

УДК 551.231

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ В ПРОДУКТАХ ФУМАРОЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ БОЛЬШОГО ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

© 2012 г. Л. П. Вергасова¹, С. К. Филатов²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9,
e-mail: vlp@kscnet.ru

² Кафедра кристаллографии Санкт-Петербургского государственного университета
199034 Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9,
e-mail: filatov.stanislav@gmail.com

Поступила в редакцию 03.04.2011 г.

Приводится сводка и охарактеризованы некоторые физические свойства и химизм новых природных соединений семи различных классов из отложений фумарол Большого трещинного Толбачинского извержения (1975–1976 гг., Камчатка), установленных по данным минералогических и кристаллохимических методов исследования.

Исполнилось 35 лет с начала поствулканической деятельности на новообразованных телах — шлаковых конусах и лавовых потоках Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ, 1975–1976 гг., Камчатка), крупнейшего в современную эпоху Курило-Камчатского региона базальтового извержения [Большое трещинное ..., 1984]. За это время в результате целенаправленных режимных наблюдений на БТТИ с использованием современных минералогических и кристаллохимических методов исследований, выполненных в Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН и на кафедре кристаллографии Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), обнаружено 120 минералов эксгаляций. Это значительно превышает количество минеральных видов, установленных в отложениях фумарол на вулканах Камчатки [Набоко, 1959; Серафимова, 1979]. Причем каждый четвертый фумарольный минерал БТТИ оказался новым (табл. 1).

Минералы вулканических эксгаляций — особая генетическая группа. Систематические исследования, выполнявшиеся длительное время в одном методическом плане, позволили не только накопить обширный экспериментальный материал, но также получить ряд приводимых ниже обобщений и на этом основании выделить объекты исследования в особую генетическую группу минералов вулканических эксгаляций [Вергасова, Филатов, 1993]. Такие минералы образуются в поверхностных условиях при участии флюидной фазы при повышенных температурах и давлении, близком к атмосферному. Результаты исследований, анализа и систематики минералов фумарол БТТИ вносят дополнение в понимание геохимических особенностей конденсированных флюид-

ных потоков основных магм, их металлоносности, значительно расширяют представление о минеральных формах концентрации меди и о формах нахождения отдельных рудных компонентов в постмагматическом процессе.

С остыванием первых порций лавы, излившихся в пределах Северного прорыва (СП) БТТИ, на поверхности лавовых потоков появились пестро окрашенные пятна. Последние имели четкую пространственную связь с фумаролопроявлением. Появление пестро окрашенных пятен на фоне темно-серых изверженных пород (вулканитов) может служить одним из признаков отделения вулканических эксгаляций и формирования связанных с ними минеральных образований. Фумарольная деятельность на Новых Толбачинских вулканах и лавовых потоках продолжается с разной степенью активности и поныне, наиболее интенсивно в кратерных зонах Первого, Второго, Третьего конусов СП и конуса Южного прорыва (ЮП). Поствулканическая деятельность БТТИ характеризуется широким развитием температурных неоднородностей, значительным преобразованием изверженных пород под воздействием фумарольных газов и формированием разнообразных минеральных новообразований и рудных скоплений, распространенных в участках поверхностной разгрузки газов. Комплексное исследование твердых продуктов фумарольной деятельности БТТИ выявило их уникальность по масштабу проявления, разнообразию минеральных фаз и богатству элементного состава. При этом значительно, на 52 наименования, был расширен список минералов, встречающихся на вулканах Камчатки, выявлена широкая ассоциация минералов меди (40, из них 10 ведущих). Установлено,

Таблица 1. Новые минеральные виды, обнаруженные в отложениях фумарол Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка, 1975–1976 гг.)

№ п/п	Название минерала	Формула минерала	Литература
<i>Фториды</i>			
1.	Меняйловит	$\text{Ca}_4\text{AlSi}(\text{SO}_4)\text{F}_{13} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	[Вергасова и др., 2004]
<i>Хлориды и оксохлориды</i>			
2.	Толбачит	CuCl_2	[Вергасова, Филатов, 1983]
3.	Меланоталлит	Cu_2OCl_2	[Вергасова, Филатов, 1982]
4.	Пономаревит	$\text{K}_4\text{Cu}_4\text{OCl}_{10}$	[Вергасова и др., 1988в]
5.	Лесюкит	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	[Вергасова и др., 1997а]
<i>Карбонаты</i>			
6.	Хлорартинит	$\text{Mg}_2(\text{CO}_3)\text{ClOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	[Вергасова и др., 1998б]
<i>Арсенаты</i>			
7.	Аларсит	AlAsO_4	[Семенова и др., 1994]
8.	Копарсит	$\text{Cu}_4\text{O}_2[(\text{As}, \text{V})\text{O}_4]\text{Cl}$	[Vergasova et al., 1999а]
9.	Урусовит	$\text{Cu}[\text{AlAsO}_5]$	[Krivovichev et al., 2000; Vergasova et al., 2000]
10.	Филатовит	$\text{K}[(\text{Al}, \text{Zn})_2(\text{Al}, \text{Si})_2\text{O}_8]$	[Vergasova et al., 2004]
11.	Брадачекит	$\text{NaCu}_4(\text{AsO}_4)_3$	[Filatov et al., 2001]
12.	Ламмерит-β	$\beta\text{-Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	[Старова и др., 2011]
<i>Ванадаты</i>			
13.	Ленинградит	$\text{PbCu}_3(\text{VO}_4)_2\text{Cl}_2$	[Вергасова и др., 1990]
14.	Аверьевит	$\text{Cu}_5(\text{VO}_4)_2\text{O}_2 \cdot n\text{MX}$	[Вергасова и др., 1998а; Starova et al., 1997]
<i>Сульфаты и оксосульфаты</i>			
15.	Пауфлерит	$\beta\text{-VO}_2\text{SO}_4$	[Krivovichev et al., 2007]
16.	Пийпит	$\text{K}_4\text{Cu}_4\text{O}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot \text{MeCl}$	[Вергасова и др., 1984; Филатов, Вергасова, 1989]
17.	Федотовит	$\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$	[Вергасова и др., 1988б]
18.	Камчаткит	$\text{KCu}_3\text{OCl}(\text{SO}_4)_2$	[Вергасова и др., 1988а]
19.	Ключевскит	$\text{K}_3\text{Cu}_3\text{Fe}^{3+}\text{O}_2(\text{SO}_4)_4$	[Вергасова и др., 1989а]
20.	Алюмоключевскит	$\text{K}_3\text{Cu}_3\text{AlO}_2(\text{SO}_4)_4$	[Gorskaya et al., 1995]
21.	Влодавецит	$\text{AlCa}_2(\text{SO}_4)_2\text{F}_2\text{Cl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	[Вергасова и др., 1995а]
22.	Набокоит	$\text{Cu}_7\text{TeO}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$	[Попова и др., 1987]
23.	Атласовит	$\text{Cu}_6\text{Fe}^{3+}\text{Bi}^{3+}\text{O}_4(\text{SO}_4)_5 \cdot \text{KCl}$	[Попова и др., 1987]
24.	Вергасоваит	$\text{Cu}_3\text{O}[(\text{Mo}, \text{S})\text{O}_4][\text{SO}_4]$	[Vyukova et al., 1998]
<i>Селениты и оксоселениты</i>			
25.	Софиит	$\text{Zn}_2(\text{SeO}_3)\text{Cl}_2$	[Вергасова и др., 1989б]
26.	Ильинскит	$\text{NaCu}_5\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_3$	[Вергасова и др., 1997б]
27.	Бернсит	$\text{KCaCu}_7\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_9$	[Krivovichev et al., 2001]
28.	Хлороменит	$\text{Cu}_8\text{ZnO}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_6$	[Vergasova et al., 1999б]
29.	Георгбокиит	$\text{Cu}_5\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_2$	[Вергасова и др., 1999]
30.	Парагеоргбокиит	$\beta\text{-Cu}_5\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_2$	[Вергасова и др., 2006]
31.	Прьюиттит	$\text{KPb}_{1.5}\text{ZnCu}_6\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_{10}$	[Кривовичев, 2008]
32.	Аллохалькоселит	$\text{Cu}^+\text{Cu}^{2+}_5\text{PbO}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_5$	[Вергасова и др., 2005]

Примечание. Жирным шрифтом выделен кислород оксоослей, не входящий в кислотные остатки.

что на фоне преобладания литофильных компонентов (K, Na, Mg, Ca, Al, Si, Rb, Cs, P, V, S, O, F, Cl) значительная роль в минералообразующих процессах принадлежит таким халькофильным элементам, как S, Cu, Zn, Pb, As, Se, Au, Bi, Te (в порядке убывания). Из сидерофильных компонентов встречаются Fe и Mo. Максимально высокое содержание рудных элементов отмечается обычно для меди, свинца и цинка. В зоне проявления активных фумарольных процессов на Втором конусе СП БТТИ установлено современное вулканогенно-экспаляционное рудопроявление, преимущественно медного состава [Набоко, Главатских, 1983]. Оно сопровождалось As, V, Se, Bi, Te, Au минерализациями. Это говорит о том, что наиболее интенсивное образование экспаляционных рудных минералов имеет место в постмагматический период прорыва магнезиальных базальтов в 1975 г. в пределах Северной группы Новых Толбачинских вулканов [Большое трещинное ..., 1984]. Рудообразующий процесс происходил со значительным привнесом щелочных компонентов Na и K. Практически на всех участках приповерхностное медное рудопроявление сопровождается фторметасоматическим изменением пород. Отмечалось местами также интенсивное преобразование изверженных пород под воздействием фумарольных газов, которое характеризуется полным выносом петрогенных компонентов, кроме кремния (в результате сернокислотного выщелачивания), или формированием метасоматически измененных пород с алюминиевой специализацией, имеющих широкое распространение в пределах Первого конуса СП БТТИ [Вергасова и др., 2007].

Новые минералы фумарол БТТИ. Особенностью современной вулканогенно-экспаляционной минерализации БТТИ является обнаружение значительного числа новых природных соединений. К настоящему времени (см. табл. 1) установлено и описано 32 (из них 24 в составе рудного вещества) новых минерала, в открытии и исследовании 29 из которых непосредственное участие принимали авторы настоящей статьи. Большинство новых минералов не имело аналогов среди природных и синтезированных соединений. Синтетические аналоги были выявлены для толбачита, меланоталлита, хлорартинита, аларсита, брадачекита, ламмерита-β, меняйловита и георгбокиита. Меланоталлит, включенный в таблицу новых минералов, ранее считался сомнительным минералом. Об этом минерале с вулкана Везувий [Zambonini, 1935] было известно только то, что он неустойчив и меняет свой черный цвет на зеленый, вследствие чего был назван в свое время меланоталлитом (melanotallo — с итальянского — черно-зеленый). Для него также были определены химический состав и кристаллохимические характеристики.

Как видно из табл. 2, большая часть новых минералов обнаружена в отложениях фумарол Второго конуса — мощного очага разгрузки флюидных потоков, на который приходится основной объем излившихся лав (преимущественно, магнезиальные базальты умеренной щелочности) в пределах Северной группы Новых Толбачинских вулканов [Большое трещинное ..., 1984].

Названия новым минералам даны по географическому признаку (по месту находки) как, например, толбачит, камчаткит, ключевскит. Ряд названий отражает химический состав, например, аларсит, хлороменит, копарсит. Некоторые новые минералы названы в честь отечественных вулканологов, например, пономаревит, аверьевит, меняйловит и др., а также в честь отечественных и зарубежных ученых, внесших значительный вклад в дело развития Наук о Земле, например, пийпит, софиит, владавецит, георгбокиит, урусовит, федотовит, брадачекит, пауфлерит и др. Все новые минералы БТТИ были в свое время утверждены Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциации (ИМА), на каждый новый минерал был выдан диплом Комиссии по новым минералам Российского минералогического общества (РМО, ранее ВМО).

Физические свойства новых минералов фумарол БТТИ. На фумарольных полях действующих вулканических центров интенсивное преобразование вулканитов и формирование минеральных отложений происходит на поверхности, то есть в условиях атмосферного давления в резко градиентном поле температуры и парциального давления кислорода вокруг локальных выходов вулканических газов. Это типичные вулканогенно-экспаляционные образования. Как следствие своеобразных термодинамических условий скопления минеральных новообразований, в том числе новых минералов, в подавляющей массе встречались в виде дисперсных, скрытокристаллических, тонкозернистых масс, а также кристаллических зерен с неправильными внешними очертаниями. Например, дисперсные отложения нового минерала лесюкита в пределах Первого конуса СП БТТИ по состоянию на 2003 г. прослеживались на расстоянии более 250–300 м в пределах юго-восточной и восточной кромок кратера и далее на 5–10 м (местами до 20 м и более) вниз от кромки кратера по внешним восточному и внутреннему юго-восточному склонам, то есть на площади первые тыс. м² [Вергасова и др., 2007].

В полостях (в рудных камерах [Набоко, Главатских, 1992]), под глыбами, под минеральными экранами (флюидный экран), то есть в местах с относительно стабильным термодинамическим режимом минералообразования, образовывались

Таблица 2. Распространенность новых минералов на Новых Толбачинских вулканах

Северный прорыв БТТИ			Южный прорыв БТТИ
Первый конус	Второй конус	Третий конус	Конус, подножие конуса
Лесюкит	Толбачит	Лесюкит	Лесюкит
Меняйловит	Меланоталлит	Хлорартинит	Хлорартинит?
Хлорартинит	Пономаревит		Ильинскит
Пауфлерит	Меняйловит		Георгбокиит
Софиит	Аларсит		Софиит
	Копарсит		
	Урусовит		
	Филатовит		
	Брадачекит		
	Ламмерит-β		
	Ленинградит		
	Аверьевит		
	Пийпит		
	Федотовит		
	Камчаткит		
	Ключевскит		
	Алюмоключевскит		
	Влодавецит		
	Набокоит		
	Атласовит		
	Вергасоваит		
	Софиит		
	Ильинскит		
	Бернсит		
	Хлороменит		
	Парагеоргбокиит		
	Прыюиттит		
	Аллохалькоселит		

более крупнозернистые агрегаты, размер индивидов в которых достигал более 0.1 мм.

На практике для идентификации более или менее крупных кристаллов можно пользоваться внешними диагностическими признаками изученных новых минералов. Приведем некоторые из них. Для ряда новых минералов облик индивидов весьма типичен. Изометричная форма зерен характерна для пономаревита, меняйловита, аларсита, предположительно, у бернсита и парагеоргбокиита. Ярко выраженные формы, вытянутые в одном направлении, встречены у толбачита, урусовита, пийпита, ключевскита, алюмоключевскита, ильинскита, менее — у копарсита, пауфлерита, ламмерита-β, камчаткита, вергасоваита, георгбокиита, прыюиттита, аллохалькоселита. Таблитчатая до чешуйчатой форма зерен

отмечается у меланоталлита, филатовита, ленинградита, аверьевита, федотовита, набокоита, атласовита, влодавечита, софиита, хлороменита. Наибольшее количество простых кристаллографических форм обнаружено на кристаллах брадачекита и георгбокиита. Для лесюкита и хлорартинита форма индивидов не установлена. В большинстве случаев минеральные массы с новыми минералами наблюдаются в виде сплошных зернистых агрегатов, в которых отдельные зерна не обладают ясно выраженными кристаллографическими признаками.

Цвет минерала является одним из его важнейших диагностических признаков. Почти половина новых минералов меди имеет характерную для соединений меди зеленую окраску, которая у каждого медистого минерала существенно варьирует

вала в оттенках либо по степени интенсивности. Цвета, не характерные для соединений, содержащих Cu, проявляют следующие новые минералы меди: аллохалькоселит и георгбокиит окрашены в темно-бурый цвет; бёрнсит, пономаревит и ленинградит имеют красный цвет; минералы ряда атласовит–набокоит и камчаткит – буровато-желтый; брадачекит – синий; толбачит – золотисто-бурый. Все новые минералы меди прозрачны, кроме аверьевита, копарсита и меланоталлита, имеющих черный цвет. Для всех минералов меди характерен сильный стеклянный блеск. Остальные новые минералы (кроме бледно-зеленого пауфлерита): аларсит, филатовит, влодавецит, меняйловит и софиит – бесцветны, имеют стеклянный блеск и так же прозрачны, кроме лесюкита, хлорартинита, окрашенных в желтовато-кремовый и молочно-белый цвет, соответственно.

В качестве дополнительных тестов возможно проведение элементарных качественных химических анализов. Нерастворимость в воде многих новых минералов является их одним из основных признаков. При взаимодействии большинства новых минералов меди (кроме толбачита) с водой образуется нерастворимый осадок, а при взаимодействии с водным раствором аммиака проявляется интенсивно синий цвет. Все новые минералы хорошо растворяются в слабокислых растворах при соотношении дистиллированной воды и концентрированной кислоты 20 : 1.

Во многих случаях, когда невозможно набрать в достаточном количестве вещества для полного химического анализа, методом порошковой дифрактометрии и с помощью спектрального анализа, а также по совокупности визуальных признаков и некоторых оптических констант удается точно определить исследуемый минерал.

Многие минералы эксгаляций, в том числе и новые минералы, неустойчивы в атмосфере воздуха, что существенно затрудняло их отбор, хранение и изучение. Предполагается, что за счет кислорода и влаги, содержащихся в воздухе, а также под воздействием света (фотохимические реакции) большинство новых минералов теряют прозрачность, меняют свою окраску (в частности, все минералы меди приобретают одинаковый зеленый цвет) и дезинтегрируются в порошок скрытокристаллического облика. Весьма неустойчивым новым минералом оказался толбачит, вторичным продуктом преобразования которого является минерал эриохальцит $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [Вергасова, Филатов, 1983]. Комплексное исследование большинства вторичных фаз, в частности по новым минералам меди, не проводилось.

Химическая характеристика новых минералов фумарол БТТИ. В составе новых минералов принимают участие 24 видообразующих элемента: Cu^{2+} , K, Al, Zn, Ca, Pb, Mg, Fe^{3+} , Cu^+ , Na, Cd, Te,

Bi, Si, Mo, O, Cl, H, S, Se, As, V, F, C. Присутствие таких экзотических элементов, как Rb и Cs, выявленных по данным химических исследований в новом минерале аверьевите, объясняется наличием в его структуре больших каналов, в которые могут входить как нейтральные молекулы, так и заряженные частицы достаточно большого объема [Starova et al., 1997]. По частоте встречаемости наиболее распространены в катионной части новых минералов медь и калий.

Новые минеральные виды из отложений фумарол БТТИ относятся к семи различным классам химических соединений (см. табл. 1). Среди них выделены фториды, хлориды и оксохлориды, карбонаты, арсенаты, ванадаты, сульфаты и оксосульфаты, селениты и оксоселениты. Большинство новых минералов являются безводными соединениями. Более точной классификации новых минералов в кристаллохимической систематике химических соединений способствовало определение кристаллических структур минералов.

По количеству новых минералов с незначительным превышением доминирует класс сульфаты и оксосульфаты. Наиболее широко распространенным новым минералом меди на БТТИ является пономаревит. Самые значительные скопления среди новых минералов меди отмечались для толбачита в начальный период наблюдений за поствулканической деятельностью БТТИ. За счет открытия новых минералов фумарол класса селениты и оксоселениты значительно (на 10 наименований) возросло число известных минералов селена. Примечательно открытие 25 минералов меди разных классов, что во много раз превышает количество минералов меди (4) за всю предшествующую историю их изучения на вулканах Камчатки [Набоко, 1959; Серафимова, 1979]. 13 новых минералов меди содержат калий и натрий, что говорит в пользу представления о газовой форме переноса меди.

Как видно из табл. 1, значительная часть новых минералов представлена соединениями особого химического состава. Относительно простые формулы имеют лишь 5 (из 32) минералов: толбачит, аларсит, ламмерит-β, брадачекит и пауфлерит. Ряд минералов имеют в своем составе два и более типа анионов: меняйловит, хлорартинит, ленинградит, камчаткит, влодавецит, ильинскит и др. Наиболее частым дополнительным анионом оказывается кислород, вхождение в минерал которого приводит к образованию оксосолей (см. табл. 1). Непростой химический состав имеет меняйловит. По типу соединения он является аналогом ранее известной серии минералов, названной в честь Ф.В. Чухрова, и идентичен с ней структурно, но отличается по преобладанию иного катиона – Si.

Физические и химические свойства минерального вида находятся в прямой зависимости от состава и структуры вещества. С этой точки зрения в самостоятельный минеральный вид выделены парагеоргбоксит, ламмерит-β и пауфлерит, которые являются полиморфными модификациями известных минералов и искусственного соединения, а именно георгбоксита, ламмерита и VO_2 , соответственно.

Особенностью минеральных фаз, возникающих и существующих в условиях современного вулканического процесса, является изоморфизм. Широким пределом изоморфных замещений различных химических элементов способствуют высокие температуры образования минералов вулканических эксгальций [Маракушев, 1988]. К крайним членам изоморфных рядов близки минералы ключевскит, алюмоключевскит, атласовит и набокоит, выделенные на этом основании в самостоятельные минеральные виды [Никель, 1992]. Вариации химического состава новых минералов обусловлены изоморфными замещениями как по схеме изовалентного (например, в копарсите), так и гетеровалентного изоморфизма (например, в филатовите).

Около половины перечня новых минералов меди: толбачит, меланоталлит и пономаревит (хлориды и оксохлориды), а также пийпит, федотовит, камчаткит, ключевскит, алюмоключевскит (сульфаты и оксосульфаты) — являются, наряду с эвхлорином $\text{NaKCu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$, халькокианитом CuSO_4 , долерофанитом $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)$ и теноритом CuO , ключевыми минеральными видами современного вулканоогенно-эксгальционного медного рудопроявления.

В другой половине списка находятся минералы, сопровождающие медную минерализацию, — второстепенные минералы: урусовит, брадачекит, филатовит и ленинградит (арсенаты и ванадаты), а также акцессорные минералы — копарсит и аверьевит (арсенаты и ванадаты) и почти все, кроме софиита, соединения меди класса селенитов и оксоселенитов, а также пауфлерит (сульфаты и оксосульфаты).

Рудный новый минерал софиит образует самостоятельные скопления в значительном отдалении, но во взаимосвязи с проявлением медной минерализации.

Из нерудных новых минералов — аларсит входит в состав основных типов минеральных ассоциаций эксгальционной минерализации БТТИ. Влодавецит, лесюкит, хлорартинит, так же как и софиит, образуют самостоятельные скопления, но в намного более существенных количествах. Новые минералы из зоны околорудных (фторметасоматических) изменений представлены менайловитом и влодавцитом. Лесюкит установлен в зоне метасоматических преобразований

изверженного материала, приведших к локальным устойчивым проявлениям вещества с алюминиевой специализацией (в основном, на Первом конусе СП БТТИ) [Вергасова и др., 2007]. Избирательное концентрирование минерального вещества вплоть до рудопроявления существенно медного состава в пределах жерловых фаций СП БТТИ может указывать на перспективную рудоносность геоструктур базальтового вулканизма региональных зон шлаковых конусов типа Толбачинской.

В обобщаемых здесь вулканологических исследованиях, наряду с традиционными минералогическими методами, впервые систематически использовался обширный комплекс современных кристаллохимических методов исследования вещества, прежде всего рентгеноструктурный анализ моно- и поликристаллов в широком интервале температур и рентгеноспектральный анализ. Ниже приводится краткое обобщение результатов кристаллохимических исследований минералов вулканических эксгальций БТТИ.

Рентгенография поликристаллов. Хорошо известно, что минералы вулканических эксгальций представлены обычно тонкодисперсными многофазными образованиями или встречаются в единичных зернах. Незаменимым методом фазовой диагностики эксгальционных минералов оказалась рентгенография поликристаллов или ее аналог — рентгеновская съемка монокристалла по методу Гандольфи. В частности, этим методом были получены и включены в международную рентгенографическую картотеку стандартные дебаграммы новых минералов.

Рентгеноструктурный анализ монокристаллов, кристаллическая структура. Методом изучения симметрии, параметров кристаллической решетки и кристаллической структуры вещества по единичным зернам размером порядка 0.1 мм и менее является рентгеноструктурный анализ монокристаллов. Кристаллическая структура несет фундаментальную информацию о веществе. По этой причине были расшифрованы или уточнены кристаллические структуры всех новых минералов БТТИ.

Определение структур позволило, в частности, установить истинную химическую формулу ряда минералов. Так, определение структур селеносодержащих минералов способствовало выявлению тройной координации атомов селена Se^{4+}O_3 и на этом основании отнесению этих минералов к селенитам с дополнительным анионом O, а не к селенатам (Se^{6+}O_4), как это было предположено, исходя из результатов микрозондового анализа.

Показателен и анализ формулы урусовита. Первоначально по результатам химического анализа этот минерал был определен как оксоарсенат алюминия и меди $\text{AlCuO}(\text{AsO}_4)$, в котором Al рас-

полагается в привычных для него октаэдрах AlO_6 . Однако определение структуры урусовита [Кривовичев, Филатов, 2001] показало, что не только мышьяк, но и алюминий располагаются в тетраэдрах TO_4 , объединенных через общие вершины в оригинальные слои T_2O_5 , подобные кремнекислородной сетке Si_2O_5 . На этом основании урусовит был отнесен к слоистым алюминатам-арсенатам меди $\text{Cu}(\text{AlAsO}_5)$.

Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с анионоцентрированными комплексами. Расшифровка структур показала также, что основой многих новых эксгальционных минералов БТТИ являются комплексы из оксоцентрированных тетраэдров OCu_4 . В табл. 1 такие атомы кислорода, не входящие в кислотные остатки (SO_4 , SeO_3 , AsO_4 и т.п.), выделены жирным шрифтом. Подобных минералов-оксосолей среди новых минералов фумарол БТТИ оказалось 16 из 32, то есть половина.

Присутствие в минералах эксгальций оксоцентрированных тетраэдров OCu_4 позволило предложить механизм переноса металлов вулканическими газами в виде подобных тетраэдров и их комплексов [Семенова и др., 1989; Филатов и др., 1992; Филатов и др., 1994]. Впоследствии оказалось, что минералы сходного строения были ранее обнаружены также в эксгальционных продуктах вулканов Изалько (Сальвадор) [Birnie et al., 1979; Hughes, Nadidiacos, 1985] и Везувий (Италия) [Scordari, Stasi, 1990], хотя первооткрыватели этих минералов не выделяли в них оксоцентрированных комплексов.

Исследование кристаллохимии минералов фумарол БТТИ привело к развитию и обобщению кристаллохимии минералов и неорганических соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров XA_4 . Здесь X – наиболее электроотрицательные анионы O^{2-} , N^{3-} , F^- , а A – катионы, способные образовывать связи $A-X$ с валентным усилием $V_x/4$, где V_x – формальная валентность аниона X . Катионами A в оксосолях оказываются прежде всего Cu , Pb , Bi , TR и др. [Кривовичев, Филатов, 2001].

К 2001 году выявлено и проанализировано около 500 минералов и неорганических соединений с анионоцентрированными тетраэдрами (из них 16 – новые минералы БТТИ), в структуре этих соединений обнаружено 115 типов комплексов анионоцентрированных тетраэдров: 12 островных, 25 цепочечных, 35 слоистых и 43 каркасных. В этих комплексах XA_4 тетраэдры объединяются по вершинам, ребрам и крайне редко по граням, причем в одной вершине может сходиться до 8 тетраэдров, в одном ребре – до трех тетраэдров.

Показано, что описание кристаллических структур минералов и химических соединений в терминах анионоцентрированных тетраэдров является наиболее эффективным в том случае, когда химические связи $A-X$ являются одними из наиболее прочных в данной структуре. Так, в кристаллической структуре нового минерала БТТИ георгобокита тетраэдры OCu_4 , объединяясь друг с другом поочередно через вершины и ребра, образуют прочные цепочки в направлении оси c , которой соответствует наименьшее тепловое расширение этого минерала и наибольшая ось его оптической индикатрисы; оси c параллельны также обе системы спайности георгобокита по (100) и (010) [Кривовичев и др., 1998].

Моделирование процессов переноса металлов вулканическими газами и эксгальционного минералообразования методом химических газотранспортных реакций. Моделирование было начато синтезом ряда хлоридов и оксохлоридов [Филатов и др., 1992]. Были синтезированы нантоцит CuCl , толбачит, меланоталлит, пономаревит. Температура синтеза оценивалась по температуре газа во время отбора минералов на вулкане. Допущение о том, что металлы A могут переноситься в виде готовых оксоцентрированных комплексов OA_4 , способствовало проведению целенаправленного синтеза. Так, синтез пономаревита – минерала, содержащего комплексы $\text{Cu}_4\text{OCl}_{10}$ и окрашенного в рубиново-красный цвет, удался лишь после того, как обнаружилось, что при температуре 340°C шихта покраснела, вследствие чего можно было предположить, что в ней сформировались пономаревитовые комплексы. Действительно, именно при этой температуре и прошел удачный синтез пономаревита.

Выявленная необходимость синтеза исходной шихты при выращивании соединений сложного химического состава подтвердила предположение об участии в переносе вещества готовых комплексов, а не только соединений типа простых газообразных хлоридов. Осуществленные опыты показали также, что вещество минералов вулканических эксгальций может успешно переноситься и отлагаться в отсутствие паров воды, по видимому, в форме хлоридов и оксоцентрических комплексов.

В настоящее время методом газотранспортных реакций целенаправленно синтезируются также селениты, оксоселениты и оксованадаты. Успешным оказался синтез стойберита $\text{Cu}_5\text{O}_2(\text{VO}_4)_2$ (не опубликовано). Шесть из синтезированных соединений в работе [Шувалов, 2000] встречены в отложениях фумарол БТТИ: хлороменит, георгобокит, ильинскит, тенорит, нантоцит и галит NaCl ; еще несколько фаз были ранее получены в системе $\text{CuO-SeO}_2\text{-H}_2\text{O}$: $\text{Cu}(\text{SeO}_3)\text{-III}$, $\text{Cu}(\text{SeO}_3)\text{-IV}$, $\text{Cu}_4\text{O}(\text{SeO}_3)_3\text{-I}$ и $\text{Cu}_2\text{O}(\text{SeO}_3)\text{-I}$.

Таблица 3. Результаты терморентгеновского исследования пределов температурной устойчивости и продуктов термического разложения в среде воздуха некоторых новых минералов вулканических эксгальций БТТИ

Минерал	Температура превращения, °С	Фазовые превращения и их продукты
Толбачит CuCl_2	300–350	Устойчив до 300–350°С. При комнатной температуре гидратируется с образованием эриохальцита $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Пономаревит $\text{K}_4\text{Cu}_4\text{OCl}_{10}$	250 375	Начало разложения Тенорит CuO ; сильвин KCl
Меланоталлит Cu_2OCl_2	400	Тенорит CuO
Ленинградит $\text{PbCu}_3(\text{VO}_4)_2\text{Cl}_2$	425	Ванадинит $\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$
Софиит $\text{Zn}_2(\text{SeO}_3)\text{Cl}_2$	325 425	Начало разложения Цинкит ZnO
Пийпит $\text{K}_4\text{Cu}_4\text{O}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot \text{MeCl}$	500 590–625	Фаза X Тенорит CuO
Ключевскит $\text{K}_3\text{Cu}_3\text{Fe}^{3+}\text{O}_2(\text{SO}_4)_4$	625 20 (охл)	Тенорит CuO Троилит FeS
Камчаткит $\text{KCu}_3\text{OCl}(\text{SO}_4)_2$	450 650 20 (охл)	Фаза X Тенорит CuO ; Na_2SO_4 Тенорит CuO ; Na_2SO_4

Накопленный опыт показывает, что размер и качество монокристаллов, получаемых методом химических газотранспортных реакций, оказываются удачными для целей рентгеноструктурного анализа. Продукты синтеза используются нами также для получения стандартных дебаграмм от однофазных материалов, для терморентгеновских экспериментов и иных исследований, на которые не удается отобрать природные монофракции.

Моделирование термических преобразований эксгальционных минералов методом терморентгенографии. Внедрение терморентгенографии в вулканологию положило начало моделированию процессов термического преобразования минералов вулканических эксгальций этим методом [Филатов, 1990]. Для десятков минералов эксгальций, в том числе для некоторых новых минералов, измерена такая термодинамическая функция, как объемное тепловое расширение; изучена анизотропия термических деформаций, определены пределы термической устойчивости минералов, выявлены температура и последовательность их твердофазовых превращений, установлено, что конечным продуктом термического разложения многих минералов меди является тенорит (табл. 3).

Моделирование термических преобразований способствует решению вопросов генетического порядка. Предполагается, что значительная часть отложений тенорита образовалась путем преобразования соединений меди, принимая во внимание характерный для постэруптивного периода деятельности вулканов переменный температурный режим [Набоко, 1959; Филатов 1990]. Тенорит отличается от многих минералов меди устойчи-

востью к воздействию атмосферных агентов, что способствует его сохранности в течение длительного периода времени. Выявление особенностей современной постэруптивной активности и сохранность ее продуктов — метасоматитов и рудной минерализации, представляют определенный интерес для оценки рудоносной перспективности древних вулканогенных формаций и возможностей использования метода актуализма при их изучении [Набоко, Главатских, 1992; Вергасова и др., 2009].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка, 1975–1976 гг. / Под ред. Федотова С.А. М.: Наука, 1984. 637 с.
- 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 // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270. С. 415–417.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К. Минералы вулканических эксгальций — особая генетическая группа (по материалам Толбачинского извержения 1975–1976 гг.) // ЗВМО. 1993. Т. 122(4). С. 68–76.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К. и др. Пийпит $\text{K}_2\text{Cu}_2\text{O}(\text{SO}_4)_2$ — новый минерал из вулканических возгонов // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. С. 714–717.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К. и др. Камчаткит $\text{KCu}_3\text{OCl}(\text{SO}_4)_2$ — новый минерал из вулканических возгонов // ЗВМО. 1988а. Т. 117(4). С. 459–461.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К. и др. Федотовит $\text{K}_2\text{Cu}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ — новый минерал из вулканических возгонов // Докл. АН СССР. 1988б. Т. 299. С. 961–964.

- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К. и др.* Пономаревит $K_4Cu_4OCl_{10}$ – новый минерал из вулканических возгонов // Докл. АН СССР. 1988в. Т. 300. С. 1197–1200.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Горская М.Г. и др.* Ключевскит $K_3Cu_3Fe^{3+}O_2(SO_4)_4$ – новый минерал из вулканических возгонов // ЗВМО. 1989а. Т. 118(1). С. 70–73.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Семенова Т.Ф. и др.* Софиит $Zn_2(SeO_3)Cl_2$ – новый минерал вулканических возгонов // ЗВМО. 1989б. Т. 118(1). С. 65–69.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Семенова Т.Ф. и др.* Ленинградит $PbCu_3(VO_4)_2Cl_2$ – новый минерал из вулканических возгонов // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310. С. 1434–1437.
- Вергасова Л.П., Старова Г.Л., Филатов С.К. и др.* Минералогия и кристаллохимия влодавецита $AlCa_2(SO_4)_2F_2Cl \cdot 4H_2O$ – нового минерала вулканических эксгальций // Вулканология и сейсмология. 1995а. № 6. С. 31–40.
- Вергасова Л.П., Степанова Е.Л., Серафимова Е.К. и др.* Лесюкит $Al_2(OH)_5Cl \cdot 2H_2O$ – новый минерал вулканических эксгальций // ЗВМО. 1997а. Т. 126(2). С. 104–110.
- Вергасова Л.П., Семенова Т.Ф., Филатов С.К. и др.* Ильинскит $NaCu_5O_2(SeO_3)_2Cl_3$ – новый минерал вулканических эксгальций // ДАН. 1997б. Т. 353. С. 641–644.
- Вергасова Л.П., Старова Г.Л., Филатов С.К. и др.* Аврьевит $Cu_5(VO_4)_2O_2 \cdot nMX$ – новый минерал вулканических эксгальций // ДАН. 1998а. Т. 359. С. 804–807.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Серафимова Е.К. и др.* Хлорартинит $Mg_2(CO_3)ClOH \cdot 3H_2O$ – новый минерал вулканических эксгальций // ЗВМО. 1998б. Т. 127(2). С. 55–59.
- Вергасова Л.П., Семенова Т.Ф., Филатов С.К. и др.* Георгбокиит $Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – новый минерал вулканических эксгальций // ДАН. 1999. Т. 364. С. 527–531.
- Вергасова Л.П., Семенова Т.Ф., Епифанова В.Б. и др.* Меняйловит $Ca_4AlSi(SO_4)F_{13} \cdot 12H_2O$ – новый минерал вулканических эксгальций // Вулканология и сейсмология. 2004. № 2. С. 3–8.
- Вергасова Л.П., Кривовичев С.В., Бритвин С.Н. и др.* Аллохалькоселит $Cu^+Cu_5^{2+}PbO_2(SeO_3)_2Cl_5$ – новый минерал вулканических эксгальций Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ, Камчатка 1975–1976 гг.) // ЗВМО. 2005. Т. 134(3). С. 70–74
- Вергасова Л.П., Кривовичев С.В., Филатов С.К. и др.* Парагеоргбокиит, β - $Cu_5O_2(SeO_3)_2Cl_2$ – новый минерал вулканических эксгальций (Камчатский п-ов, Россия) // ЗВМО. 2006. № 4. С. 24–27.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Дунин-Барковская В.В.* Постэруптивная деятельность Первого конуса БТТИ и современное вулканогенное формирование бокситов // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 55–77.
- Вергасова Л.П., Филатов С.К., Философова Т.М.* Опыт использования метода терморентгенографии для реконструкции минерало-рудобразования на палеовулканическом объекте (г. 1004) // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии “Вулканизм и геодинамика” 22–27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский. 2009. Т. 2. С. 718–720.
- Кривовичев В.Г.* Минералогический словарь. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 554 с.
- Кривовичев С.В., Семенова Т.Ф., Филатов С.К.* Высокотемпературная кристаллохимия гергбокиита // Кристаллография. 1998. Т. 43. С. 1061–1064.
- Кривовичев С.В., Филатов С.К.* Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с комплексами анионоцентрированных тетраэдров. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 199 с.
- Маракушев А.А.* Парагенезисы химических элементов в свете теории экстремальных состояний // ЗВМО. 1988. № 5. С. 535–544.
- Набоко С.И.* Вулканические эксгальции и продукты их реакций // Тр. Лаб. вулканол. 1959. Вып. 16. 303 с.
- Набоко С.И., Главатских С.Ф.* Постэруптивный метасоматоз и рудообразование. М.: Наука, 1983. 164 с.
- Набоко С.И., Главатских С.Ф.* Реликты постэруптивной активности на старых конусах Толбачинского дола, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1992. № 5–6. С. 66–86.
- Никель Е.Х.* Твердые растворы в номенклатуре минералов // ЗВМО. 1992. № 4. С. 89–92.
- Попова В.И., Попов В.А., Рудаевский Н.С. и др.* Набокоит $Cu_7TeO_4(SO_4)_5 \cdot KCl$ и атласовит $Cu_6Fe^{3+}Bi^{3+}O_4(SO_4)_5 \cdot KCl$ – новые минералы вулканических эксгальций // ЗВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 3. С. 358–367.
- Семенова Т.Ф., Рождественская И.В., Филатов С.К., Вергасова Л.П.* Кристаллическая структура нового минерала пономаревита $K_4Cu_4OCl_{10}$ // Докл. АН СССР. 1989. Т. 304. № 2. С. 427–430.
- Семенова Т.Ф., Вергасова Л.П., Филатов С.К., Ананьев В.В.* Аларсит $AlAsO_4$ – новый минерал вулканических эксгальций // ДАН. 1994. Т. 338. № 4. С. 501–505.
- Серафимова Е.К.* Минералогия возгонов вулканов Камчатки. М.: Наука, 1979. 167 с.
- Старова Г.Л., Вергасова Л.П., Филатов С.К. и др.* Ламмерит- β $Cu_3(AsO_4)_2$ – новый минерал фумарол (Большого трещинного Толбачинского извержения) // ЗВМО. 2011. № 5. С. 46–52.
- Филатов С.К., Вергасова Л.П.* О дискридации каратиита и приоритета пийпита // ЗВМО. 1989. Ч. 118. Вып. 3. С. 88–90.
- Филатов С.К., Семенова Т.Ф., Вергасова Л.П.* Типы полимеризации тетраэдров $[OCu_4]^{6+}$ в соединениях с дополнительными атомами кислорода // Докл. АН СССР. 1992. Т. 322. № 3. С. 536–539.
- Филатов С.К., Семенова Т.А., Вергасова Л.П.* Рождение новой кристаллохимии на вулкане // Геология. Программа “Университеты России”. М.: Изд-во МГУ, 1994. Ч. 2. С. 16–20.
- Филатов С.К.* Высокотемпературная кристаллохимия. Л.: Недра, 1990. 288 с.
- Филатов С.К., Разумеев М.В., Варакина Т.В. и др.* Моделирование процесса образования минералов из вулканических газов методом химических транспортных реакций // Постэруптивное минералообразование на активных вулканах Камчатки. Владивосток: Изд-во РИО ДВО РАН, 1992. С. 62–67.
- Шувалов Р.Р., Семенова Т.Ф., Филатов С.К., Панкратова О.Ю.* Моделирование процессов эксгальционного минералообразования методами химических газо-

- транспортных реакций и терморентгенографии // Минералогические музеи в XXI веке. Тез. докл. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2000. С. 134–136.
- Birnie R.V., Hughes J.M.* Stoiberite, $\text{Cu}_5\text{V}_2\text{O}_{10}$, a new copper vanadate from Izalco volcano, El Salvador, Central America // *Amer. Mineral.* 1979. V. 64. P. 941–944.
- Bykova E.Y., Berlepsch P., Kartashov P.M., et al.* Vergasovaite $\text{Cu}_3\text{O}[(\text{Mo},\text{S})\text{O}_4][\text{SO}_4]$, a new copper-oxy-molibdate-sulfate from Kamchatka // *Schweiz. Mineral., Petrog. Mitt.* 1998. Bd. 78. S. 479–488.
- Hughes J.M., Hadidiacos C.G.* Fingerite, $\text{Cu}_{11}\text{O}_2(\text{VO}_4)_6$, a new vanadium sublimate from Izalco volcano, El Salvador: descriptive mineralogy // *Amer. Mineral.* 1985. V. 70. P. 193–196.
- Gorskaya M.G., Vergasova L.P., Filatov S.K., et al.* Alumoklyuchevskite, $\text{K}_3\text{Cu}_3\text{AlO}_2(\text{SO}_4)_4$, a new oxysulphate of K, Cu and Al from volcanic exhalations, Kamchatka, Russia // *Proc. RMS.* 1995. № 1. P. 95–100.
- Filatov S.K., Vergasova L.P., Gorskaya M.G., et al.* Bradaczekite, $\text{NaCu}_4(\text{AsO}_4)_3$, a new mineral species from the Tolbachik volcano, Kamchatka peninsula, Russia // *The Can. Mineral.* 2001. V. 39. P. 1115–1119.
- Krivovichev S.V., Molchanov A.V., Filatov S.K.* Crystal structure of urusovite $\text{Cu}[\text{AlAsO}_5]$: a new type of a tetrahedral aluminoarsenate polianion // *Crystallography Reports.* 2000. V. 45. №. 5. P. 723–727 (Translated from *Kristallografiya.* 2000. V. 45. №. 5. P. 793–797).
- Krivovichev S.V., Vergasova L.P., Starova G.L., et al.* Burnsite, $\text{KCdCu}_7\text{O}_2(\text{SeO}_3)_2\text{Cl}_9$, a new mineral species from the Tolbachik volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *The Can. Mineral.* 2001. V. 40. P. 1171–1175.
- Krivovichev S.V., Vergasova L.P., Britvin S.N., et al.* Pauffle-rite, $\beta\text{-VO}(\text{SO}_4)$, a new mineral species from the Tolbachik volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *The Can. Mineral.* 2007. V. 45. P. 921–927.
- Scordari F., Stasi F.* The crystal structure of euchlorin, $\text{NaKC}_3\text{O}(\text{SO}_4)_3$ // *Neues Jb. Mineral Abh.* 1990. Bd. 161. S. 241–253.
- Starova G.L., Krivovichev S.V., Fundamensky V.S., Filatov S.K.* The crystal structure of averievite, $\text{Cu}_5\text{O}_2(\text{VO}_4)_2 \cdot n\text{MX}$: comparison with related compounds // *Min. Mag.* 1997. V. 61. P. 441–446.
- Vergasova L.P., Starova G.L., Krivovichev S.V., et al.* Coparsite, $\text{Cu}_4\text{O}_2[(\text{As},\text{V})\text{O}_4]\text{Cl}$, a new mineral species from the Tolbachik volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *The Can. Mineral.* 1999a. V. 37. P. 911–914.
- Vergasova L.P., Krivovichev S.V., Semenova T.F., et al.* Cloromenite, $\text{Cu}_9\text{O}_2(\text{SeO}_3)_4\text{Cl}_6$, a new mineral from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia // *Eur. J. Mineral.* 1999b. V. 11. P. 119–123.
- Vergasova L.P., Filatov S.K., Gorskaya M.G., et al.* Urusovite, $\text{Cu}[\text{AlAsO}_5]$, a new mineral from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia // *Eur. J. Mineral.* 2000. V. 12. P. 1041–1044.
- Vergasova L.P., Krivovichev S.V., Britvin S.N., et al.* Filatovite, $\text{K}[(\text{Al},\text{Zn})_2(\text{As},\text{Si})_2\text{O}_8]$, a new mineral species from the Tolbachik volcano, Kamchatka peninsula, Russia // *Eur. J. Mineral.* 2004. V. 16. P. 533–536.
- Zambonini F.* *Mineralogia Vesuviana.* 11 ed. Napoli. 1935. 463 p.

New Mineral Species in Products of Fumarole Activity of the Great Tolbachik Fissure Eruption

L. P. Vergasova^a and S. K. Filatov^b

^a *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
bul'v. Piip, 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: vlp@kscnet.ru*

^b *Chair of Crystallography, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7/9, St. Petersburg, 199034 Russia
e-mail: filatov.stanislav@gmail.com*

Abstract—A summary is given and some physical properties and chemistry are described for new natural compounds of seven different classes from the deposits of fumaroles of the Great Tolbachik Fissure Eruption (1975–1976, Kamchatka), which were determined on the basis of mineralogical and crystal chemistry studies.