



УДК 551.231

Л. П. Вергасова<sup>1</sup>, М. А. Назарова<sup>1</sup>, С. В. Москалёва<sup>1</sup>,  
А. Б. Белоусов<sup>1</sup>, М. Г. Белоусова<sup>1</sup>, С. К. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683 006; e-mail: nazarovamar@mail.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург

## Минералого-вещественный состав продуктов эксгаляционной деятельности лавовых потоков Трещинного Толбачинского извержения в период их становления (2014 г.)

Представлены результаты комплекса взаимоконтролирующих минералогических методов исследований продуктов фумарольной деятельности лавовых потоков Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (Камчатка 2012–2013 гг.) в период их становления спустя год после окончания эксплозивно-эффузивной деятельности.

### Введение

Минералогические исследования продуктов фумарольной деятельности 2014 г. являются продолжением работ, начатых в 2013 г. связи с необходимостью комплексного изучения Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (ТТИ). В работе [1] были представлены предварительные результаты минералогического изучения продуктов деятельности фумарол лавовых потоков в период их становления, совпавшем по времени с эксплозивно-эффузивной деятельностью ТТИ. В настоящем сообщении речь пойдёт о периоде становления лавовых потоков спустя почти год после окончания эруптивной деятельности ТТИ.

Исследовались образцы минеральных новообразований эксгаляций лавовых потоков в пределах Толудского лавового поля (рис. 1)[3].

Визуально, по сравнению с эксплозивно-эффузивным этапом ТТИ, остывание лавовых потоков здесь, спустя год после окончания извержения, не сопровождалось значительным отделением газов. Минеральные новообразования, приуроченные к выходам вулканических эксгаляций, встречались намного реже. Это были, в основном, белые, желтовато-белые и, в исключительных случаях, зелёные налёты и налёты, окрашенные в голубые тона. В структурном плане продукты вулканических эксгаляций Толудского лавового поля имели скрытокристаллический, тонкодисперсный, тонкозернистый облик. В редких случаях — встречались в виде кристаллических накоплений. Мощность эксгаляционных отложений на поверхности лавовых потоков варьировала от незначительной (рис. 2) до 1 см. Отложения, приуроченные к провалам, на стенках «окон» — обрушений лавоводов (рис. 3) достигали внушительных размеров по площади (до 1 м<sup>2</sup> и более). Особняком в отношении морфологических осо-

бенностей находятся новообразования из горячих пещер (сбор А. Б. Белоусовых и М. Г.), агрегаты которых имеют вид сталактитов и сталагмитов (рис. 4), что можно отнести к явлению карста [2]. В основе их возникновения лежит химический процесс растворения продуктов деятельности фумарол лавовых потоков с выносом растворённого вещества с места образования и дальнейшего отложения на внутренних стенках лавоводов в виде натёчных образований. Диаметр сталактитов достигал более 5 см.

Изучались пробы новообразований, отобранные со стенок «окон» — обрушений лавоводов (провалов), из горячих лавовых пещер, а также из трещин на поверхности лавовых потоков. При идентификации минералов фумарол был использован комплекс взаимоконтролирующих методов — макроскопия, химический анализ, рентгеновский анализ (XRD-7000, Shimadzu), инфракрасная спектроскопия (ИКС, IRAffinity-1, Shimadzu) и электронная микроскопия (SEM, TESCAN «Vega3» с энергетическим спектрометром X-MAX50, Oxford).

Предварительно все образцы просматривались под бинокляром. Значительная часть налётов (в основном, белого, молочно-белого цвета) оказалась растворимой в воде, что позволило применить к ним химический анализ методом водной вытяжки (табл. 1).

С целью определения основных минеральных фаз был использован метод порошковой дифрактометрии в сочетании с ИКС. По данным рентгеновских исследований (табл. 2 и рис. 5) в большинстве проб наиболее интенсивные линии межплоскостных расстояний принадлежат тенардиту. В подчинённом количестве установлен ещё один сульфат, KNaSO<sub>4</sub> (см. табл. 2). На инфракрасных спектрах этих проб (рис. 6) полоса 617 см<sup>-1</sup> отно-



**Рис. 1.** План расположения трещинной зоны эксплозивных жерл и лавовых потоков ТТИ 2012–2013 гг. [3]. На правом снимке представлена схема мест отбора некоторых проб по данным А. Б. Белоусовых и М.Г.;

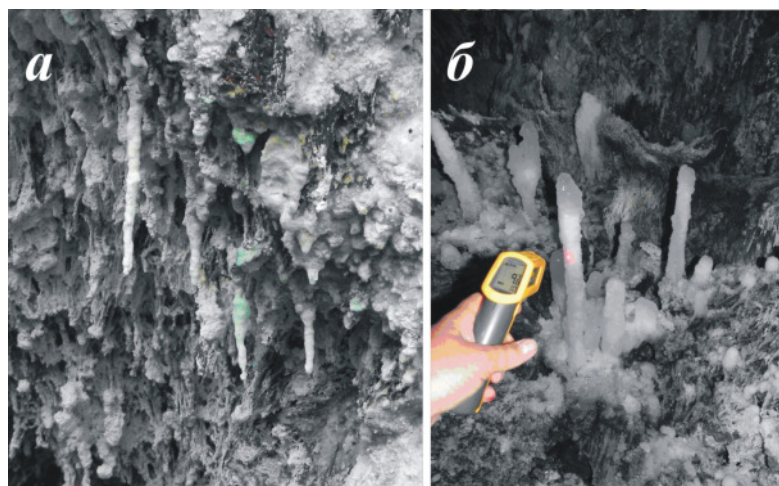


**Рис. 2.** Трещины на поверхности лавового потока. Фото Л. П. Вергасовой;

сится к S – O связям деформационных колебаний, а полоса  $1111\text{ см}^{-1}$  – к S – O связям валентных колебаний. Частоты поглощения полученных спектров соответствуют данным тенардита – 618; 638; 1095;  $1135\text{ см}^{-1}$  [7]. Анализы водных вытяжек из проб (см. табл. 1) не противоречат результатам рентгеновских исследований. Химические анализы показывают малые количества  $\text{K}_2\text{O}$ , MgO, CaO, Cl, присутствие которых обязано примесям (см. результаты исследований электронной микроскопии).



**Рис. 3.** Белые налёты новообразований на стенках «окон» – обрушений лавоводов. Фото Л. П. Вергасовой;



**Рис. 4.** Агрегаты новообразований в виде сталактитов (а) и сталагмитов (б) из горячих пещер. Фото А. Б. Белоусовых и М.Г.;

**Таблица 1.** Химический состав водных вытяжек из проб минеральных новообразований (в мг/л).

Наимен. образцов	ТТИ-1-2014(Б)	ТТИ-2-2014(Б)	ТТИ-3-2014(Б)	ТТИ-4-2014(Б) сталагмит	ТТИ-5-2014(Б) сталактит	ТТИ-7-2014(Б)	ТТИ-8-2014(Б)
pH	5,74	5,62	5,32	5,38	4,88	3,76	5,18
НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6,10	6,10	6,10	4,88	4,88	0,00	<0,05
F <sup>-</sup>	0,38	0,34	<0,19	<0,19	0,30	<0,19	0,19
Сl <sup>-</sup>	4,26	4,26	4,26	5,68	5,68	<0,05	1,42
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	230,40	268,80	278,40	307,20	288,00	278,40	268,80
Сумма А	241,14	279,50	288,76	317,76	298,86	278,40	270,41
Na <sup>+</sup>	100,40	122,40	103,30	123,32	95,38	56,94	73,30
K <sup>+</sup>	6,22	2,98	18,35	9,80	36,66	86,14	119,30
Ca <sup>2+</sup>	4,00	4,80	4,00	3,20	3,20	2,40	1,70
Mg <sup>2+</sup>	1,46	1,46	1,90	2,43	6,32	3,65	0,65
Fe <sup>2+</sup>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Fe <sup>3+</sup>	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,35	<0,1	<0,1	<0,1	0,60	0,30	0,36
Al <sup>3+</sup>	<0,1	<0,1	0,40	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Сумма К	112,43	131,64	127,55	138,75	142,16	149,43	195,31
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28	<0,28
H <sub>2</sub> O — при 105° С	16,20	0,60	4,80	<0,01	4,96	<0,01	<0,01
Минерализация	353,57	411,14	416,31	456,51	441,02	427,83	465,72
Место отбора, T, ° С	Пещера 2014!, T = 38° С.		Пещера 2014с		Пещера 2014е	Пещера 2014close, T = 80–210° С.	Трещина, T = 360° С.

*Примечание.*

В. В. Аналитик Дунин-Барковская (АЦ ИВиС ДВО РАН). Навеска 250 мг на 500 мл. В нерастворимых остатках (н.о.) проб установлены (см. ниже результаты электронно-микроскопических исследований): ТТИ-7/2014(Б) — частицы окисленного (красно-бурого цвета) шлака с чёрными блестящими чёрными включениями (до 10 мкм), содержащими Fe, Ti (магнетит, титаномагнетит, ильменит), а также фазы, содержащие углерод; ТТИ-8/2014(Б) — тенорит; в н.о. остальных проб определены сульфиды Fe (пирит).

**Таблица 2.** Дифрактометрические данные проб новообразований в сопоставлении с данными рентгенографической картотеки PDF-2 (26-1425; 20-0927).

ТТИ- 1-2014(Б)	ТТИ- 2-2014(Б)	ТТИ- 3-2014(Б)	ТТИ- 4-2014(Б)	ТТИ- 5-2014(Б)	ТТИ- 7-2014(Б)	ТТИ- 8-2014(Б)	Тенардит Na <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) (26-1425)	KNaSO <sub>4</sub> (20-0927)
<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>	<i>d(I)</i>
					6,36 (6)			
					4,96 (7)			
						4,85 (6)		4,85(6)
4,66 (51)	4,65(50)	4,66(73)	4,66(82)	4,66(60)	4,66 (14)		4,65(71)	
		4,16(8)	4,15(4)					
		4,06(17)	4,06(6)		4,07(25)	4,02 (34)		4,02(35)
3,83 (11)	3,83(14)	3,84(16)	3,84(12)	3,84(11)		3,88 (4)	3,83(17)	
		3,69(10)	3,70(6)		3,66(31)	3,58 (35)		3,59(16)
					3,35(16)			
3,18 (52)	3,18(47)	3,18(51)	3,18(47)	3,18(42)	3,18(22)		3,18(52)	
3,07 (74)	3,07(39)	3,07(41)	3,07(57)	3,07(40)	3,08(10)		3,07(55)	
		2,97(9)	2,96(3)		2,93(86)			
						2,89(60)		2,89(68)
2,83 (6)		2,86(6)			2,83(100)			
2,78 (100)	2,78(100)	2,78(100)	2,78(100)	2,79(100)	2,78(35)	2,80(100)	2,78(100)	2,80(100)
						2,71(5)		
2,64 (61)	2,642(51)	2,645(69)	2,646(68)	2,645(63)	2,65(16)	2,615(6)	2,647(52)	2,61(6)
						2,523(11)	2,52(<1)	
					2,44(27)	2,434(7)		2,43(9)
		2,381(6)	2,38(3)		2,39(3)	2,389(37)	2,35(7)	2,393(16)
2,328(37)	2,327(28)	2,328(38)	2,330(44)	2,330(33)	2,33(19)	2,307(17)	2,327(25)	2,302(12)
2,209(8)	2,208(5)	2,205(6)	2,208(5)	2,206(5)	2,173(4)		2,212(6)	
					2,036(45)	2,009(48)		2,011(56)
1,993(4)			1,992(4)	1,990(5)				
1,918(4)	1,917(4)	1,918(3)					1,919(3)	
1,890(6)	1,890(5)	1,892(6)	1,892(6)	1,894(5)			1,893(3)	
1,863(59)	1,862(47)	1,863(43)	1,864(34)	1,864(39)	1,863(11)	1,863(4)	1,865(36)	
1,845(6)	1,836(7)	1,839(7)	1,841(7)	1,840(6)	1,847(9)	1,826(4)	1,841(5)	1,819(6)
1,798(7)	1,797(6)	1,797(7)	1,798(7)	1,800(7)		1,791(18)	1,800(4)	1,794(6)
1,678(27)	1,678(17)	1,678(18)	1,679(17)	1,680(16)	1,679(5)		1,681(13)	
1,661(17)	1,661(12)	1,662(17)	1,663(14)	1,662(13)	1,654(13)		1,663(8)	
					1,637(12)	1,630(14)		1,634(21)
						1,617(17)		1,618(21)
1,603(7)	1,603(7)	1,604(6)	1,604(6)	1,605(5)			1,606(4)	
1,588(4)							1,590(1)	1,579(4)
1,551(22)	1,551(15)	1,552(20)	1,552(25)	1,552(16)	1,552(3)		1,553(10)	
1,509(4)		1,509(4)	1,511(4)				1,512(2)	1,511(15)
1,496(10)	1,496(7)	1,497(6)	1,497(5)	1,497(5)	1,464(7)	1,509(11)	1,498(5)	
		1,427(7)				1,443(4)		1,443(8)
						1,402(12)		1,402(16)
1,427(7)	1,427(7)		1,428(6)	1,428(6)	1,417(10)		1,427(5)	
	1,385(5)	1,385(5)	1,385(5)	1,385(4)	1,400(5)	1,376(5)	1,386(2)	1,377(4)
	1,322(7)	1,322(9)	1,322(7)	1,322(6)			1,323(4)	
	1,295(10)	1,295(11)	1,295(9)	1,295(9)	1,298(3)		1,296(4)	
	1,278(10)	1,278(8)	1,277(6)	1,278(6)	1,276(8)	1,261(6)	1,279(4)	1,261(9)

Примечание. Дифрактометр XRD -7000, съёмки проходили в режиме непрерывного сканирования, излучение CuK<sub>α</sub>, напряжение 30 кВ, ток 30 мА, интервал углов 2θ 6–80°. Скорость сканирования 1°/мин, шаг сканирования 0,05°, экспозиция в точке 3 секунды. При съёмке используется система поликапиллярной оптики. Аналитик М. А. Назарова (ИВиС ДВО РАН).

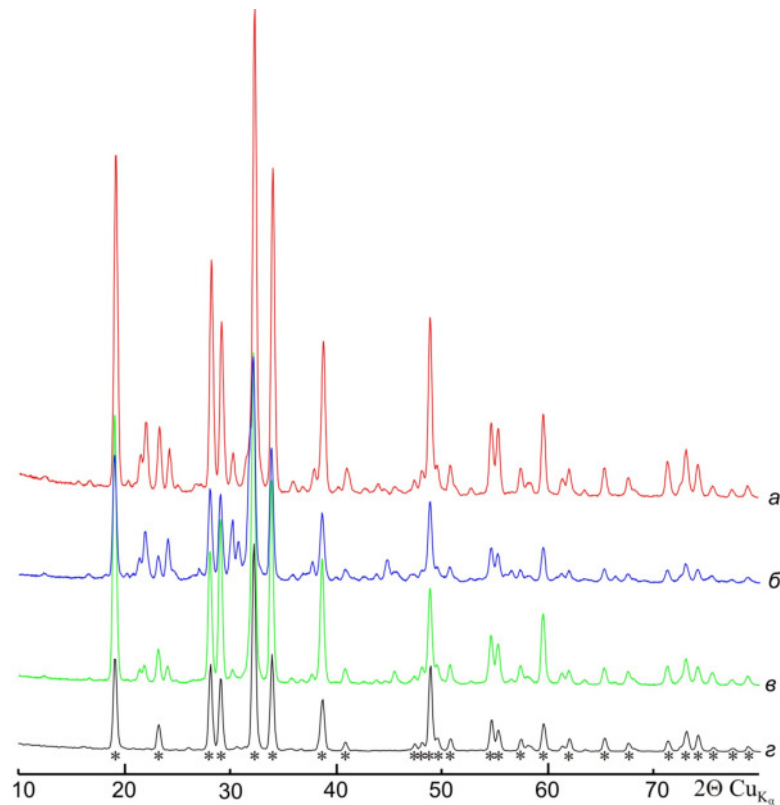


Рис. 5. Дифрактограммы проб новообразований ТТИ-2014 (Б): а – 3; б – 5; в – 4; г – 2. Основные линии тенардита отмечены звездочкой (\*);

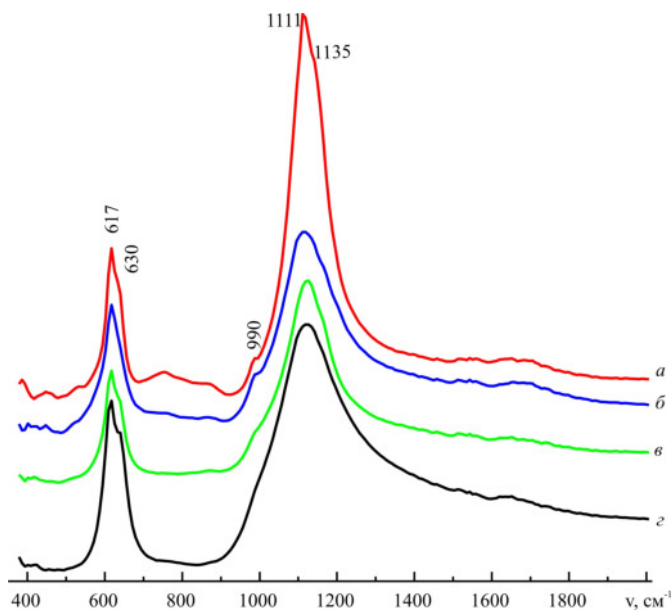


Рис. 6. Инфракрасные спектры проб новообразований ТТИ-2014 (Б): а – 3; б – 5; в – 4; г – 2;

Вблизи трещин неглубокого заложения (см. рис. 2) с нижней стороны, отслоившейся от основной массы поверхностной корки лавового потока, можно было встретить рыже-бурые, рыжие маломощные тонкодисперсные налёты фтористого минерала ральстонита (табл. 3), образовавшегося при взаимодействии фтор содержащих газов

с окружающими породами. Среди частиц изменённой фазы встречались обогащённые включениями (до 2 мкм) со значительным содержанием Ва (до 25% мас.), а также очень мелкими включениями ( $\leq 1$  мкм), содержащими (в % масс.): Ti (до 6), Ni (до 8), Cr (до 14), Mn (до 1). Высокая активность фтора способствует выносу всех тёмноцветных компонентов из лавы, в связи с чем может происходить также осветление породы с замещением, в зависимости от температуры, основной массы породы минералами кремнезёма – опалом или кристобалитом.

Морфология индивидов минералов фумарол изучалась на сканирующем электронном микроскопе, позволяющем также проанализировать пропорции элементов. На рис. 7а, б, в представлено изображение кристаллов исследуемой пробы ТТИ-1/2014 (Б), имеющих дипирамидальный облик, характерный для кристаллов тенардита [4]. Другой сульфат, встречающийся в подчинённом количестве, представлен большей частью виде скелетных форм кристаллов (рис. 8). Из примесей в нём установлен в значительных количествах тенорит.

В единственной пробе зафиксировано присутствие медистой кристаллической фазы изумрудно-зелёного цвета, которая по данным микроскопических исследований, как нам представляется, сохранилась будучи закапсулированной в скрытокристаллической фазе другого состава (изменённая внешняя фаза) бледно голубого цвета (рис. 9 а, б,

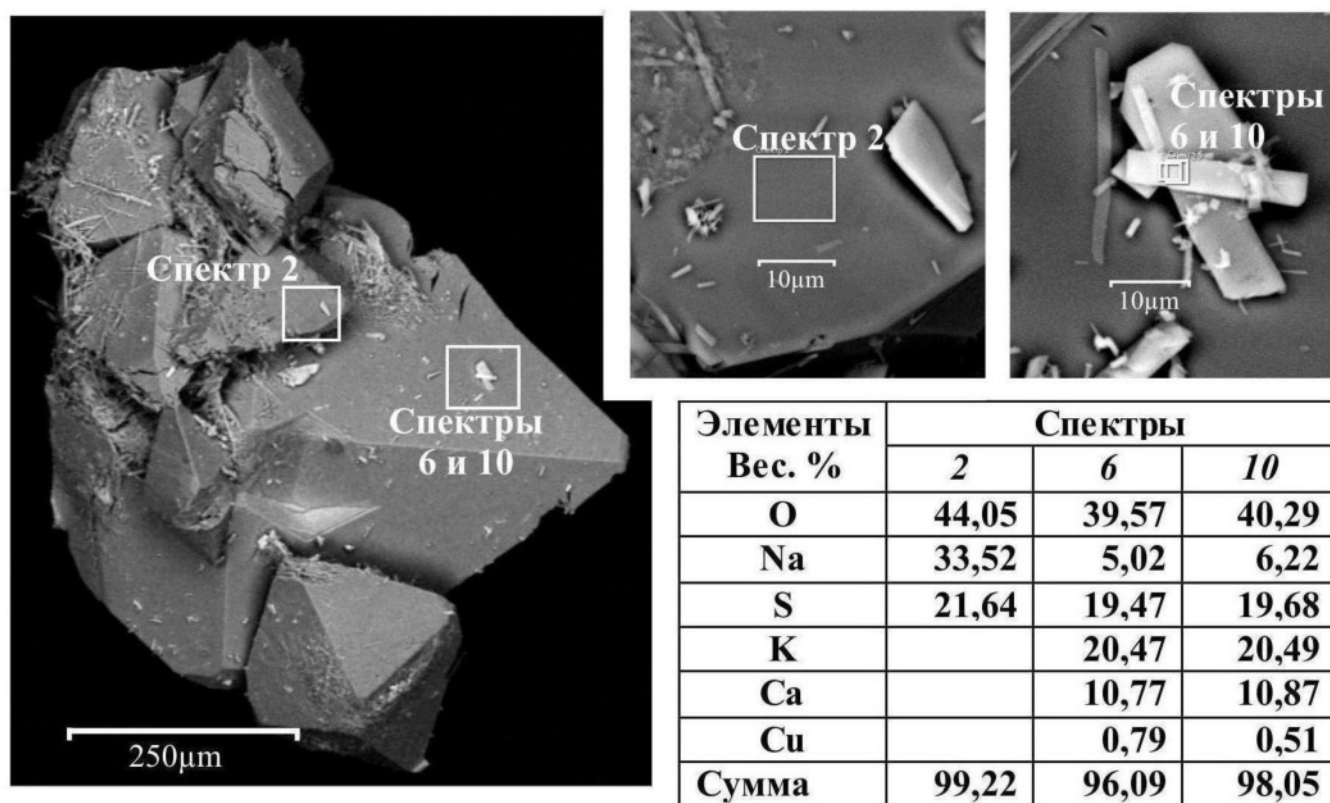


Рис. 7. СЭМ — изображение тенардита (ТТИ-1-2014(Б)): а — кристаллы тенардита дипирамидального облика; б и в — примесные фазы в тенардите;

Таблица 3. Дифрактометрические данные пробы ТТИ-11-2014(Ф) новообразований в сопоставлении с литературными данными [6].

№	2θ (card)	d (card)	2θ (exp.)	d (exp.)	hkl	Phase name
1	15,49	5,7215	15,383(11)	5,755(4)	111	Ralstonite
2			29,11(3)	3,065(3)	032	
3	29,90	2,9880	29,806(14)	2,9951(14)	311	Ralstonite
4	31,27	2,8608	31,163(10)	2,8677(9)	222	Ralstonite
5	39,64	2,2735	39,60(3)	2,2738(17)	331	Ralstonite
6	44,80	2,0229	44,72(3)	2,0249(14)	422	Ralstonite
7			46,03(9)	1,970(4)	523	
8	47,68	1,9072	47,512(19)	1,9121(7)	511	Ralstonite
9	52,22	1,7519	52,104(19)	1,7539(6)	440	Ralstonite
10	62,13	1,4940	61,92(5)	1,4973(10)	622	Ralstonite

в, г). Интерес представляет наличие во внутренней кристаллической зоне (спектр 128) фазы, обогащённой углеродом.

На рис. 10 представлены результаты электронно-микроскопического изучения минеральных фаз, обнаруженных при изучении под бинокляром нерастворимых остатков водных вытяжек (см. табл. 1) из проб новообразований. Обращает на себя внима-

ние факт обнаружения в нерастворимых остатках водных вытяжек из проб с сульфатами Na, K частиц шлака с оксидными формами рудных минералов (см. примечание к табл. 1) в отличие от более восстановленных форм рудных — сульфидов Fe (пирит, рис. 10) в тенардитах. Образование пирита можно представить как результат взаимодействия железа из лав с газами группы серы.

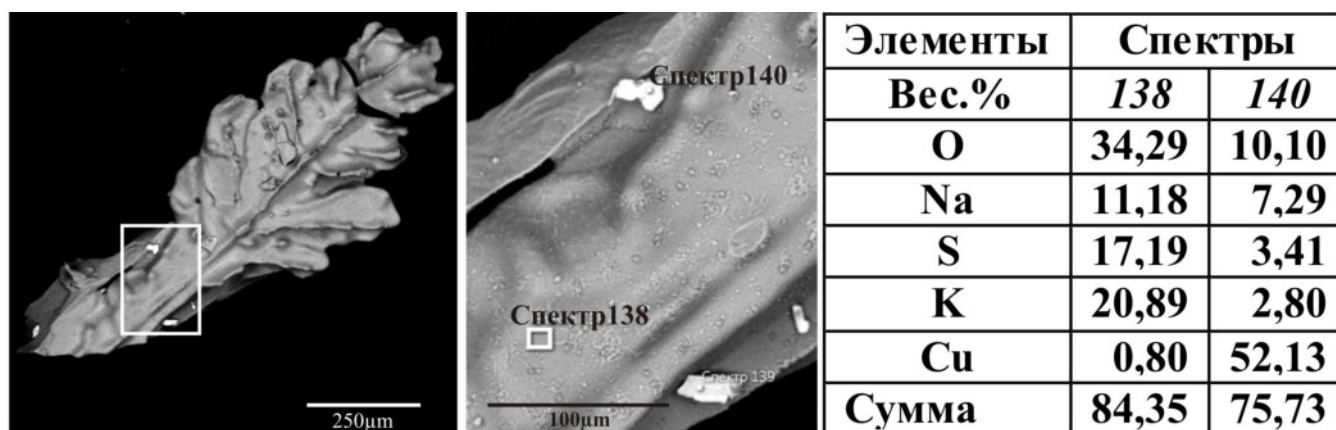


Рис. 8. СЭМ — изображение агрегата скелетных кристаллов сульфата Na, K (проба ТТИ-8–2014(Б));

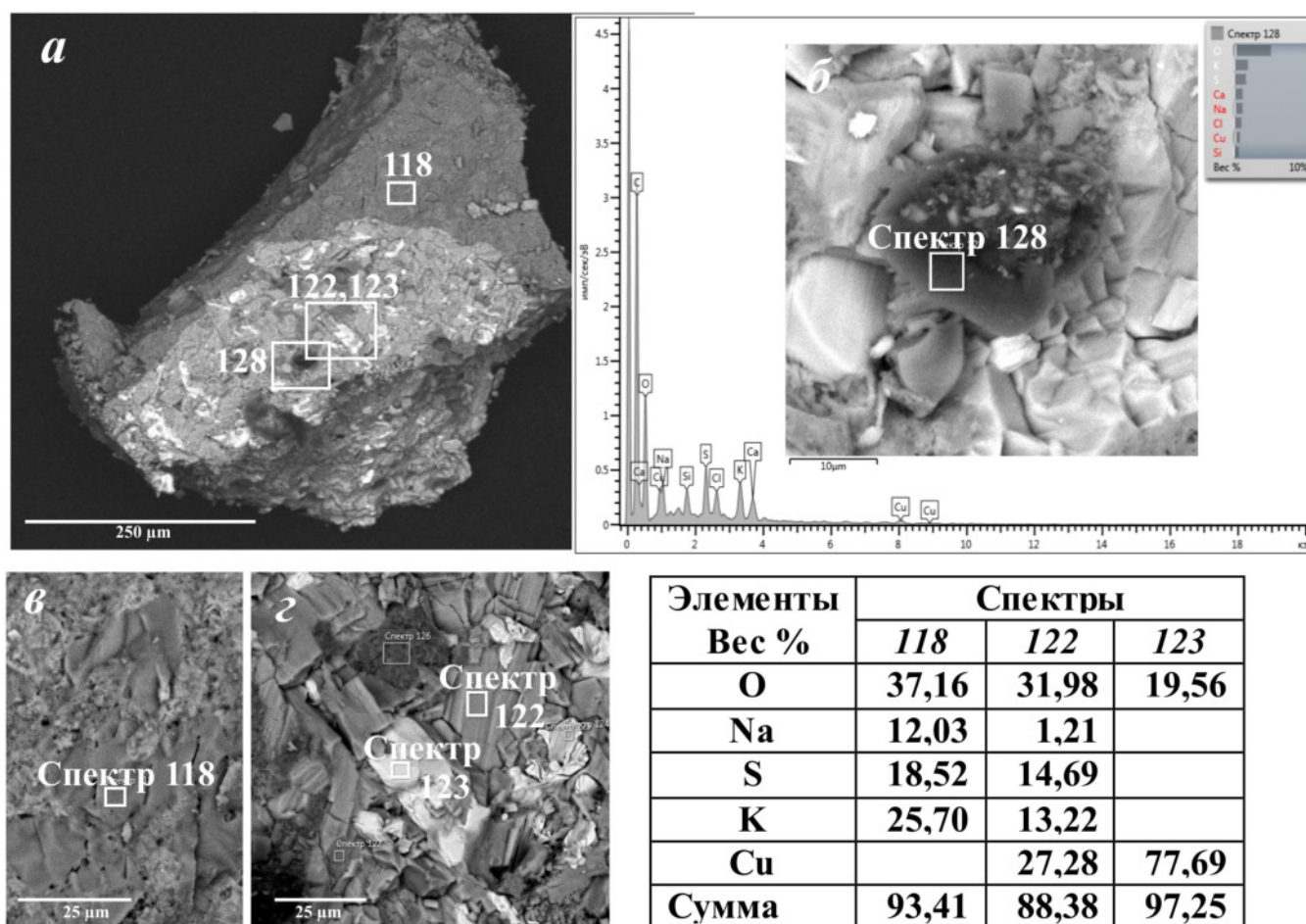


Рис. 9. СЭМ — изображение пробы с медистой кристаллической фазой изумрудно-зелёного цвета;

На рис. 11 а, б, в, г изображены минеральные фазы, встречающиеся в виде редких находок. Это самородный селен и самородный алюминий.

**Выводы.**

Предварительные результаты по изучению состава продуктов деятельности вулканических газов лавовых потоков спустя год после окончания извержения свидетельствуют об однообразии их ми-

нерального состава. Ведущим минералам является тенардит  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . В подчинённом количестве встречается ещё сульфат Na, K, ральстонит  $\text{Na}_x(\text{Mg}_x\text{Al}_{2-x})(\text{F}, \text{OH})_6 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ , а также ангидрит  $\text{CaSO}_4$  и продукт его гидратации гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , часто сопутствующие минералу тенардиту; из медистых соединений, предположительно, эвхлорин  $\text{KNaCu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ . В намного подчинённом количестве установлены тенорит  $\text{CuO}$ , а также галит

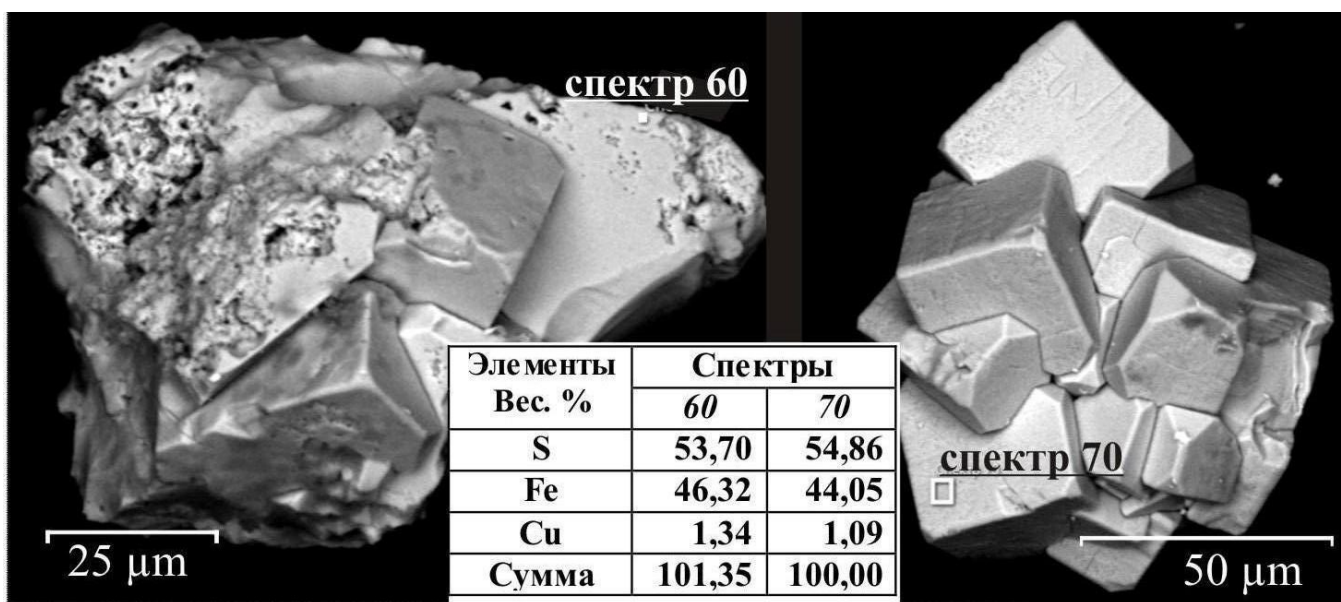


Рис. 10. СЭМ – изображение сульфидов Fe (пирит);

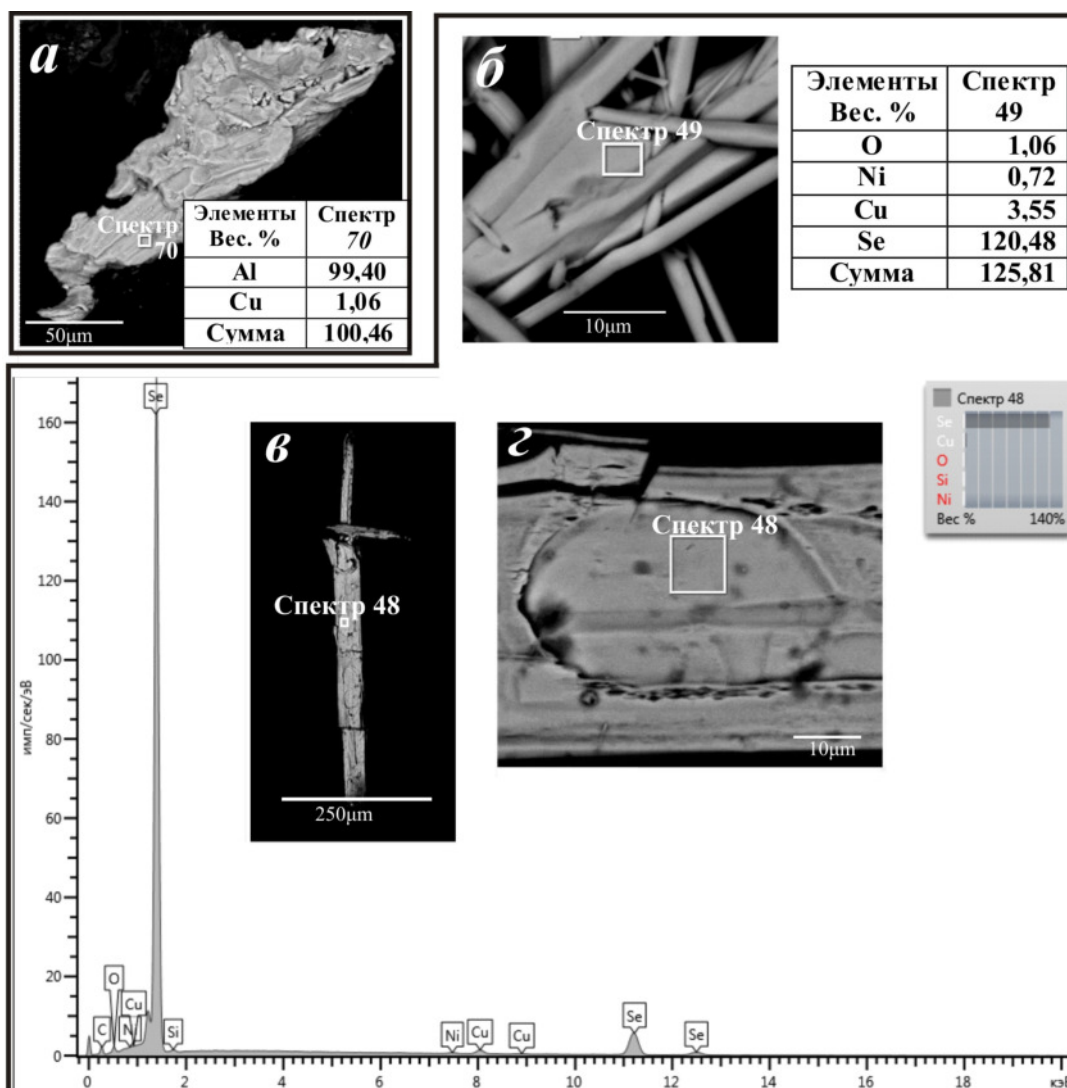


Рис. 11. СЭМ – изображение самородных: а – алюминия; б, в, г – селена.



NaCl. Везде повсеместно фиксируется присутствие Cu. В виде единичных зёрен и единичных находок обнаружены, соответственно, сульфиды Fe (пирит?), а также самородный Se, самородный Al и углеродистые фазы неизвестного состава. Из микроэлементов в новообразованных минеральных фазах зафиксированы: Mg, Al, Ba, Pb, Zn. Минералообразование сопровождается интенсивным окислением лав и локальным фторметасоматозом.

#### Список литературы

1. Вергасова Л. П., Карпов Г. А., Филатов С. К., Москалёва С. В., и др. Об эксгальационной минерализации лавовых потоков Трещинного Толбачинского извержения им 50-летия ИВиС ДВО РАН // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 27–28 марта 2014 г. (электронный вариант)
2. Гвоздецкий Н. А. Карст. М.: Из-во Мысль, 1981. 214 с.
3. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Аэрофотограмметрические исследования Нового Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Материалы ежегодной конференции, посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. 2014. С. 58–62.
4. Дэна Дж. Д., Дэна Э. С., Пэлач Ч., Берман Г., Фрондель К. Система минералогии. Том II, полутом 1, М.: Из-во ИЛ, 1953, 773 с.
5. Самойленко С. Б., Мельников Д. В., Магуськин М. А., Овсянников А. А. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. №2. Вып. №20. С. 20–22.
6. Effenberger H, Kluger F. Ralstonite: a contribution to the knowledge of composition and crystal structure // Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte 1984 (1984) 97–108.
7. Menke H. Mineralspektren, tt. I, II. 1962, 1966.