

Минералы возгонов термальных полей вулканического комплекса Большой Семячик и сольфатар пирокластического потока 2023 года вулкана Шивелуч (Камчатка)

Купчиненко А.Н.¹, Житова Е.С.¹, Шевелева Р.М.², Гирина О.А.¹, Пеков И.В.³, Кузнецов Р.А.¹, Давыдова В.О.³, Назарова М.А.¹, Плутахина Е.Ю.¹, Власенко Н.С.²

Exhalation minerals from geothermal fields of the Bolshoi Semiachik volcanic complex and solfataras of the 2023 pyroclastic flow of the Shiveluch volcano (Kamchatka)

Kupchinenko A.N., Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Girina O.A., Pekov I.V., Kuznetsov R.A., Davydova V.O., Nazarova M.A., Plutakhina E.Yu., Vlasenko N.S.

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: kupchasta@yandex.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

В работе приведена информация о минеральных парагенезисах, сформировавшихся в двух различных поствулканических обстановках: на поверхности термального поля и вокруг бескорневых сольфатар пирокластического потока.

Материалы и методы исследования

В работе изучены (а) минералы выцветов на поверхности термальных полей вулканического комплекса Большой Семячик (Северный Кратер Центрального Семячика – СКЦС) и (б) минералы сольфатар, образовавшихся на пирокластическом потоке извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. [1]. На термальном поле СКЦС образцы отбирались в 2020 г. с поверхности грунтов, температура которых на глубине 20 см достигала 70 °С, а также вблизи парогазовых струй. На пирокластическом потоке Шивелуча образцы отбирались из устья и вокруг сольфатар, температура выхода газа составляла более 300 °С на глубине 15 см. Отобранные образцы исследовались с помощью порошковой рентгеновской дифрактометрии и электронно-зондового микроанализа.

Результаты

По данным электронно-зондового микроанализа, наиболее распространенными минералами термального поля СКЦС являются феррикопиапит в ассоциации с кокимбитом и магнезиокопиапитом (рис. 1а, б), немного реже встречаются галотрихит и алуноген. В небольших количествах присутствуют ромбоклаз в виде ромбических пластинчатых кристаллов, халькантит, магнезиовольтаит, аммонировольтаит, вольтаит, гипс с примесью Fe^{2+} , чермигит с небольшим содержанием K^+ , буссенготит, риотинтоит с примесями Ba^{2+} и Sr^{2+} . Редко встречаются киноварь, барит, сабиит, карлсонит, ярозит, масканьит, морит (табл. 1).

Данными рентгенофазового анализа подтверждены наиболее распространенные минералы: члены групп копиапита и вольтаита, галотрихит, халькантит, гипс, алуноген, ромбоклаз, чермигит (рис. 2).

На сольфатарах вулкана Шивелуч, по данным электронно-зондового микроанализа, возгоны представлены нашатырем (рис. 1в), алуногеном (рис. 1г), пиккерингитом, магнезиовольтаитом, тамаругитом, гипсом, магнезиокопиапитом, ангидритом, серой и галитом (табл. 1). Данными рентгенофазового анализа подтверждаются наиболее распространенные минералы: гипс, галит, нашатырь, алуноген, члены группы вольтаита, тамаругит.

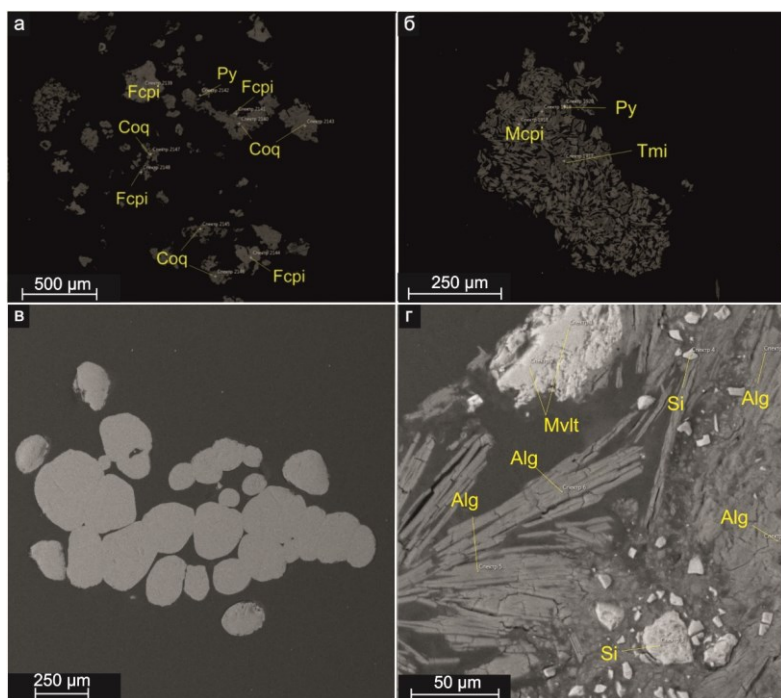


Рис. 1. Изображения минералов со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах: (а) пирит (Py), кокимбит (Coq), феррикопиаптит (Fcri) с СКЦС; (б) магнизокопиаптит (Mcri), чермигит (Tmi) и пирит (Py) с СКЦС; (в) нашатырь с вулкана Шивелуч; (г) алуноген (Alg), магнизовольтаит (Mvlt) и минерал кремнезема (Si) с вулкана Шивелуч.

Таблица 1. Идентифицированные в работе минералы и их идеальные химические формулы

Минерал	Идеальная химическая формула	Место находки
Группа копиаптита		
Феррикопиаптит	$\text{Fe}^{3+}_{0.67}\text{Fe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Магнизокопиаптит	$\text{MgFe}^{3+}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	СКЦС, Шивелуч
Группа галотрихита		
Галотрихит	$\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Пиккерингит	$\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	Шивелуч
Группа вольтаита		
Магнизовольтаит	$\text{K}_2\text{Mg}_5\text{Fe}^{3+}_2\text{Al}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	СКЦС, Шивелуч
Аммонировольтаит	$(\text{NH}_4)_2\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Al}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Вольтаит	$\text{K}_2\text{Fe}^{2+}_5\text{Fe}^{3+}_2\text{Al}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Группа кокимбита		
Кокимбит	$\text{AlFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_6 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Группа алунита		
Ярозит	$\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	СКЦС
Другие железосодержащие сульфаты		
Ромбоклаз	$(\text{H}_5\text{O}_2)\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Аммониевые минералы		
Сабииит	$(\text{NH}_4)\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)_2$	СКЦС
Карлсонит	$(\text{NH}_4)_5\text{Fe}^{3+}_3\text{O}(\text{SO}_4)_6 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Морит	$(\text{NH}_4)_2\text{Fe}^{2+}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Чермигит	$(\text{NH}_4)\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Буссенготит	$(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Масканьит	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	СКЦС
Нашатырь	NH_4Cl	Шивелуч
Сульфаты, содержащие только двухвалентные катионы		
Халькантит	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Гипс	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Ангидрит	CaSO_4	Шивелуч
Барит	BaSO_4	СКЦС
Сульфаты алюминия		
Риотинтоит	$\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	СКЦС
Алуноген	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$	СКЦС, Шивелуч
Тамаругит	$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Шивелуч
Сульфиды		
Киноварь	HgS	СКЦС

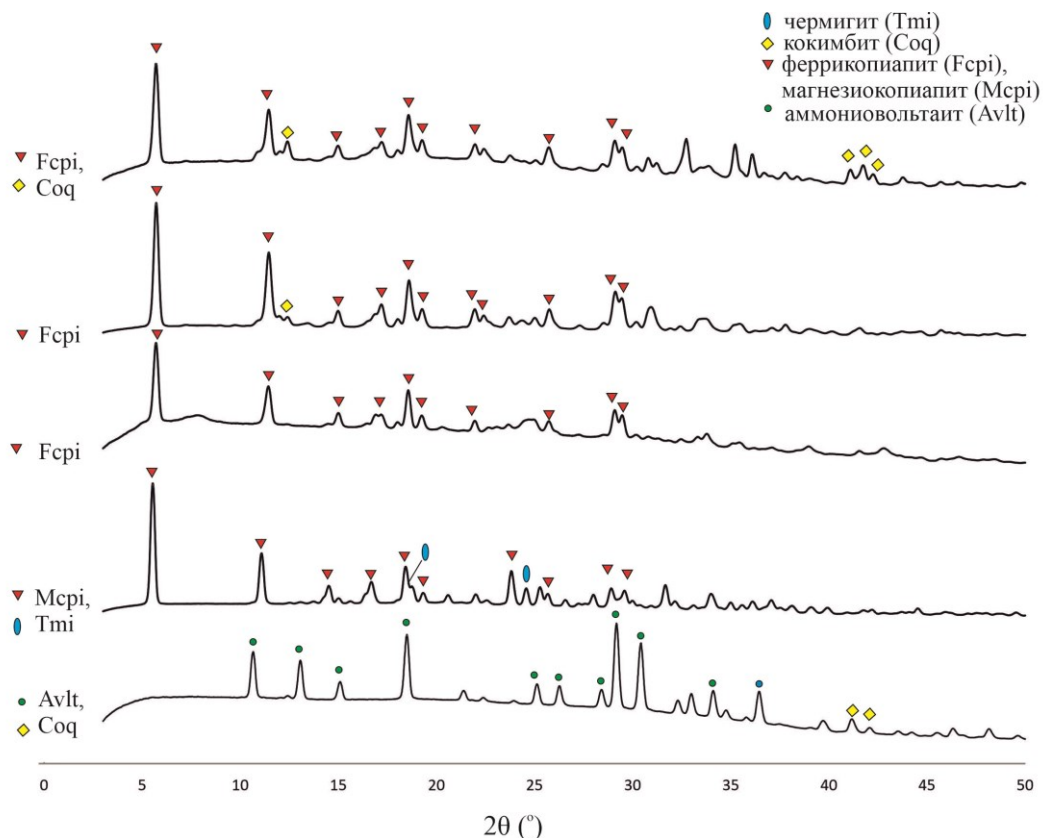


Рис. 2. Рентгенограммы минералов-выцветов с термальных полей вулканического комплекса Большой Семейчик. Идентифицированы минералы групп вольтаита и копиапита, кокимбит, и чермигит. Излучение – $\text{CuK}\alpha$.

Обсуждение результатов

Исходя из результатов исследования, наиболее распространенными минералами СКЦС являются сульфаты, преимущественно гидратированные, петрогенных элементов: Fe, Mg, Al, Ca. Среди них минералы групп копиапита (магнезиокопиаптит и феррикопиаптит), вольтаита и кокимбита, галотрихит, алуноген, ромбоклаз, ярозит, гипс. Из аммонийсодержащих минералов чаще всего можно наблюдать чермигит, также встречены сабиит, карлсонит, буссенготит, масканьит, морит. Широко распространен опал, возникающий в результате воздействия кислых растворов на породы.

Вблизи сольфатар на поверхности отложений пирокластических потоков вулкана Шивелуч распространены нашатырь, алуноген, пиккерингит, магнезиовольтаит, тамаругит, гипс, магнезиокопиаптит, ангидрит, гематит, альбит, опал, сера и галит.

Сопоставление полученных данных показало, что на поверхности потоков Шивелуча из минералов ряда галотрихит-пиккерингит наиболее распространен пиккерингит, в котором Mg существенно преобладает над Fe: содержание Fe^{2+} не превышает 0.25 атома на формулу (табл. 2). Для термального поля СКЦС характерен галотрихит с близкими атомными соотношениями Mg и Fe^{2+} при небольшом преобладании Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg} = 54 : 46$ [2]. Весьма схожая ситуация наблюдается для минералов группы вольтаита: например, в магнезиовольтаите с Шивелуча Mg сильно превалирует над Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg} = 77 : 23$, тогда как для магнезиовольтаита с термального поля СКЦС характерно близкое к 50:50 отношение Mg и Fe^{2+} [4]. Таким образом, минералы возгонов сольфатар вулкана Шивелуч в целом более магнезиальные по сравнению с минералами выцветов термального поля СКЦС, что согласуется с высокой магнезиальностью силикатных вулканических пород Шивелуча [3].

Таблица 2. Сравнение химического состава минералов одной и той же группы из разных обстановок проявления поствулканической активности

	СКЦС	Шивелуч
Группа галотрихита		
Минерал	Галотрихит	Пиккерингит
Эмпирическая формула	$(\text{Fe}^{2+}_{0.54} \text{Mg}_{0.46})_{\Sigma 1.00}$ $(\text{Al}_{1.88} \text{Fe}^{3+}_{0.11})_{\Sigma 1.99}$ $(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Mg}_{0.86} \text{Fe}^{2+}_{0.22})_{\Sigma 1.08}$ $\text{Al}_{2.01}$ $(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$
Источник	[2]	Настоящая работа
Группа вольтаита		
Минерал	Магнезиевольтаит	Магнезиевольтаит
Эмпирическая формула	$[\text{K}_{1.68}(\text{NH}_4)_{0.28}\text{Na}_{0.08}]_{\Sigma 2.04}$ $(\text{Mg}_{2.51}\text{Fe}^{2+}_{2.54})_{\Sigma 5.05}$ $(\text{Fe}^{3+}_{2.75}\text{Al}_{0.24})_{\Sigma 2.99}$ $\text{Al}_{1.00}(\text{S}_{0.99}\text{P}_{0.01}\text{O}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_{1.81}$ $(\text{Mg}_{3.78}\text{Fe}^{2+}_{1.13})_{\Sigma 4.91}$ $(\text{Fe}^{3+}_{2.81}\text{Al}_{0.18}\text{Ti}_{0.10})_{\Sigma 3.09}$ $\text{Al}_{1.00}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
Источник	[4]	[4]

Примечательно, что возгоны на поверхности пирокластических потоков вулкана Шивелуч содержат нашатырь и галит, что нехарактерно для термального поля СКЦС и, вероятно, отражает более высокое содержание хлора в сольфатарных газах. Нашатырь встречается здесь повсеместно в виде скоплений и сростков округлых зерен (см. рис. 1в). На термальном поле СКЦС аммониевые минералы представлены только сульфатами.

Исследования выполнены авторами в Ресурсном Центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и Аналитическом Центре ИВиС ДВО РАН. Работа выполнена по гос. заданию ИВиС ДВО РАН в рамках темы научно-исследовательских работ «Минералообразование в надсубдукционной зоне Северной Пацифики» (№ FWME-2024-0004).

Список литературы

1. Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
2. Шевелева Р.М., Назарова М.А., Нуржаев А.А. и др. Распространенность и химический состав галотрихита на геотермальных полях Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. Вып. 58. № 2. С. 5-16. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-5-16>
3. Gorbach N., Portnyagin M., Tembrel I. Volcanic structure and composition of Old Shiveluch volcano, Kamchatka // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 193-208. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.012>
4. Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Kupchinenko A.N. et al. The Crystal Chemistry of Voltaite-Group Minerals from Post-Volcanic and Anthropogenic Occurrences // Symmetry. 2023. V. 15. № 12. Art. 2126. <https://doi.org/10.3390/sym15122126>