



Электронная версия доступна на сайте  
[www.fmm.ru/Новые данные о минералах](http://www.fmm.ru/Новые_данные_о_минералах)  
 Минералогический музей  
 имени А.Е. Ферсмана РАН

Н Д М

Новые данные о минералах, том 53, вып. 4 (2019), 114–121

## Пауфлерит $\beta$ -VO(SO<sub>4</sub>) в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик (Рават) на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан

Мираков М.А.<sup>1</sup>, Паутов Л.А.<sup>2,3</sup>, Карпенко В.Ю.<sup>2</sup>,  
 Файзиев А.Р.<sup>1</sup>, Махмадшариф С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН РТ, Душанбе

<sup>2</sup>Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [pla58@mail.ru](mailto:pla58@mail.ru)

<sup>3</sup>Институт Минералогии УрО РАН, Миасс

Приведено описание находки пауфлерита  $\beta$ -VO(SO<sub>4</sub>) в возгонах высокотемпературных выходов газов природного угольного пожара в урочище Кухи-Малик близ кишлака Рават, Фан-Ягнобское угольное м-ние, Таджикистан, в брекчированных алевролитах. Кристаллы пауфлерита удлинненно-призматические, имеют размеры 40–100 мкм; простые формы:  $b\{010\}$ ,  $t\{101\}$  (наиболее развита),  $e\{110\}$ ,  $p\{111\}$ ,  $\delta\{212\}$ . Наблюдаются двойники по (010) (?). Минерал прозрачный, зеленого цвета, хрупкий. Блеск стеклянный. Пауфлерит оптически двуосный,  $2V$  близок к 90°. Дисперсия оптических осей очень слабая,  $v > r$ . Плоскость оптических осей перпендикулярна удлинению кристаллов;  $n_p = 1.733(2)$ ,  $n_m = 1.778(3)$ ,  $n_g \text{ расч.} = 1.823(4)$ . Плеохроизм: по Ng – зеленая окраска, по Nm и Nr – светло-зеленая. Схема абсорбции Ng > Nm > Nr. Состав (ср. по 3 ан., электронно-зондовые данные, мас.%): VO<sub>2</sub> 49.87, SO<sub>3</sub> 50.01, сумма 99.88. Эмпирическая формула V<sub>0.97</sub>O(S<sub>1.02</sub>O<sub>4</sub>). Параметры ромбической элементарной ячейки (Å):  $a = 7.392(3)$ ,  $b = 6.272(2)$ ,  $c = 7.064(3)$ . Впервые приведены порошковая рентгенограмма и чертежи кристаллов пауфлерита. По присутствию минеральных фаз V, Cd, Mo, Tl, Bi, Sn, In, Sb, Se, Te, As возгоны угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении близки к возгонам вулканических фумарол Камчатки, Курилы, Италии, что связано с общностью механизмов извлечения газами этих элементов из вмещающих пород, их переноса и отложения в зонах разгрузки.

**Ключевые слова:** пауфлерит, ванадий, ванадил, сульфат, минералы возгонов, фумаролы, угольный пожар, Таджикистан, Фан-Ягнобское месторождение, Рават, Кухи-Малик.

### Введение

Пауфлерит  $\beta$ -VO(SO<sub>4</sub>) был описан как новый минерал в возгонах высокотемпературных (500–600 °С) фумарол на 1-м шлаковом конусе Большого трещинного Толбачинского извержения, Толбачинский дол, Камчатка, Россия, где он встречен в виде светло-зеленых призматических кристаллов длиной до 0.1 мм в ассоциации с щербинаитом, неназванным сульфатом Tl–Bi (позже доизученным и описанным под названием мархининит. – *Прим. авт.*) и сульфатами Mg, Al, Fe и Na (Krivovichev et al.,

2007). Пауфлерит отмечается в составе пород карбонатитового редкоземельного месторождения Montviel в Канаде (Nadeau et al., 2015). Однако диагностика минерала основана только на расшифровке рентгеновской дифрактограммы порошка породы, в которой кроме пауфлерита указывается еще 13 фаз; такая диагностика не кажется убедительной. Также пауфлерит упоминается без приведения данных, подтверждающих диагностику, среди других ванадиевых минералов (колимаит, щербинаит, V-содержащие сульфаты Na–K, само-

родный ванадий) в высокотемпературных сублиматах вулкана Colima, Мексика (Ostrooumov, Taran, 2015).

Нами пауфлерит диагностирован в образцах возгонов высокотемпературных выходов газов подземного природного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан), собранных авторами в ходе полевых работ в 2017 г.

### Место находки

Фан-Ягнобское месторождение каменного угля, являющееся одним из крупнейших в Центральной Азии месторождений коксующихся углей, находится в пределах Зеравшано-Гиссарской горной системы в долине реки Ягноб (N 39°08–39°14' E 68°26–68°47'), а в административном отношении расположено в Айнинском районе Согдийской области Таджикистана, приблизительно в 70 км к северу от Душанбе. Это месторождение каменного угля приурочено к Фан-Ягнобской синклинали, вытянутой на 24 км в северо-западном направлении, в сложении которой принимают участие породы триасового возраста, угленосные толщи юрского возраста и перекрывающие их осадочные отложения мелового, палеогенового и неогенового возраста (Ермаков, 1935; Охунов и др., 2017). Относительно средних содержаний микроэлементов в углях Центральной Азии (регионального геохимического фона, РГФ) угленосные породы Фан-Ягнобского месторождения характеризуются коэффициентами концентрации V, Sn, Ag, W, Cu более 5, а Mo, Pb, Zn, Cr, Be, Cd более 3 (Охунов и др., 2017). На площади месторождения известны многочисленные не связанные с деятельностью человека подземные пожары, как уже потухшие, так и действующие поныне. Время возникновения пожаров точно не известно, но большинство исследователей придерживается мнения, что их возраст – тысяча и более лет (Ермаков, 1935; Вадио, 1958; Новиков, 1989; Смирнов, 2011 и др.). Наиболее известен подземный пожар на правом борту р. Ягноб вблизи бывшего кишлака Рават в верховьях урочища Кухи-Малик, хорошо видимый с автодороги Душанбе – Худжент (рис. 1). Добраться до него (N 39°12'20" E 68°34'04") от автотрассы можно, преодолев около 1000 м довольно крутого подъема. В геологическом отношении этот участок находится на северном крыле Фан-Ягнобской синклинали и сложен отложениями юрского возраста, представленными переслаиванием гравелитов, песчаников, алевролитов, агриллитов и угленосных пород (Новиков, Супрычев, 1986). В верховьях урочища располагается множество выходов газовых струй с температурой от 40 до 590 °C (Новиков, Супрычев, 1986). Они локализуются в рыхлых отложениях и в полостях и зонах разрушения коренных пород, по крайней мере часть из которых могла возникнуть в результате взрывов газов, образовавшихся при горении угля, или при просадке обожженных пород (Сокол, 2003). Такие выходы газовых

струй с обильными сублиматами, часто искусственно расширенные, служили местом добычи нашатыря, квасцов и «купоросов» в течение нескольких веков (Ермаков, 1935; Вадио, 1958; Новиков и др., 1979; Смирнов, 2011). Минералогии возгонов этого пожара посвящены многочисленные статьи (Ермаков, 1935; Новиков и др., 1979; Новиков, Супрычев, 1986; Белаковский и др., 1988; Белаковский, Москалев, 1988; Новиков и др., 1989; Новиков, 1989, 1993; Belakovski, 1990; Nasdala, Pekov, 1993; Мираков и др., 2017; Pautov et al., 2018), а продукты пирогенного метаморфизма пород, включая паралавы, описаны в работах (Сокол, 2003; Сокол и др., 2005; Шарьгин и др., 2009).

Пауфлерит диагностирован нами в образцах возгонов, отобранных в зоне разгрузки горячих газов в трещиноватых и брекчированных алевролитах в крупной полости, известной в литературе (Охунов и др., 2017) под названием «Грот» (рис. 1).



Рис. 1. Природный подземный пожар в урочище Кухи-Малик: а – вид на участок пожара (помечен красной стрелкой) с автодороги Душанбе – Худжент, б – крупная полость «Грот», в которой обнаружен пауфлерит, в – сбор образцов из зоны трещиноватости и разгрузки горячих газов в «Гроته».

### Аналитические методы

Морфологию выделений пауфлерита и ассоциирующихся с ним фаз авторы изучали под бинокулярным микроскопом МБС-2 и с помощью электронного сканирующего микроскопа JSM-35 FC фирмы

JEOL. Химический состав пауфлерита определялся с использованием Si (Li)-энергодисперсионного спектрометра и системы анализа ISIS фирмы Oxford при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе поглощенных электронов на металлическом никеле 1 нА. Образцы сравнения и аналитические линии: VKa – металлический V, SKa – синтетический ZnS. Анализ проводился с естественной поверхности кристаллов пауфлерита, смонтированных на электропроводной углеродной ленте и напыленных углеродом с помощью высоковакуумного термического испарения графита. Грани кристаллов с помощью гониометрического стола микроскопа выводились в перпендикулярное положение к пучку электронов, что контролировалось по изображению в режимах SEI и BSE. Точность такой процедуры невысока (2–5%), и это следует учитывать при интерпретации анализов состава минерала. Выбор такого подхода к анализу химического состава минерала продиктован чрезвычайной хрупкостью пауфлерита и мелкими размерами кристаллов, что затрудняет изготовление полированных препаратов надлежащего качества.

Оптические свойства минерала изучались в иммерсионных препаратах на поляризационном микроскопе МИН-8. Показатели преломления пауфлерита измерялись в монохроматическом свете с использованием интерференционного светофильтра (максимум пропускания фильтра 589 нм). Контроль показателей преломления жидкостей проводился на рефрактометре ИРФ-23 с монохроматором в качестве источника света.

Рентгеновское изучение минералов проводилось методом порошка на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с системой управления DiWin на Cu-излучении с Ni-фильтром. В качестве внутреннего стандарта использовался синтетический CaF<sub>2</sub>.

Для построения чертежей кристаллов использовалась программа KristalShaper.

### Описание пауфлерита

Пауфлерит встречается в виде одиночных хорошо образованных кристаллов размерами от 40 до 100 мкм по удлинению (рис. 2) и их сростков, нарастающих на агрегаты мелких белых кристаллов сульфата висмута и таллия, иногда в сростании с сульфатом таллия и ванадия. Два последних недоизученных минерала в свою очередь нарастают на полиминеральные корки красно-коричневого цвета, в которых преобладает рентгеноаморфный сульфат железа.

Идеализированные кристаллы пауфлерита (ромб. сингония, класс симметрии *mmm*) представлены на рис. 3. Габитус кристаллов удлиненно-призматический и определяется хорошо развитой ромбической призмой  $m\{101\}$ , в огранке головок участвуют пинакоид  $b\{010\}$ , ромбические призма  $e\{110\}$  и дипирамиды  $p\{111\}$ ,  $\delta\{212\}$ , в той или иной мере

развитые на разных кристаллах. Нередки двойники сростания с характерными входящими углами; одним из вероятных является двойникование по (001) (рис. 3). Индицирование граней выполнено путем визуального сопоставления снимков реальных кристаллов, полученных с помощью сканирующего электронного и оптического микроскопов (рис. 2), с идеализированными кристаллами, при построении которых подбирались формы с наиболее простыми индексами, такие, чтобы проекции межреберных углов на плоскость рисунка максимально совпадали с таковыми для реальных кристаллов при идентичной ориентировке. Глазомерная оценка совпадения углов контролировалась замерами их транспортиром. При индицировании форм использованы рентгеновские параметры элементарной ячейки, рассчитанные из порошкограммы минерала (см. ниже). На рисунках, однако, для лучшего визуального восприятия кристаллы сориентированы так, что ось  $b$  расположена вертикально, а  $c$  горизонтально.

Пауфлерит – минерал прозрачный, зеленого цвета, со стекляннм блеском, хрупкий. Черта (цвет порошка) белая. Минерал оптически двусный,  $2V$  близок к  $90^\circ$ . В одних кристаллах неуверенно определяется положительный оптический знак, в других отрицательный. Дисперсия осей очень слабая,  $v > g$ . Плоскость оптических осей перпендикулярна удлинению кристаллов. В иммерсионных препаратах кристаллы минерала ложатся в двух ориентировках. В одной из них минерал имеет низкие интерференционные окраски и дает коноскопическую картину разреза, перпендикулярного оптической оси (рис. 2м), в другой ориентировке кристаллы имеют более высокие интерференционные окраски и характеризуются коноскопической фигурой косоугольного разреза, приближающегося к сечению, параллельному оптической оси. Показатели преломления:  $n_p = 1.733(2)$ ,  $n_m = 1.778(3)$ ,  $n_{g\text{расч}} = 1.823(4)$ . Плеохроизм: окраска по Ng – зеленая, по Nm – светло-зеленая, по Np – светло-зеленая. Схема абсорбции  $Ng > Nm > Np$ .

Химический состав пауфлерита из Кухи-Малика, несмотря на невысокую точность анализа на естественной поверхности кристаллов (табл. 1), близок к составу минерала с места первого описания и к теоретическому составу.

Рентгеновская дифрактограмма пауфлерита из Таджикистана, полученная для весьма ограниченного количества материала, приведена в таблице 2 и близка по набору межплоскостных расстояний к расчетным данным для пауфлерита с Камчатки (порошкограмма голотипа не была получена из-за недостатка материала) (Krivovichev et al., 2007) и синтетического  $\beta$ -VOSO<sub>4</sub>. Однако все три порошкограммы не очень хорошо совпадают между собой по интенсивностям отражений.

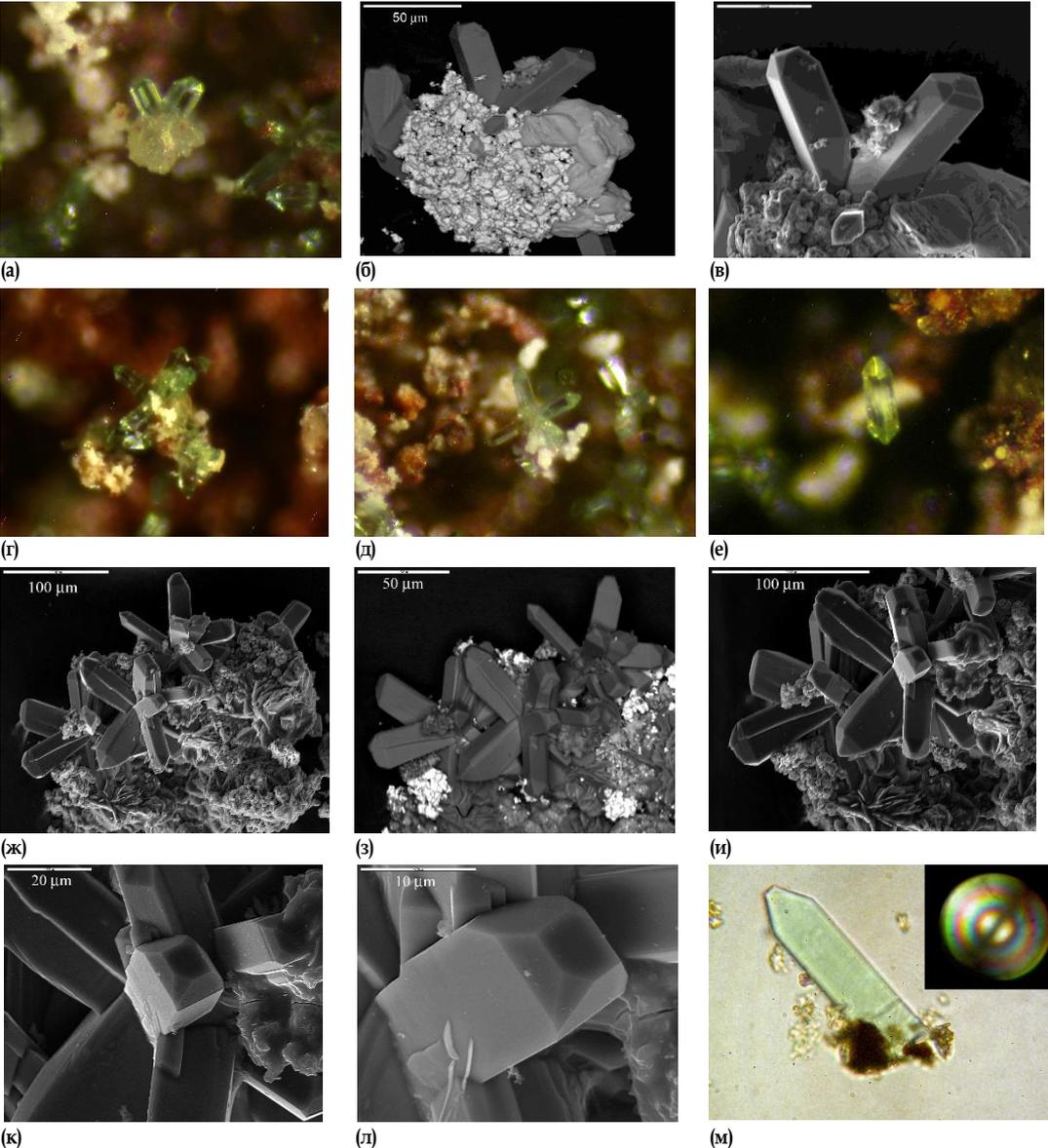
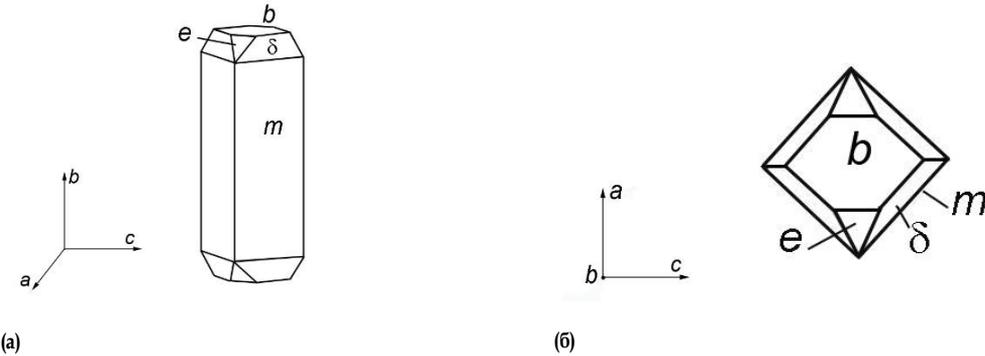


Рис. 2. Пауфлерит: кристаллы и их сростки. Изображения под бинокулярным микроскопом (а, г, д, е), под сканирующим электронным микроскопом в режимах BSE (б, в) и SEI (з, и, ж, к, л), а также под оптическим микроскопом в проходящем свете при одном никеле с врезкой коноскопической фигуры при данной ориентировке кристалла (м).



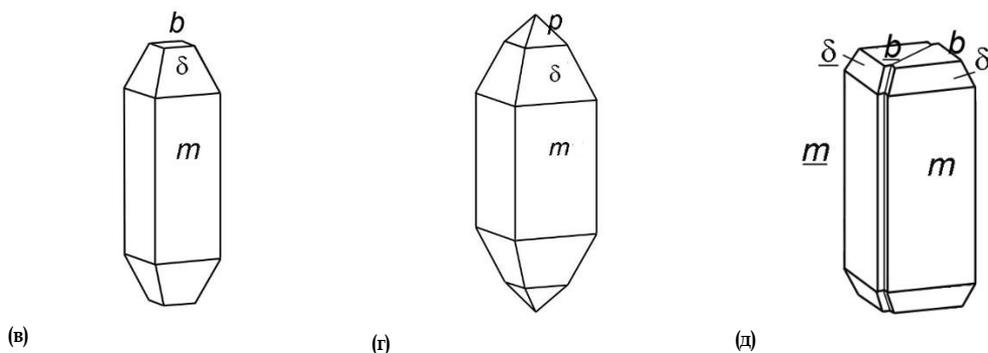


Рис. 3. Чертежи идеализированных кристаллов пауфлерита (а-г) и двойника по (010) – д.

Таблица 1. Химический состав пауфлерита (мас.%)

Компонент	Рават, Таджикистан			Камчатка, Россия (Krivovichev e.a., 2007)	VOSO <sub>4</sub> , теор. состав
	VO <sub>2</sub>	49.64	49.38	50.59	50.40
SO <sub>3</sub>	50.39	50.39	49.51	49.30	49.12
Сумма	100.03	99.77	100.10	99.70	100.00
Количество атомов в формуле при расчете на O = 5					
V	0.97	0.97	0.97	0.99	1.00
S	1.02	1.02	1.02	1.01	1.00

Таблица 2. Рентгеновские порошковые данные для пауфлерита и его синтетического аналога

Рават, Таджикистан, наши данные		Толбачик, Камчатка, расчетн. (Krivovichev et al., 2007)		JCPDS 19-1400, β-VOSO <sub>4</sub> , синт. (Paufler et al., 2014)		hkl
d/n, Å	I/I <sub>0</sub>	d/n, Å	I/I <sub>0</sub>	d/n, Å	I/I <sub>0</sub>	
5.12	100	5.11	27	5.11	80	101
4.70	6	4.70	18	4.69	80	011
3.98	3	3.96	13	3.96	60	111
3.69	5	3.69	6	3.68	20	200
3.54	15	3.54	31	3.54	80	002
3.28	89	3.28	100	3.27	100	201
3.19	27	3.19	22	3.19	80	102
3.14	9	3.14	73	3.14	90	020
3.00	2ш	2.90	13	2.90	40	211
2.81	9ш	2.845	18	2.845	60	112
2.698	3	2.674	10	2.673	40	121
2.556	11	2.566	3	2.552	10	202
2.410	2	2.391	3	2.386	20	220
		2.265	8	2.262	40	221
2.236	1	2.237	17	2.237	60	122
2.205	1	2.209	17	2.209	40	013
2.162	1	2.181	2	2.176	10	311

		2.116	3	2.115	10	113
2.022	6	2.022	2	2.018	10	302
2.091	1ш	2.006	13	2.001	90	031
1.990	7	1.989	10	1.989	60	203
		1.981	3	1.980	10	222
		1.936	2	1.933	10	131
1.891	1	1.896	2	1.894	20	213
1.847	1	1.847	9	1.843	20	400
		1.820	3			230
		1.787	4			401
		1.772	3			410
		1.770	4	1.770	40	004
		1.762	3	1.760	20	231
		1.749	4	1.748	40	132
		1.721	1	1.721	<10	104
1.705	13	1.704	3	1.702	20	303
1.691	1	1.699	3	1.697	20	322
1.642	6	1.644	3	1.644	20	313
1.633	8	1.638	10	1.635	40	402
1.613	1	1.619	6	1.618	40	232
1.585	1	1.585	5	1.582	10	412
1.567	7	1.569	10	1.567	90	040
Параметры элементарной ячейки (Å)						
<i>a</i>	7.392(3)	7.3890(13)		7.371		
<i>b</i>	6.272(2)	6.2740(11)		6.269		
<i>c</i>	7.064(3)	7.0788(11)		7.082		

### Обсуждение результатов

В сублиматах высокотемпературной окислительной псевдофумаролы на природном подземном угольном пожаре в урочище Кухи-Малик диагностирован весьма редкий ванадиевый минерал пауфлерит  $VOSO_4$ . По термодинамическим расчетам  $VOSO_4$  может кристаллизоваться только из обогащенной кислородом газовой среды ( $Cu_2O/CuO$ -буфер) при температуре около  $400\text{ }^\circ\text{C}$  (Taran et al., 2001), что не противоречит наблюдаемым условиям нахождения минерала. До этой находки в возгонах этого пожара обнаружены еще две ванадиевые фазы: недавно открытый фальгарит  $K_4(VO)_3(SO_4)_5$  (Pautov et al., 2018) и незазванный сульфат таллия и ванадила. Примесь ванадия часто фиксируется в сульфатах железа, довольно распространенных среди раватских сублиматов. Источником ванадия при минералообразовании в возгонах являются как каменные угли, так и вмещающие их породы, кон-

центрации V в которых в 5 раз превышают региональный геохимический фон (Охунов и др., 2017).

Характерной чертой минералогии возгонов Раватского подземного пожара является развитие фаз V, Cd, Mo, Tl, Bi, Sn, In, Sb, Se, Te, As. Это сближает их с сублиматами фумарол вулканов Италии, Камчатки, Курильских островов и ряда других областей земного вулканизма (Garavelli et al., 1997; Cheynet et al., 2000; Зеленский, 2003; Chaplygin et al., 2007; Чаплыгин, 2009; Кривовичев, Чарыкова, 2017, и мн. др.). Представляется, что такое сходство связано не только и не столько с геохимической специализацией горных пород, участвующих в формировании горячих газовых потоков и взаимодействующих с ними, сколько в сходстве состава газовых смесей вулканических и угольных газов и общности механизмов извлечения ими из пород перечисленных выше элементов, их переноса и отложения.

Судя по доступной литературе, настоящая ра-

бота является первым описанием пауфлерита в зонах подземных угольных пожаров и вторым описанием этого минерала в мире.

Образец с пауфлеритом из урочища Кухи-Малик записан в систематическую коллекцию Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН под номером 96976.

## Список литературы:

Белаковский Д.И., Москалев И.В. Аммониевая селитра из продуктов угольного пожара в урочище Кухи-Малик (Центральный Таджикистан) // Новые данные о минералах. 1988. № 35. С. 191–194.

Белаковский Д.И., Новиков В.П., Паутов Л.А., Сунпрычев В.В. Первая находка леговицита на территории СССР (Центральный Таджикистан) // Доклады Академии наук Таджикской ССР. 1988. Т. 31. № 9. С. 603–606.

Вадило П.С. Подземный пожар в Центральном Таджикистане // Природа. 1958. № 8. С. 88–91.

Ермаков Н.П. Пасруд-Ягнобское месторождение углей и горячие копи г. Кан-Таг // К геологии каменноугольных месторождений Таджикистана / Под ред. А.Р. Бурачека и П.П. Чуенко. Материалы Таджикско-Памирской экспедиции 1933 г. 1935. Вып. XII. Л.: Химтеорет. С. 47–66.

Зеленский М.Е. Транспорт элементов и условия минералообразования в зонах разгрузки высокотемпературных фумарол на вулкане Мутновский, Камчатка // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Новосибирск. 2003. 20 с.

Кривошечев В.Г., Чарыкова М.В. Минеральные системы, их типы и распространенность в природе. 2. Продукты современной фумарольной деятельности на активных вулканах Толбачик (Россия) и Вулкано (Италия) // Зап. РМО. 2017. Ч. 146 (1). С. 15–28.

Мираков М. А., Файзиев А. Р., Паутов Л. А. Самородный селен в продуктах подземного пожара Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан) // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2017. Т. 60. № 9. С. 456–460.

Новиков В.П., Сунпрычев В.В., Бабаев М.А. Нашатырь из возгонов подземного пожара на Раватском угольном месторождении (Центральный Таджикистан) // Доклады АН Таджикской ССР. 1979. Т. 22. № 11. С. 687–690.

Новиков В.П., Сунпрычев В.В. Условия современного минералообразования в процессе подземного горения углей на Фан-Ягнобском месторождении // Минералогия Таджикистана. 1986. № 7. С. 91–104.

Новиков В.П., Сунпрычев В.В., Салихов Ф.С. Некоторые геохимические особенности гипергенного минералообразования в условиях современного угольного пожара на примере Фан-Ягнобского месторождения // Минералогия Таджикистана. 1989.

## Благодарности

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ш.Ё. Ёрова и Р.У. Сабирову, за помощь в лабораторном изучении материала М.А. Шодибекова и за обсуждение работы и ценные замечания В.И. Пекова.

№ 8. С. 107–118.

Новиков В.П. Пожар, которому тысяча лет // Наука и жизнь. 1989. № 9. С. 30–32.

Новиков В.П. Органические производные угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении // Известия АН Республики Таджикистан, Отделение наук о Земле. 1993. № 4 (7). С. 51–58.

Охунов Р.В., Ёров З.Ё., Негматов И.И. Атлас-справочник угольного месторождения Фан-Ягноб. Душанбе, 2017. 170 с.

Смирнов Ю.М. Священный огонь Митры и Фан-Ягнобский угольный пожар // Идناкар: методы историко-культурной реконструкции. 2011. № 1 (11). С. 10–44.

Сокол Э.В., Максимова Н.В., Низматулина Е.Н., Шарыгин В.В., Калугин В.М. Пирогенный метаморфизм. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 307 с.

Сокол Э.В. Минералообразование в процессах пирогенного метаморфизма: Диссертация на соискание ученой степени доктора геол.-минерал. наук: 25.00.05: Новосибирск. 2003. 461 с.

Чаплыгин И.В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Москва: ИГЕМ, 2009. 24 с.

Шарыгин В.В., Сокол Э.В., Белаковский Д.И. Фаялит-секанинаитовые параалы Раватского угольного пожара (Центральный Таджикистан) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 910–932.

Belakovski D.I. Die Mineralien der brennenden Kohleflöze von Ravat in Tadshikistan // Lapis. 1990. B. 15 (12). S. 21–26 (на нем. яз.).

Chaplygin I.V., Mozgova N.N., Mokhov A.V., Koporulina E.V., Bernhardt H.J., Bryzgalov I.A. Minerals of the system ZnS–CdS from fumaroles of the Kudriavy volcano, Iturup Island, Kuriles, Russia // Can. Mineral. 2007. V. 45. P. 709–722.

Cheyne B., Dall'Aglio M., Garavelli A., Grasso M.F., Vurro F. Trace elements from fumaroles at Vulcano Island (Italy): rates of transport and a thermochemical model // Journ. Volcanol. Geotherm. Research. 2000. Vol. 95 (1/4). P. 273–283.

Garavelli A., Laviano R., Vurro F. Sublimate deposition from hydrothermal fluids at the Fossa crater - Vulcano, Italy // Europ. Journ. Mineral. 1997. Vol. 9. P. 423–432.

Krivovichev S.V., Vergasova L.P., Britvin S.N., Filatov S.K., Kahlenberg V., Ananiev V.V. Pauflerite,  $\beta$ -VO (SO<sub>4</sub>), a new mineral species from the Tolbachik Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Can. Mineral.* 2007. Vol. 45. № 4. P. 921–927.

Nasdala L., Pekov I.V. Ravatite, C<sub>14</sub>H<sub>10</sub>, a new organic mineral species from Ravat, Tadjikistan // *Europ. Journ. Mineral.* 1993. Vol. 5. P. 699–705.

Nadeau O., Cayer A., Pelletier M., Stevenson R., Jébrak M. The Paleoproterozoic Montviel carbonate-hosted REE–Nb deposit, Abitibi, Canada: Geology, mineralogy, geochemistry and genesis // *Ore Geology Reviews.* 2015. Vol. 67. P. 314–335.

Ostrooumov M., Taran Y. Discovery of native vanadium, a new mineral from the Colima Volcano, state of Colima (Mexico) // *Macla, Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.* 2015. № 20. P. 109–110.

Paufler P., Filatov S.K., Bubnova R.S., Krzhizhanovskaya M.G. Synthesis and thermal behaviour of pauflerite,  $\beta$ -VOSO<sub>4</sub>, and its  $\alpha$ -modification // *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials.* 2014. V. 229 (11). P. 725–729.

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Nazarchuk E.V., Faiziev A.R., Karpenko V.Y. Falgarite, IMA 2018-069. CNMNC Newsletter No. 45, October 2018, page 1042 // *Europ. Journ. Mineral.* 2018. Vol. 30. P. 1037–1043.

Taran Y.A., Bernard A., Gavilanes J.C., Lunzheva E., Cortes A., Armienta M.A. Chemistry and mineralogy of high-temperature gas discharges from Colima volcano, Mexico. Implications for magmatic gas–atmosphere interaction // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2001. V. 108 (1/4). P. 245–264.