.ш.) и “Петербургское” (19°52 с.ш.) // Доклады Академии наук. 2012. Т. 442. № 3. С. 383–389.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Чаплыгин И.В. и др. Формы нахождения золота в продуктах кристаллизации современных высокотемпературных газовых флюидов вулкана Кудрявый, Курильские острова // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391. № 4. С. 535–539.
- Africano F., Bernard A., Korzhinsky M. High temperature volcanic gas geochemistry (major and minor elements) at Kudryavy volcano, Iturup Island, Kuril arc, Russia // *Vulcânica*. 2003. V. 1. P. 87–94.
- Balassone G., Mondillo N., De Gennaro R. et al. Copper Minerals at Vesuvius Volcano (Southern Italy): A Mineralogical Review // *Minerals*. 2019. V. 9. 730. <https://doi.org/10.3390/min9120730>
- Balic-Zunic T., Garavelli A., Jakobsson S.P. et al. Fumarolic minerals: An overview of active European volcanoes / Ed. K. Nemeth // *Updates in Volcanology – From Volcano Modelling to Volcano Geology Publishers*. London, UK, 2016. P. 267–322.
- Bonatti E., Guerstein-Honnorez R.M., Honnorez J. Copper-iron sulfide mineralizations from the equatorial Mid-Atlantic Rindge // *Econ. Geol.* 1976. V. 71. № 8. P. 1515–1525.
- Ganino C., Libourel G., Btnard A. Fumarolic incrustations at Kudryavy volcano (Kamchatka) as a guideline or high-temperature (N 850°C) extinct hydrothermal systems // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. V. 376. P. 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.020>
- Hannington M. The formation of atacamite during weathering of sulfides on the modern sea floor // *The Canadian Mineralogist*. 1993. V. 31. P. 945–956.
- Imai A., Geshi N., Shimano T., Nakada S. Implication of the temporal sulphur isotopic variation during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan // *Island Arc*. 2007. V. 16. P. 83–92.
- Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I. et al. Diskovery of a pure rhenium mineral at Kudriavy volcano // *Nature*. 1994. V. 369. № 6457. P. 51.
- Shevko E.P., Bortnikova S.B., Abrosimova N.A. et al. Trace Elements and Minerals in Fumarolic Sulfur: The Case of Ebeko Volcano, Kuriles // *Geofluids*. V. 2018. Article ID 4586363. 16 p. <https://doi.org/10.1155/2018/4586363>
- Taran Yu.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A. et al. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59. № 9. P. 1749–1761.
- Wahrenberger C., Seward T.M., Dietrich V. Volatile traceelement transport in high-temperature gases from Kudryavy volcano (Iturup, Kurile Islands, Russia) / Eds R. Helmann, S.A. Wood // *Water–rock interaction: A Tribute*

to David A. Crerar. *Geochemical Society Special Publications*. 2002. V. 7. P. 307–327.

Wang Y., Han X., Petersen S. Mineralogy and trace element geochemistry of sulfide minerals from the Wocan Hydrothermal Field on the slow-spreading Carlsberg

Ridge, Indian Ocean // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 84. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.020>

Wright I.C., de Ronde C.E.J., Faure K., Gamble J.A. Discovery of hydrothermal sulfide mineralization from southern Kermadec arc volcanoes (SW Pacific) // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1998. V. 164. P. 335–343.

Ore Elements And Minerals In The Elements Of Alaid Volcano (Kuril Island Arc)

V. V. Petrova^{1, *}, V. A. Rashidov^{2, **}, A. B. Perepelov³,
V. I. Silaev⁴, L. P. Anikin², N. V. Gorkova¹, V. V. Mikhnev¹

¹*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
bulvar Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

³*Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
Favorsky str., 1A, box 9, Irkutsk, 664033 Russia*

⁴*Institute of Geology Komi SC UB RAS, Pervomayskaya, 54, Syktyvkar, 167982 Russia*

*e-mail: v.petrova.v@gmail.com

** e-mail: rashidva@kscnet.ru

Sublimates tested in 2013–2020 were studied. in the near-crater zone and on the slopes of the Alaid volcano, located in the Kuril Island arc. It has been established that in the near-crater zone there are native metals confined to zones of acid leaching, within which the original lavas and tuffs have been transformed into opal-like formations or rocks sharply enriched in ferric hydroxides. In these zones, the presence of native gold, palladium, silver, chromium, copper, zinc and alloys of gold and palladium, copper and zinc, copper and tungsten has been established. On the slopes of the Alaid volcano, the range of minerals in sublimates is wider, while the temperature of their formation is lower. Of the ore minerals, copper-containing ones predominate, and sublimates with vanadium-containing minerals belonging to hydrous oxides and vanadate-silicates are established. Two genetic types of slope sublimates have been identified: 1) minerals crystallizing from hydrothermal or steam-hydrothermal solutions near the outcrops of near-surface fumaroles and 2) copper and ferruginous colomorphous formations formed as a result of sedimentation from colloidal solutions in the shallow waters of drying up reservoirs, including small and large puddles.

Keywords: Alaid volcano, sublimates, ore elements and minerals, near-crater zone, slopes, atacamite