



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

Новые данные о минералах, том 55, вып. 4 (2021), 82–93

НДМ

Находка бонацциита и алакранита в возгонах природного подземного угольного пожара в урочище Кухи-Малик, Таджикистан

Карпенко В.Ю.¹, Паутов Л.А.¹, Мираков М.А.², Сийдра О.Й.³,
 Махмадшариф С.², Шодибеков М.А.², Плечов П.Ю.¹

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, tineralab@mail.ru

²Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН РТ, Душанбе

³Институт наук о Земле, СПбГУ, Санкт-Петербург

В возгонах природного угольного пожара на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан) встречены два редких минерала – бонацциит As_4S_4 и алакранит As_8S_9 . Бонацциит образует оранжевые, оранжево-красные клиновидные кристаллы с ромбическими сечениями, как скелетные, блочные, так и полногранные, размером от 0.1 до 1.5 мм. Бонацциит нарастает на кристаллы реальгара либо на матрицу, сложенную рентгеноаморфным As_2S_3 . В ассоциации с ними находятся нашатырь и ермаковит $(NH_4)(As_2O_3)_2Br$, кристаллы которого также нарастают на бонацциит.

В проходящем свете в прозрачных шлифах бонацциит желтовато-бурый, оптически двуосный (+), дисперсия сильная, $r < v$. $2V = 60(5)^\circ$. Показатели преломления существенно выше 2.05. В отраженном свете серый с интенсивными внутренними рефлексиями от желто-зеленых до красных цветов. Параметры элементарной ячейки бонацциита по результатам порошковой рентгеновской съемки: $a = 9.972(5)$, $b = 9.435(3)$, $c = 8.870(6)$ Å, $\beta = 102.25(4)^\circ$, $V = 815(1)$ Å³. Отношение параметров $b:c = 1.063$ – по рентгеновским данным и от 0.817 до 0.87 по результатам гониометрических измерений (если присвоить наиболее развитой грани символ {111}). Индексирование этой грани по рентгеновским параметрам ведет к иррациональным символам. Предполагается, что кристаллы бонацциита являются параморфозами по близкой фазе с иными параметрами элементарной ячейки. Плотность измеренная (г/см³) 3.57(1), расчетная 3.52. Химический состав бонацциита (мас.%, среднее по 12 электронно-зондовым анализам): As 69.01, S 29.86, Se 0.47, сумма 99.37, что соответствует формуле $As_{4.01}S_{3.96}Se_{0.02}$. По реальгару иногда развивается порошковатый As-сульфид желтого цвета, он же нарастает в виде ромбовидных хрупких кристаллов, по облику похожих на таковые бонацциита. По порошковой диаграмме близок к алакраниту с параметрами моноклинной элементарной ячейки $a = 9.90(5)$, $b = 9.58(5)$, $c = 9.11(5)$ Å, $\beta = 101.6(6)^\circ$, $V = 847(5)$ Å³. Толчок росту бонацциита могло дать локальное повышение температуры (но не более чем до 320 °С – верхнего температурного предела устойчивости реальгара) и/или появление в газовых выделениях Se, сыгравшего затем роль стабилизирующей примеси для бонацциита. Местное изменение термического режима, вероятно, привело к появлению и алакранита.

Ключевые слова: бонацциит, алакранит, реальгар, сульфиды мышьяка, псевдофумаролы, угольный пожар, возгоны, Таджикистан, Фан-Ягнобское месторождение, Кухи-Малик.

Введение

Два редких сульфида мышьяка – бонанциит As_4S_4 (пр.гр. C2/c), являющийся полиморфом реальгара (P2₁/n) и парареальгара (P2/c), и алакранит As_8S_9 (пр.гр. P2/c) – обнаружены нами среди возгонов природного подземного угольного пожара в верховьях урочища Кухи-Малик на Фан-Ягнобском месторождении коксующихся углей в Согдийской области Таджикистана.

Алакранит был описан как новый минеральный вид в 1986 г. В.И. Поповой с коллегами из фумарольных возгонов кальдеры вулкана Узон на Камчатке в ассоциации с реальгаром и узонитом As_4S_5 (Попова и др., 1986). Позже из ртутного месторождения Хайдаркан в Киргизии был описан как новый минерал бонанциит, установленный в образце, состоящем из кальцита, вакабашилита, реальгара и незначительного количества серы, где он был представлен редкими зернами размером до 100 мкм (Bindi et al., 2015). Однако данные об аналогичных этим минералам по составу и параметрам элементарных ячеек сульфидах, как природных, так и синтетических, встречались в литературе и ранее. Так, А. Кларком на Ag–As–Sb-месторождении Алакран (Alacran) в Чили был описан так называемый «высокотемпературный реальгар» (high realgar), α -AsS (Clark, 1970), который впоследствии В.И. Попова с коллегами идентифицировали как минерал, аналогичный найденному ими алакраниту, как раз и получившему название по этой первой находке. Промежуточные по параметрам элементарной ячейки фазы между алакранитом и бонанциитом (не имеющим на тот момент еще статуса минерала) были также описаны из возгонов пожаров на отвалах угольной шахты Катержина (Kateřina) в Чехии (Začec, Ondruš, 1997). На этом материале П. Бонанци с соавторами показали существование полисоматической серии от β - As_4S_4 (пр.гр. C2/c) до алакранита As_8S_9 (пр.гр. P2/c), которая характеризуется чередованием микродоменов As_4S_4 и As_8S_9 , что ведет к постепенному изменению трансляционной симметрии с одновременным возрастанием объема элементарной ячейки от 803 до 860 Å³ у этих минералов (Bonazzi et al., 2003a). В составе жильной эпиптермальной минерализации в ассоциации с пиритом, галенитом, сфалеритом, сульфосолями и реальгаром в поднятых с морского дна близ о. Лихир (Папуа – Новая Гвинея) образцах была обнаружена фаза состава As_4S_4 (пр.гр. C2/c), диагностированная как алакранит (Burns, Percival, 2001). Однако впоследствии П. Бонанци с соавторами показали, что алакранитом, для которого установлена стехиометрия As_8S_9 , этот минерал быть не может, а параметры ячейки его соответствуют таковым описанного ими бонанциита (Bonazzi et al., 2003b, 2015). Таким обра-

зом, история изучения бонанциита и алакранита демонстрирует, что близость состава и структуры требует особенно тщательного подхода при их диагностике. Кроме того, наряду с упомянутыми минералами имеется еще целый ряд синтетических фаз с аналогичной стехиометрией (либо очень близкой к ней), подробный обзор кристаллохимии которых приведен в ряде работ (Bonazzi et al., 1995, 1996, 2003a, b; 2008; Sejkora, 1997 и др.).

Здесь следует сделать уточнения по поводу использования терминов *альфа*- и *бета*- для разных модификаций AsS. До первой половины 1970-х гг. приставка *альфа*- использовалась в литературе для обозначения высокотемпературной модификации AsS, возникающей в диапазоне ~250–310 °C (Clark, 1970; Yu, Zoltai, 1972; Roland, 1972), под β - As_4S_4 же понимался реальгар. Однако в более поздних как минералогических, так и экспериментальных работах, наоборот, высокотемпературную модификацию стали именовать β -AsS, что привнесло определенную путаницу в терминологию. Так, авторы бонанциита (Bindi et al., 2015), говоря о β -AsS, подразумевают фазу, которая уже описывалась ранее как α -AsS из месторождения Алакран, но никак не реальгар (Clark, 1970; Попова и др., 1986). Н.В. Тимофеева с соавторами (1970) использовали обозначение β -AsS для фазы, полученной при давлении 40–70 кбар и температурах 420–1000 °C. На неоднозначности, связанной с использованием приставок *альфа*- и *бета*- применительно к сульфидам мышьяка, указывают многие авторы (Douglass et al., 1992; Bonazzi et al., 2003 и др.), предлагая специально оговаривать, какие именно фазы подразумеваются под *альфа*- и (или) *бета*-модификациями. Согласно же требованиям современной номенклатуры IUPAC, греческие буквы, равно как и римские цифры, обозначающие те или иные полиморфы, вообще не следует использовать как не несущие рациональной информации о модификации вещества (Nomenclature... 2005). Чтобы не привносить неопределенность и возможность ошибочного понимания, мы будем ниже использовать только название минерала или химическую формулу с указанием соответствующей пространственной группы, за исключением раздела, где ведется обсуждение и упоминание *альфа*- и *бета*-модификаций необходимо в историческом контексте. В этих случаях оно сопровождается соответствующими пояснениями и ссылками на литературные источники.

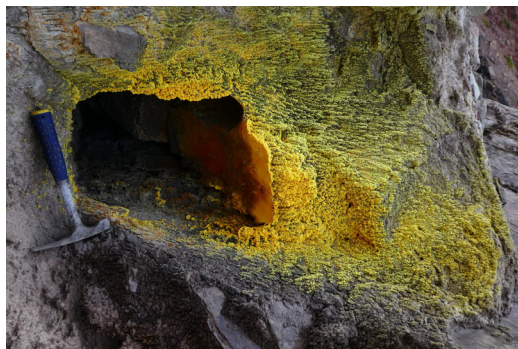
Место находки. В пределах Фан-Ягнобского месторождения каменного угля известно довольно много участков, в разной степени подвергшихся воздействию природных подземных угольных пожаров, как потухших, так и действующих. Бонанциит встречен в верховьях урочища

Кухи-Малик, на одном из активных сегодня участков горения. Точное время возникновения подземных пожаров здесь неизвестно, но, по мнению ряда исследователей, горение угольных пластов длится не менее тысячи лет, причем с деятельностью человека эти пожары не связаны (Ермаков, 1935; Вадило, 1958; Новиков и др., 1979; Новиков, Супрычев, 1986; Новиков, 1989 и др.). В геологическом отношении месторождение приурочено к Фан-Ягнобской синклинали, сложенной породами триасового, угленосными толщами юрского и перекрывающими их осадочными отложениями мелового, палеогенового и неогенового возрастов (Ермаков, 1935; Новиков, Супрычев, 1986; Охунов и др., 2017). Минералогия сублиматов этих пожаров описана в многочисленных работах (Новиков и др., 1979; 1989; Новиков, Супрычев, 1986; Белаковский и др., 1988; Белаковский, Москалев, 1988; Belakovski, 1990; Nasdala, Pekov, 1993; Мираков и др., 2017, 2019; Pautov et al., 2018, 2020; Паутов и др., 2019; Mirakov et al., 2020), часть работ посвящена продуктам пирогенного метаморфизма пород, включая паралавы (Сокол, 2003; Сокол и др., 2005; Шарыгин и др., 2009).

Урочище Кухи-Малик находится на правобережье р. Ягноб на южном склоне Зеравшанского хребта. Область распространения активных псевдофумарол расположена приблизительно в 1 км выше автодороги Душанбе – Ходжент и занимает площадь 4 га (Новиков и др., 1988). Состав газов даже из соседних трещин в пределах указанной площади может различаться, что связано в том числе с сильной изменчивостью температуры выходящих газовых потоков, колеблющейся от 40 до 590 °С, а также погодными и сезонными условиями, влияющими на динамику газовых потоков. На одном из участков пожара в сентябре 2018 года мы встретили скопления обильных желтовато-оранжевых корок (рис. 1), сложенных преимущественно мышьяковыми минералами: реальгаром, бонанциитом, алакранитом, недавно открытым ермаковитом $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$ (Karpenko et al., 2020) и рентгеноаморфными массами сульфидов мышьяка, отвечающими по составу As_2S_3 . В агрегатах сублиматов наблюдается зональность, обусловленная последовательным выделением означенных минералов мышьяка и внешне проявленная в смене их окраски от темно-красной до желтой и зеленовато-желтой. Бонанциит обнаружен в зонах насыщенно оранжевого и алого цветов, сложенных щетками короткопризматических кристаллов реальгара. Аморфные сульфиды As образуют местами плотные массы желтого цвета, а местами – легко сдуваемые налеты. Здесь же в подчиненном количестве встречены полногранные кристаллы нашатыря.



а



б

Рис. 1. Выходы сублиматов с мышьяковой минерализацией на угольном пожаре в урочище Кухи-Малик: общий вид выходов (а), одна из полостей, в которой был встречен бонанциит (б).

Бонанциит находится исключительно в виде кристаллов, как полногранных, напоминающих уплощенные вытянутые ромбоэдри, часто осложненных вициналями, так и скелетных перистого, ельчатого облика, размером от 0.1 до 1.5 мм, в среднем 0.5 мм (рис. 2). (Далее будет показано, что эти кристаллы являются, вероятнее всего, параморфозами по другой фазе состава AsS с несколько иными, чем у бонанциита, параметрами элементарной ячейки.) Бонанциит нарастает на призматические кристаллы реальгара ярко-красного цвета (рис. 3) либо на матрицу, сложенную рентгеноаморфным сульфидом мышьяка. Цвет бонанциита красновато-оранжевый, с разными оттенками у скелетных, пористых и полногранных кристаллов. Иногда на бонанциит нарастают желтоватые гексагональные от таблитчатого до короткостолбчатого габитуса кристаллы ермаковита (до 0.5 мм), как одиночные, так и их сростки.

В некоторых участках встречены нарастающие на реальгар кристаллы желтого цвета (рис. 4а), похожие по форме на бонанциит, которые были диагностированы как алакранит. Из-за крайней хрупкости кристаллы эти, к сожалению, нельзя было измерить на гониометре, равно как и изгото-

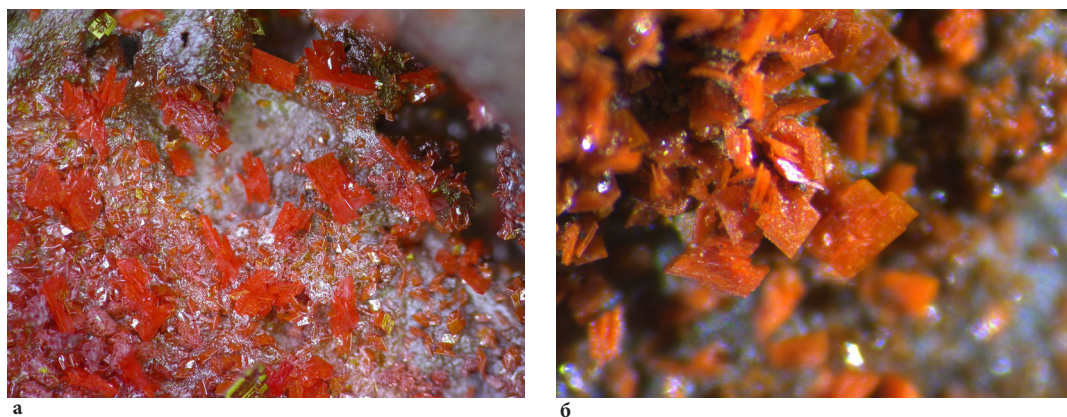


Рис. 2. Кристаллы бонаццита, выросшие в местах разгрузки газовых струй: щетка ромбовидных кристаллов, ширина поля зрения 5 мм (а); детализация облика: уплотненные клиновидные кристаллы с элементами скелетного роста, ширина поля зрения 1 мм (б).

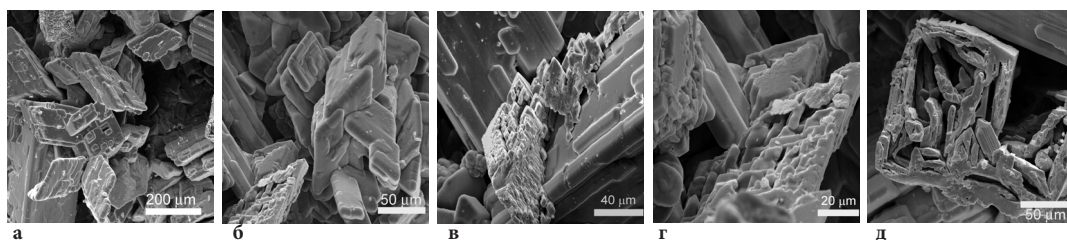


Рис. 3. Уплотненные псевдоромбоэдрические кристаллы бонаццита, нарастающие на призматические кристаллы реальгара (а – г); поперечное сечение короткопризматического скелетного кристалла реальгара (д). Фотографии в режиме вторичных электронов (SEI).

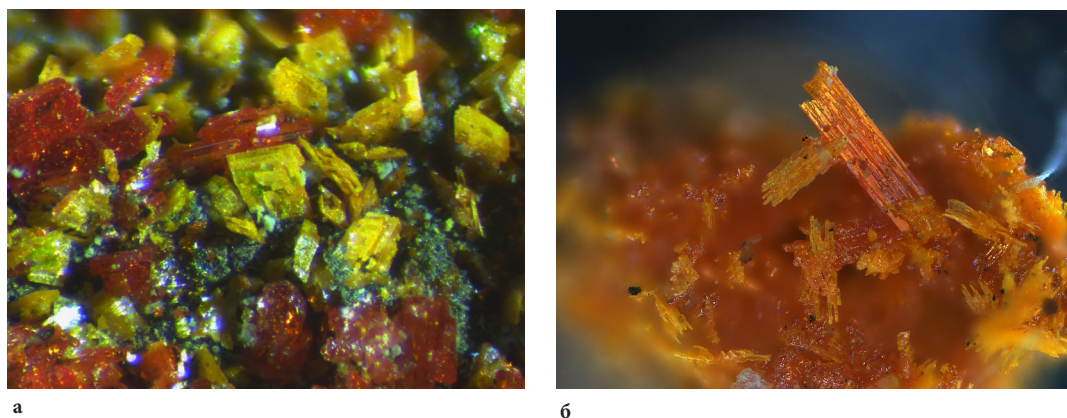


Рис. 4. Различные формы выделений алакранита: собственные кристаллы либо псевдоморфозы по бонацциту (желтого цвета) нарастающие на реальгар (а); псевдоморфозы по скелетным кристаллам реальгара (б).

вить из них препараты для микронзондового анализа. Потому диагностика минерала основывается на данных рентгеновской порошковой съемки (табл. 1) с учетом качественного состава минерала (кроме As и S, элементов с $Z > 8$ в минерале не встречено). Алакранит также диагностирован в составе полных либо частичных псевдоморфоз по

призматическим кристаллам реальгара (рис. 4б).

В проходящем свете в прозрачных шлифах бонаццит желтовато-бурый, оптически двуосный положительный, дисперсия сильная, $r < v$. Угол $2V$, измеренный на столике Федорова, составляет $60(5)^\circ$. Показатели преломления существенно выше, чем у неразбавленной жидкости

Таблица 1. Результаты расчета рентгеновских порошковых диаграмм бонацциита и алакранита

Бонацциит, Кухи-Малик (наши данные)				Бонацциит, Хайдаркан (Bindi et al., 2015)				Бонацциит, <i>hkl</i>			Алакранит, Кухи-Малик (наши данные)		Алакранит, кальдера Узона, (Попова и др., 1996)		Алакранит, <i>hkl</i>		
Измеренные*		Расчетные		Измеренные		Расчетные					Измеренные*		Измеренные				
<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/n, Å</i>				
20	6.75	13	6.725			10	6.7221	1	1	0	41	6.81	40	6.89	1	1	0
100	5.75	100	5.748	100	5.74	100	5.7441	Т	1	1	100	5.86	90	5.91	Т	1	1
35	4.99	46	4.977			32	4.9605	1	1	1	43	5.07	80	5.11	1	1	1
24	4.87	26	4.864	30	4.86	24	4.8591	2	0	0	22	4.87	30	4.87	0	2	0
9	4.66	6	4.654			13	4.6540	0	2	0			10	4.25	0	2	1
9	4.11	10	4.104	76	4.10	76	4.0992	0	2	1	26	4.02	70	4.05	Т	1	2
26	3.94	36	3.927	50	3.92	42	3.9171	Т	1	2							
5	3.306	5	3.305					2	2	1	6	3.331	30	3.38	2	2	1
16	3.182	33	3.178	60	3.12	28	3.1696	0	2	2	21	3.265	50	3.291	0	2	2
29	3.059	46	3.062			51	3.0594	3	1	0	32	3.061	100	3.064	3	1	0
40	2.995	69	2.991	50	2.95	26	2.9854	2	2	1							
11	2.955	16	2.945			22	2.9312	2	0	2	44	2.923	90	2.950	2	2	2
41	2.875	61	2.874	80	2.86	73	2.8720	2	2	2	15	2.886	20	2.903	Т	1	3
		15	2.876			17	2.8554	Т	3	1							
13	2.823	30	2.819	25	2.805	34	2.8091	Т	1	3							
5	2.798	3	2.782					3	1	2							
4	2.720	7	2.722					3	1	1	8	2.700	30	2.707	3	2	1
12	2.529	21	2.531			22	2.5180	1	1	3							
7	2.487	9	2.489					2	2	2							
6	2.428	9	2.432					4	0	0			20	2.419	4	0	0
10	2.379	35	2.377	40	2.371	40	2.3728	2	2	3							
		10	2.374					1	3	2							
		3	2.347					4	0	2			20	2.346	4	0	2
		10	2.253					3	3	1			10	2.286	3	3	0
10	2.247	11	2.248	25	2.242	10	2.2472	0	4	1							
		15	2.242			26	2.2407	3	3	0	7	2.200	30	2.224	2	0	4
6	2.189	8	2.191					4	2	1							
6	2.157	7	2.155			10	2.1537	4	2	0			20	2.166	4	2	0
6	2.140	7	2.141			14	2.1366	Т	3	3			20	2.136	3	3	1
		5	2.125					3	3	2							
4	2.100	14	2.099					2	4	0							
		12	2.097					3	3	1							
		19	2.085			21	2.0850	2	4	1			20	2.017	4	2	1
4	1.966	4	1.9635			11	1.9621	2	4	2	5	1.942	20	1.9584	3	3	3
4	1.913	16	1.9160			13	1.9147	3	3	3							
5	1.825	16	1.8284			16	1.8284	1	5	0							
5	1.799	13	1.8005			16	1.7952	4	2	2							

Таблица 1. Продолжение

4	1.780	8	1.7841					5	1	1				
			1.7803					2	4	3				
		14	1.771			16	1.7709	5	1	3				
								3	0	4		30	1.6821	3 0 4
7	1.662	16	1.6619	20	1.662	24	1.6601	1	5	2				
								3	1	5				
10	1.626	6	1.6253					3	1	4		20	1.6281	3 1 1
9	1.622	15	1.6213					6	0	0				
								4	2	3				
		7	1.5917					10	1.5858					
2	1.542	11	1.5441					10	1.5390	7	3	5		
								10	1.3423	5	5	2		
		8	1.3422					10	1.3082	4	4	5		
		9	1.3097											

Примечания. * Фотометод; для бонацциита: FeK α -излучение, Mn-фильтр, камера РКУ-86; расчет выполнен для параметров элементарной ячейки, уточненных по порошкограмме: $a = 9.958(6)$, $b = 9.308(4)$, $c = 8.907(6)$ Å, $\beta = 102.34(6)^\circ$.

Жирным шрифтом выделены линии, использованные для уточнения параметров элементарных ячеек; для алакранита: SrK α -излучение, V-фильтр, камера РКУ-86; курсивом выделены hkl рефлексов алакранита, соответствующих примитивной ячейке, которые должны быть запрещены для бонацциита с С-центрированной ячейкой.

Стандартные образцы – кварц, полилитониит с параметрами э. я.: $a = 5.1974(4)$, $b = 8.9753(6)$, $c = 10.0556(7)$ Å, $\beta = 100.454(1)^\circ$ (Hawthorne et al., 2019).

Веста (раствор серы и белого фосфора в йодистом метиле) с $n = 2.05$ (West, 1936). Следует заметить, что жидкость Веста реагирует с бонацциитом: уже через минуту минерал в ней желтеет. В отраженном свете минерал серый с интенсивными внутренними рефлексамми от желто-зеленых до красных тонов (рис. 5). Бонацциит быстро разлагается в 5-молярном растворе КОН с образованием бурых пятен. Аналогично ведет себя и алакранит. В отличие от этих минералов, частицы реальгара растворяются в КОН медленнее и образуют раствор светло-коричневой окраски, а желтые налеты аморфных сульфидов мышьяка, ассоциирующих с бонацциитом и реальгаром, при этом мгновенно приобретают черный цвет. Плотность бонацциита, измеренная в жидкости Клеричи, составила $3.57(1)$ г/см³, расчетная плотность, полученная с использованием параметров элементарной ячейки, приведенных в таблице 2, – 3.52 г/см³. Микротвердость минерала VHN = 35 измерена методом микровдавливани на приборе ПМТ-3 (разброс значений 26–46 по 10 замерам, нагрузка 10 г).

Рентгеновская диагностика бонацциита была выполнена фотометодом в камере РКУ-86 на фильтрованном FeK α -излучении. Параметры элементарной ячейки составили: $a = 9.972(5)$, $b = 9.435(3)$, $c = 8.870(6)$ Å, $\beta = 102.25(4)^\circ$, $V = 815(1)$ Å³. Кроме того, была выполнена монокристалльная съемка, для которой был отобран ромбовидный кристалл бонацциита пластинчатого облика и изучен на рентгеновском дифрактометре Bruker

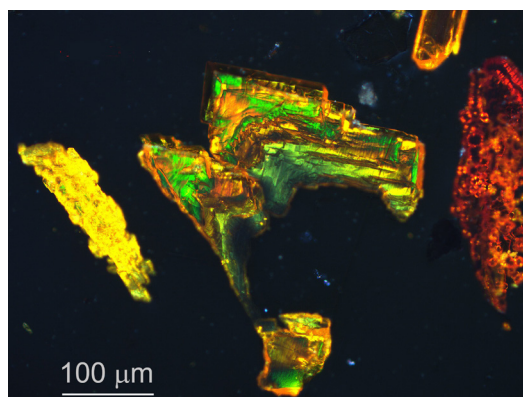


Рис. 5. Сросток кристаллов бонацциита (в центре полированного препарата в эпоксидной смоле). Отраженный свет, николи +. Видны интенсивные внутренние рефлекссы в кристаллах.

Карра APEX DUO с микрофокусной рентгеновской трубкой Mo-I μ S (MoK α -излучение, $\lambda = 0.71073$ Å) при 50 кВ и 0.6 мА. Для кристалла были определены следующие параметры элементарной ячейки C2/c: $a = 9.96(1)$, $b = 9.40(1)$, $c = 9.00(2)$ Å, $\beta = 101.9(1)^\circ$, $V = 824(2)$ Å³. В целом полученная нами порошкограмма близка расчетной для бонацциита из Хайдаркана (Bindi et al., 2015). Однако мы обнаружили отсутствие некоторых достаточно интенсивных линий нашей порошкограммы в экспериментальных данных Л. Бинди с коллегами, например, это линии (d/n , Å) (1/1)

Таблица 2. Параметры элементарных ячеек минералов и синтетических сульфидов со стехиометрией $As_4S_4 - As_8S_9$

Минералы. Местонахождение (ссылка)	<i>a</i> , Å	<i>b</i> , Å	<i>c</i> , Å	β , °	<i>V</i> , Å ³	Пр.гр.
Бонанциит. Кухи-Малик: - сростки с реальгаром - сростки с ермаковитом (наши данные)	9.972(5) 9.96(1)	9.435(3) 9.40(1)	8.870(6) 9.00(2)	102.25(4) 101.9(1)	815(1) 824(2)	C2/c
Бонанциит. Хайдаркан, Кыргызстан (Bindi et al., 2015)	9.956(1)	9.308(1)	8.869(1)	102.55(2)	802(3)	C2/c
Бонанциит. Папуа – Нов. Гвинея (Burns, Percival, 2001)	9.943(1)	9.366(1)	8.908(1)	102.007(2)	811.4(1)	C2/c
Минералы полисоматического ряда бонанциит – алакранит. Kateřina, Чехия (Bonazzi et al., 2003)	9.918(5)– 9.968(4)	9.317(2)– 9.478(7)	8.906(4)– 9.145(6)	101.81(3)– 102.45(4)	807.7(5)– 840-6(9)	Переход от C2/c к P2/c
Алакранит. Кухи-Малик (наши данные)	9.90(6)	9.58(5)	9.11(5)	101.6(6)	847(5)	
Алакранит. Kateřina, Чехия (Začek, Ondruš, 1997)	9.87(1)	9.73(3)	9.16(2)	101.52(4)	858(4)	
Алакранит. Кальдера Узона, Камчатка (Попова и др., 1986)	9.89(2)	9.73(2)	9.13(1)	101.84(5)	860(3)	P2/c
Парареальгар (по реальгару). Hunan, Китай (Bonazzi et al., 1995)	9.909(2)	9.655(1)	8.502(1)	97.29(1)	806.8(2)	P21/c
Реальгар. Monte Sughereto, Италия (Bonazzi et al., 1996)	9.326(2)	13.560(2)	6.582(1)	106.53(1)	798.0(2)	P21/n
«Высокотемпературный реальгар» (Yu, Zoltai, 1972)	9.58	9.67	9.08	100.83	826	C2/c или Cc
As ₄ S ₄ (II) (Kutoglu, 1976)	11.193(6)	9.994(6)	7.153(4)	92.8(5)	799.2(8)	P2/c
As ₈ S ₉ (Kothiyal, Gosh, 1976)	9.89	9.46	9.05	103		Cc

(*hkl*): (6.76) (15) (110), (5.01) (50) (111), (3.070) (60) (310). Такое несоответствие между расчетными и экспериментальными данными авторы первого описания бонанциита связывают с малым количеством материала, доступным для съемки (L. Bindi, перс. сообщение). Правда, такое объяснение представляется нам малоубедительным, поскольку при этом они приводят гораздо более слабые отражения (табл. 1), чем отсутствующие указанные выше линии. Порошкограмма бонанциита относительно близка к таковой алакранита, имеющиеся же отличия связаны, во-первых, с большим объемом ячейки алакранита, достигающим 860 Å³, во-вторых, для бонанциита, обладающего С-центрированной ячейкой, запрещены погасания $h + k = 2n + 1$, которые, напротив, наблюдаются в примитивной ячейке алакранита (Попова и др., 1986; Bonazzi et al., 2003).

Порошкограммы ромбовидных кристаллов желтого цвета и псевдоморфоз по реальгару, являющиеся практически идентичными, оказались наиболее близкими к алакраниту из кальдеры Узона, но не к бонанцииту (табл. 1), что и позво-

лило присвоить соответствующим отражениям символы *hkl*, принадлежащие алакраниту. Параметры ячейки, рассчитанные по данным порошкограммы: $a = 9.90(6)$, $b = 9.58(5)$, $c = 9.11(5)$ Å, $\beta = 101.6(6)^\circ$, $V = 847(5)$ Å³.

Облик кристаллов бонанциита представлен на рис. 6. По морфологии кристаллы напоминают уплощенные либо вытянутые ромбоэдры, часто блочные, скелетные, с гранями, осложненными ступенями и вичиналями; образованы преимущественно простыми формами {100} и {*hkl*} или {-*hkl*}, близкими соответственно к {111} или к {111}. Четыре кристалла размерами от 0.2 до 1 мм с наиболее хорошо выраженными гранями были измерены на двукружном отражательном гониометре ZRG-3. Из-за весьма низкого качества поверхности граней, блочных и расщепленных, замеры брались по наиболее ярким рефлексам серии сигналов либо же по отблеску, в связи с чем ошибка измерения составила 0.5–1.5° (табл. 3). Установка кристаллов бонанциита была выполнена по аналогии с наиболее близким к нему по структуре алакранитом (Попова и др., 1986) так,

Таблица 3. Сферические координаты граней кристаллов (параморфоз?) бонацциита (град.)

Символ <i>hkl</i>	Вычисленные*		Измеренные значения средние (разброс значений)		Количество замеров
	φ	ρ	φ	ρ	
(100)	90.00	90.00	90.26 (89.88–91.11)	90.17 (89.71–91.02)	8
(698)	40.07	54.77	$\pm 40.5^{**}$	54.3	10
(–11.10.9)	–40.26	54.43	$\pm(39.2–41.3)$	(53.7–54.8)	
(24.14.13)	61.64	65.44			1
(–28.13.12)	–61.61	65.57	± 61.9	65.3	

Примечание. * Рассчитаны по параметрам элементарной ячейки, полученным по порошковой диаграмме (см. табл. 1).

** В зависимости от принадлежности форме {hkl} или {-hkl} координата φ имеет положительный либо отрицательный знак соответственно.

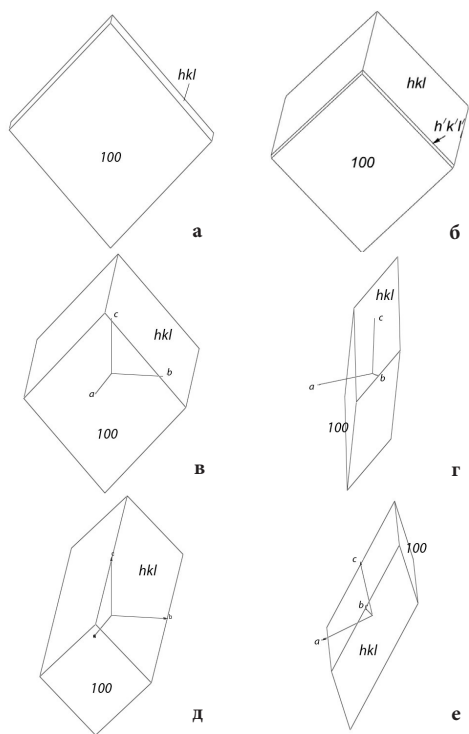


Рис. 6. Чертежи кристаллов бонацциита различных морфологических типов (предположительно параморфоз по иной модификации AsS): клинографические проекции (а, б, в, д) и проекции в произвольной ориентировке (г и е, соответствующие рисункам в и д), демонстрирующие псевдоромбоэдрический облик кристаллов.

что одна из наиболее развитых параллельных пар граней была принята за {100}. При такой ориентировке грани формы {hkl} соответствуют одной из двух ромбических призм с весьма сложными индексами {698} либо {–11.10.9}, если расчет вести по рентгеновским характеристикам кристалла (табл. 1). В поясе (100) – (hkl) на одном из кристаллов была зафиксирована очень узкая грань с еще

более сложным индексом {24.14.13}. Координаты граней {hkl} отклоняются на несколько градусов (т.е. на гораздо большую величину, чем возможная ошибка измерения) от расчетных координат форм с простыми индексами {111} или {111}, реализация которых была бы наиболее вероятна как отвечающая плоскостям с наибольшей ретикулярной плотностью (табл. 4). Всякая иная ориентировка кристалла ведет к еще большему отклонению измеренных координат от расчетных либо же вообще нарушает вид симметрии. Наглядно оценить степень отклонения измеренной грани от расчетного положения можно по фрагменту стереографической проекции, приведенной на рис. 7. Если форме {hkl} присвоить индекс {111}, то морфологическое отношение параметров *b:c*

Таблица 4. Сравнительная таблица расчетных координат граней (111) и (111) для кристаллов бонацциита, алакраниита, парареальгара и реальгара

	Грань	φ	ρ
Бонацциит (наши данные)	(111)	49.85	56.03
	(111)	–36.06	49.81
Алакраниит (Попова, 1986)	(111)	51.02	56.29
	(111)	–37.52	50.21
Парареальгар (Bonazzi et al., 1995)	(111)	48.43	53.00
	(111)	–39.93	48.95
Реальгар (Bonazzi et al., 1995)	(111)	64.84	48.78
	(111)	–42.15	33.22
As ₄ S ₄ (II) (Kutoglu, 1976)	(111)	43.90	44.81
	(111)	–39.54	42.87
«Высокотемпературный реальгар» (Yu, Zoltai, 1972)	(111)	50.93	56.13
	(111)	–39.49	50.58

Примечание. Жирным выделены координаты, наиболее близкие к измеренным граням (–hkl) бонацциита.

составит в среднем 0.852 при разбросе от 0.817 до 0.870, при этом рентгеновое отношение параметров элементарной ячейки минерала составляет $b:c = 1.063$. Одну из причин такого несоответствия мы видим в том, что измеренные кристаллы, возможно, являются параморфозами по модификации AsS с иными, чем у бонацциита, параметрами. Заметим, что сферические координаты граней

кристаллов известных на сегодняшний день модификаций AsS, имеющих простые индексы, также далеки от таковых, измеренных нами. Выполнить измерения кристаллов алакранита из нашего объекта, как уже отмечалось, мы не смогли из-за их крайней хрупкости.

Химический состав бонацциита и ассоциирующего с ним реальгара изучен на электронно-зондовом микроанализаторе JСХА-733 фирмы JEOL, оборудованном энергодисперсионным Si(Li)-детектором с системой анализа INCA Energy 350 (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА и диаметре пучка 1 мкм. В качестве стандартов использовались реальгар (SKa), As (AsLa), CdSe (SeKa). Составы минералов приведены в таблице 5 и отвечают стехиометрии As : S = 1 : 1. Следует отметить примесь Se (до 1.1 вес.%) в бонацциите, при этом в реальгаре на уровне чувствительности ЭДС-анализа селен отсутствует.

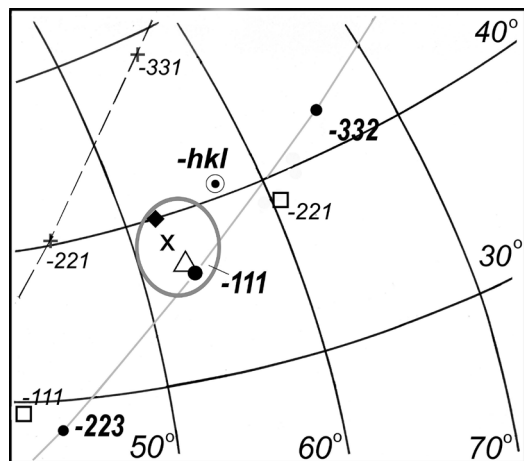


Рис. 7. Фрагмент сетки Вульфа со стереографическими проекциями граней и соответствующими индексами:

- бонацциита, Кухи-Малик (расчетн.),
- бонацциита, Кухи-Малик (измер.),
- △ бонацциита, Хайдаркан (Bindi et al., 2015),
- × алакранита (Попова и др., 1986),
- + реальгара (Bonazzi et al., 1996),
- ◆ «высокотемпературного реальгара» (Yu, Zoltai, 1972),
- парареальгара (Bonazzi et al., 1995).

Линиями обозначены пояса (001) – (Т11) – (Т10) бонацциита из Кухи-Малика (сплошная серая) и реальгара (прерывистая серая).

Обсуждение результатов

Наши наблюдения показывают, что описанные кристаллы бонацциита являются продуктами сублимации, нарастающими на реальгар в образцах, где эти минералы тесно ассоциируют; обратного взаимоотношения не наблюдалось. Такая последовательность кристаллизации требует объяснений. Экспериментальные исследования показывают, что соответствующие бонаццииту либо алакраниту фазы появляются при нагревании реальгара выше 250 °С (Clark, 1970; Roland, 1972; Yu, Zoltai, 1972). Так, Г.В. Роланд (Roland, 1972) при $T = 254(3) \text{ } ^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении зафиксировал частичный переход чистого реальгара в модификацию AsS с параметрами элементарной ячейки $a = 9.92(3)$, $b = 9.48(4)$, $c = 8.91(4) \text{ \AA}$, $\beta = 101^\circ 50'(15)$. Полученные фазы близки по составу

Таблица 5. Химический состав (мас.%) бонацциита и реальгара

Компоненты	Бонацциит, Кухи-Малик (наши данные)		Реальгар, Кухи-Малик (наши данные)	Бонацциит, Хайдаркан (Bindi et al., 2015)		AsS расчетн.
	Среднее	Разброс	Среднее	Среднее	Разброс	
As	69.01	68.20–69.65	69.58	68.94	67.88–69.35	70.03
S	29.86	28.53–30.94	30.24	30.20	28.61–30.83	29.97
Se	0.47	0.00–1.14	0.00	0.00		
Сумма	99.34		99.82	99.14		100.00
Расчет формулы на $\Sigma = 2 \text{ apfu}$						
As	1.003		1.006	1.013		1.00
S	0.991		0.993	0.988		1.00
Se	0.006		-	-		-

и параметрам ячейки к бонаццииту либо алакраниту. Учитывая локальную изменчивость динамики газовыделений, связанную с конфигурацией трещин, сезонными колебаниями, возникновение кристаллов бонацциита на реальгаре вполне может иметь место.

При описании морфологии кристаллов мы отмечали, что измеренные координаты граней наших кристаллов отклоняются на несколько градусов от расчетных координат простых форм $\{111\}$ и $\{T11\}$ бонацциита, реализация которых, казалось бы, более вероятна по сравнению с появлением форм со сложными индексами. Эти координаты также не совпадают с гранями простых форм и других фаз со стехиометрией от As_5S_4 до As_8S_9 (табл. 4, рис. 7). Можно предположить, что существовала другая модификация AsS (возможно, и с несколько иной стехиометрией), по кристаллам которой в ходе дальнейшей термической истории и сформировались параморфозы (псевдоморфозы) бонацциита. Учитывая, что по разным данным температура плавления реальгара находится в диапазоне 310–317 °С (Минералы, 1960; Виноградова, 1984), оценочная верхняя граница кристаллизации бонацциита (либо близкой к бонаццииту фазы) составляет не более 320 °С.

Одним из факторов, который мог бы обусловить рост бонацциита (либо его гипотетической протофазы) на реальгаре, является, на наш взгляд, примесь селена, которая фиксируется в последнем. Появление стабилизирующих примесей часто бывает причиной одновременного роста двух полиморфных модификаций (Попов, Карпенко, 1997). Не исключено, что появление стабилизирующей примеси Se как раз и спровоцировало рост кристаллов «протобонацциита» на реальгаре. Кроме того, уже упомянутые выше эксперименты Г.В. Роланда по изучению изменений реальгара при нагревании показали, что температура перехода в синтетический аналог бонацциита оказалась очень чувствительна к составу исходного реагента. Так, если температура инверсии чистого реальгара в бонацциит составляет 254 °С, то после добавления к реальгару небольших количеств мышьяка переход от реальгара в бонацциит фиксируется уже при $T = 242$ °С (Roland, 1972). Таким образом, примесь Se и, возможно, избыточное количество As относительно стехиометрии AsS могли инициировать осаждение бонацциита на реальгаре. К сожалению, нам не удалось однозначно понять, был ли перерыв между временами кристаллизации реальгара и бонацциита либо же процесс был непрерывным и вместо реальгара стал образовываться бонацциит.

Локальная смена термических условий могла привести к появлению алакранита в виде псевдоморфоз по бонаццииту и реальгару, и возможно,

в виде собственных кристаллов. Условия образования его, по всей видимости, были очень близки к таковым в кальдере Узона, где алакранит был встречен в сростках с кристаллами реальгара и узонита (Попова и др., 1986).

Отметим еще один момент, касающийся бонацциита с места его первого описания – из Хайдарканского месторождения (Bindi et al., 2015). В карьере на Плавиковой горе, расположенном в контурах означенного месторождения, который авторы неоднократно посещали, можно встретить глыбы вмещающих джаспероидов с жилами аурипигмента, которые подверглись антропогенному термическому воздействию от костров, разводимых местными жителями. Участки с аурипигментом, наиболее сильно подвергшиеся нагреву, преобразовались в ярко-красные ноздреватые массы, как правило, рентгеноаморфные либо дающие порошокамму, близкую к таковой диморфита – ромбического As_4S_3 . Присутствие в аурипигменте вrostков реальгара (что не редкость для этого месторождения) могло бы обусловить при этом также образование и бонацциита. Так, в экспериментах по выдерживанию смеси реальгара с аурипигментом при $T = 266$ °С в конечных продуктах была встречена высокотемпературная модификация α - AsS (Roland, 1972). Поскольку точное место отбора и происхождение изученного Л. Бинди образца бонацциита неизвестны (образец был приобретен у одного из торговцев на Мюнхенской ярмарке в середине 1990-х гг., L. Bindi, перс. сообщение), не исключается вероятность техногенного происхождения бонацциита в Хайдаркане. Мы не можем утверждать этого, но, во всяком случае, следует иметь в виду такую вероятность.

Подведем итог сказанному.

- Встреченный нами бонацциит является продуктом десублимации из газовых потоков, возникающих при подземном угольном пожаре.

- Образовавшиеся кристаллы, судя по результатам гониометрического изучения, являются, вероятнее всего, параморфозами (либо псевдоморфозами) по близкой бонаццииту фазе, но с иными параметрами элементарной ячейки и, возможно, несколько иной стехиометрией.

- Бонацциит вырос после кристаллизации реальгара. Толчок его росту могло дать локальное повышение температуры (но не более чем до 320 °С) и/или появление в газовых выделениях селена, вошедшего затем в состав сульфида мышьяка и сыгравшего роль стабилизирующей примеси. Отметим, что самородный селен встречен в сублиматах одного из соседних участков выхода на поверхность газов (Мираков и др., 2017), кроме того, в образцах с сульфидной минерализацией нами диагностирован Se-содержащий галенит.

- Вероятно, боначиит и алакранит кристаллизуются в близких условиях, причем алакранит находится в виде псевдоморфоз по боначииту и/или самостоятельных кристаллов, а также в виде псевдоморфоз по кристаллам реальгара.

Изученный образец боначиита из Кухи-Малика был передан в систематическую коллекцию Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН

(№ 96906) и оказался новым для коллекции минеральным видом.

Благодарности

Авторы благодарят А.Р. Файзиева и Ш.Ё. Ёрова за помощь в организации и проведении полевых работ, а также И.В. Пекова за ценные замечания, сделанные в ходе рецензирования статьи.

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., Супрычев В.В. Первая находка леговита 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.

Виноградова Г.З. Стеклообразование и фазовые равновесия в халькогенидных системах. Двойные и тройные системы. М.: Наука, 1984. 176 с.

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. Вып. XII. Л.: Химтеорет, 1935. С. 47–66.

Мираков М.А., Паутов Л.А., Махмадшариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р. Пауфлерит β -VO(SO₄) в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик (Рават) на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан // Новые данные о минералах. 2019. Т. 53. С. 114–121.

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

Новиков В.П., Супрычев В.В., Салихов Ф.С. Некоторые геохимические особенности гипергенного минералообразования в условиях современного угольного пожара на примере Фан-Ягнобского месторождения // Минералогия Таджикистана. 1989. №8. С. 107–118.

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 Ш.Ё., Негматов И.И. Атлас-справочник угольного месторождения Фан-Ягноб. Душанбе, 2017. 170 с.

Паутов Л.А., Мираков М.А., Махмадшариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р. Находка самородного теллура в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан) // Новые данные о минералах. 2019. Т. 53. С. 95–99.

Попов В.А., Карпенко В.Ю. О сокристаллизации минералов одинакового состава // Записки ВМО. 1997. №1. С.18–23.

Попова В.И., Попов В.А., Кларк А., Поляков В.О., Борисовский С.Е. Алакранит As₈S₉ – новый минерал // Записки ВМО. 1986. №3. С. 360–368.

Сокол Э.В., Максимова Н.В., Нигматулина 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: Дис... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.05. Новосибирск. 2003. 461 с.

Тимофеева Н.В., Аполлонов В.Н., Виноградова Г.З., Свинтицких В.Е., Фекличев Е.М., Калашиников Я.А., Дембовский С.А. О новой полиморфной модификации реальгара, полученной при высоком давлении // Геохимия. 1970. №12. С. 1522–1523.

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

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

Bindi L., Pratesi G., Miniz-Miranda M., Zoppi M., Chelazzi L., Lepore G.O., and Menchetti S. From ancient pigments to modern optoelectronic applications of arsenic sulfides: bonazziite, the natural analogue of β -As₄S₄ from Khaidarkan deposit, Kyrgyzstan // Mineral. Magaz. 2015. Vol. 79(1). P. 121–131.

Bonazzi P., Bindi L. A crystallographic review of arsenic sulfides: effects of chemical variations and changes induced by light exposure. Zeitschrift fur Kristallographie. 2008. Vol. 223. P. 132–147.

Bonazzi P., Bindi L., Olmi F., Menchetti S. How many alacranites do exist? A structural study of non-stoichiometric As₈S_{9-x} crystals // Europ. Journ. Mineral. 2003a. Vol. 15.

P. 282–288.

Bonazzi P., Bindi L., Popova V.I., Pratesi P., Menchetti S. Alacranite, As_8S_8 ; structural study of the holotype and re-assignment of the original chemical formula // Amer. Mineralogist. 2003b. Vol. 88. P. 1796–1800.

Bonazzi P., Menchetti S., Pratesi G. The crystal structure of pararealgar, As_4S_4 // Amer. Mineralogist. 1995. Vol. 80. P. 400–403.

Bonazzi P., Menchetti S., Pratesi G., Muniz-Miranda M. and Sbrana G. Light-induced variations in realgar and β - As_4S_4 : X-ray diffraction and Raman studies // Amer. Mineralogist. 1996. Vol. 81. P. 874–880.

Burns P.C., Percival J.B. Alacranite, As_4S_4 : A new occurrence, new formula, and determination of the crystal structure // Canad. Mineralogist. 2001. Vol. 39. P. 809–818.

Clark A.H. Alpha-arsenic sulfide, from Mina Alacrán, Pampa Larga, Chile // Amer. Mineralogist. 1970. Vol. 55. P. 1338–1344.

Douglas D.L., Shing C. and Wang G. The light-induced alteration of realgar to pararealgar // Amer. Mineralogist. 1992. Vol. 77. P. 1266–1274.

Hawthorne F.C., Sokolova E.V., Agakhanov A.A., Pautov L.A., Karpenko V.Yu. The crystal structure of polythionite-1M from Darai-Pioz, Tajikistan: the role of short-range order in driving symmetry reduction in 1M Li-rich mica // Canad. Mineralogist. 2019. Vol. 57. P. 519–528.

Kampf A.R., Nash B.P., Molina Donoso A.A. Mauriziodinitite, $(NH_4)(As_2O_3)_2I$, the ammonium and iodine analogue of lucabindite from the Torrecillas mine, Iquique, Chile // Mineralogical Magazine. 2020. Vol. 84. P. 267–273.

Karpenko V.Y., Pautov L.A., Siidra O.I., Mirakov M.A. Ermakovite, IMA 2020–054 in: CNMNC Newsletter 58 // Eur. J. Mineral. 2020. Vol. 32. P. 645.

Kothiyal G.P., Ghosh B. Preparation of non-stoichiometric arsenic sulphide crystals $As_2S_{2.15}$, and measurement of their electrical conductivity // J. Cryst. Growth. 1976. Vol. 32 (1). P. 29–32.

Kutoglu A. Darstellung und Kristallstruktur einer neuen isomeren Form von As_4S_4 // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. 1976. B. 419. S. 176–184.

Mirakov M.A., Pautov L.A., Siidra O.I., Makhmadsharif S., Karpenko V.Y., Plechov P.Y. Hasanovite, IMA 2020–033. CNMNC Newsletter No. 57 // Europ. Journ. Mineral. 2020. Vol. 32. P. 999.

Nasdala L., Pekov I. V. Ravatite, $C_{14}H_{10}$, a new organic mineral species from Ravat, Tadjikistan // Europ. Journ. Mineral. 1993. Vol. 5. P. 699–706.

Nomenclature of Inorganic Chemistry – IUPAC Recommendations 2005. Connelly N.G., Damhus T., Hartshorn R.M., Hutton A.T. 2005. The Royal Society of Chemistry Publishing. 366 p.

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Faiziev A.R., Nazarchuk E.V., Karpenko V.Y., Makhmadsharif S. Falgarite, $K_4(VO)_3(SO_4)_3$, a new mineral from sublimates of a natural underground coal fire at the tract of Kukhi-Malik, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan // Mineralogical Magazine. 2020. Vol. 84(3). P. 455–462.

Roland G.W. Concerning the α - AsS realgar inversion // Canad. Mineralogist. 1972. Vol. 11. P. 520–525.

Street G.B., Munir Z. The structure and thermal properties of synthetic realgar (As_4S_4) // Journal of Inorganic Nuclear Chemistry. 1970. Vol. 32. P. 3764–3774.

Sejkora J. Mineralne faze v systému $As-S$ // Bull. Mineral. Petrolog odd. Nar. Muz. (Praha). 1997. S. 106–112 (на чешск. яз.).

West C.D. Immersion liquids of high refractive index // Amer. Mineralogist. 1936. Vol. 21. P. 245–249.

Yu Shu-Cheng, Zoltai T. Crystallography of a high-temperature phase of realgar // Amer. Mineralogist. 1972. Vol. 57. P. 1873–1875.

Začek V., Ondruš P. Mineralogy of recently formed sublimates from Kateřina colliery in Radvanice, Eastern Bohemia, Czech Republic // Věstník Českého geologického ústavu. 1997. Vol. 72(3). P. 289–302.