

НОВЫЕ МИНЕРАЛЫ

ХАСАНОВИТ $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ – НОВЫЙ МИНЕРАЛ ИЗ ВОЗГОНОВ ПРИРОДНОГО ПОДЗЕМНОГО ПОЖАРА НА ФАН-ЯГНОБСКОМ УГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ, ТАДЖИКИСТАН

© 2023 г. М. А. Мираков^{1, *}, д. чл. Л. А. Паутов¹, д. чл. О. И. Сийдра^{2, 3}, С. Махмадшариф⁴, В. Ю. Карпенко¹, д. чл. П. Ю. Плечов¹

¹Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН,
Ленинский проспект, 18, стр. 2, Москва, 119071 Россия

²Кафедра кристаллографии, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 119034 Россия

³Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 Россия

⁴Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ,
ул. Айни, 267, Душанбе, 734063 Таджикистан

*e-mail: mirakov.bobish@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 14.12.2022 г.

Новый минерал хасановит $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ обнаружен в возгонах природного подземного угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении каменного угля в верховьях сая Кухи-Малик в Айнинском районе Центрального Таджикистана. Минерал назван хасановитом в честь известного петрографа Абдурахима Хасановича Хасанова (р. 1933). Хасановит встречается в виде мелких (50–200 мкм) зерен на обожженном алевролите в ассоциации с ангидритом, баритом, англезитом, молибдитом, самородным теллуром и недоизученными сульфатами Sb-K, K-Mg, Ti-V и Sn. Минерал прозрачный бесцветный со стекляннным блеском, черта белая. Хрупкий, без спайности. Микротвердость 103 (разброс от 84 до 113) кг/мм². Твердость по Мосу 3. $D_{\text{изм}} = 2.93(2)$ и $D_{\text{расч}} = 2.94$ г/см³. Хасановит в проходящем свете бесцветный, плеохроизм не наблюдается; оптически двуосный, положительный. Угол $2V = 50(3)^\circ$. Показатели преломления хасановита: $n_p = 1.584(2)$, n_m (расч.) = 1.590(3), $n_g = 1.620(2)$ (590 нм). Сильные линии в КР-спектре: 1034, 958, 916, 648, 469, 390, 273 и 232 см⁻¹. Хасановит нерастворим в воде и этаноле, но растворим в HCl. Химический состав, изученный электронно-зондовым методом (мас. %): Na₂O 4.54, K₂O 13.81, Ti₂O 1.80, MoO₃ 38.75, SO₃ 40.10, сумма 99.00. Эмпирическая формула в расчете на 10 атомов кислорода: $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Ti}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$. Сильные линии рентгеновской порошковой дифракции [d, Å (I, %) (hkl)]: 7.30(36)(110); 6.57(48)(011); 4.34(75)(121); 3.64(100)(211); 3.44(58)(031); 3.34(74)(202, 022); 3.20(63)(212); 2.879(73)(231); 2.729(50)(140); 2.436(44)(123). Хасановит моноклинный, пр. группа $P2_1/c$, параметры элементарной ячейки: $a = 9.6225(2)$; $b = 11.4049(3)$; $c = 8.1421(2)$ Å, $\beta = 99.1790(10)^\circ$, $V = 882.10(4)$ Å³, $Z = 4$. Кристаллическая структура (уточнена до $R_1 = 2.7\%$) близка к структуре синтетического $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$. Эталонный образец хасановита (голотип) хранится в фондах Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 5568/1.

Ключевые слова: хасановит, сульфаты, молибдаты, возгоны, подземный угольный пожар, Кухи-Малик, Рават, Фан-Ягнобское угольное месторождение, Таджикистан

DOI: 10.31857/S0869605523010082, **EDN:** NHZXAW

ВВЕДЕНИЕ

Новый минерал – молибдат-сульфат калия и натрия с идеализированной формулой $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ был обнаружен в возгонах природного подземного угольного пожара урочища Кухи-Малик на Фан-Ягнобском каменноугольном месторождении в Айнинском районе Центрального Таджикистана. Новый минерал назван хасановитом в честь известного петрографа, профессора кафедры минералогии и петрографии геологического факультета Таджикского национального университета (Душанбе) Абдурахима Хасановича Хасанова (р. 1 января 1933 г.). Новый минерал и его название утверждены Комиссией по новым минералам, номенклатуре и классификации Международной минералогической ассоциации (КНМНК ММА) под номером IMA 2020-033. Эталонный образец хасановита (голотип) хранится в фондах Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва), регистрационный номер 5568/1.

МЕСТО НАХОДКИ

Природный подземный угольный пожар в верховьях урочища Кухи-Малик напротив бывшего кишлака Рават (рис. 1), где обнаружен хасановит, находится на территории Фан-Ягнобского месторождения коксующегося каменного угля в Айнинском районе Таджикистана, в 70 км к северу от г. Душанбе ($39^\circ 12' 25''$ N, $68^\circ 33' 59''$ E). Месторождение каменного угля приурочено к Фан-Ягнобской синклинали, в сложении которой принимают участие осадочные породы триасового возраста, угленосные толщи юрского возраста и перекрывающие их осадочные отложения мелового, палеогенового и неогенового возрастов (Ермаков, 1935; Охунов и др., 2017). По литературным данным (Новиков и др., 1989; Охунов и др., 2017), угли Фан-Ягнобского месторождения характеризуются высокой металллоносностью и могут рассматриваться как комплексное сырье на Sn, Ag, V, W, Cu. Коэффициенты концентрации последних в углях этого месторождения составляют более 5 по отношению к РГФ (региональному геохимическому фону относительно средних содержаний микроэлементов в углях Центральной Азии). Коэффициенты концентрации Mo, Pb, Zn, Sr и Be составляют более 3 по отношению к РГФ (Охунов и др., 2017). Среднее содержание молибдена в угольных пластах № 12, 13 и 14 (почти полностью выгоревших на Кухи-Маликском участке) на соседних Восточной и Западной площадях месторождения составляет 4.9 г/т при вариациях от 2.2 до 10.8 г/т (Фозилов, Алидов, 2017).

В контурах Фан-Ягнобского месторождения известны несколько угольных подземных пожаров, расположенных на разных высотных отметках в обоих бортах долины реки Ягноб. Левобережные пожары в основном низкотемпературные, и в их возгонах преобладают квасцы, нашатырь, самородная сера и органические минералы. Подземные угольные пожары на правом борту реки Ягноб, в частности, в урочище Кухи-Малик, более высокотемпературные, и в их возгонах наблюдается примечательное минеральное разнообразие. На раватских пожарах с античных времен вплоть до середины 40-х годов прошлого столетия добывали нашатырь, серу, селитру, квасцы и купоросы, которые использовали для обработки кож, опыления виноградников, изготовления пороха и в медицине (Ермаков, 1935; Вадило, 1958; Новиков, 1989). В продуктах подземных угольных пожаров на Фан-Ягнобском месторождении на сегодня установлено более 40 минеральных видов (Ермаков, 1935; Вадило, 1958; Новиков и др., 1979; Белаковский, Москалев, 1988; Белаковский и др., 1988а; Belakovski, 1990; Новиков, 1993; Шарыгин и др., 2009; Мираков и др., 2017, 2019, 2020; Паутов и др., 2019; Карпенко и др., 2021). В возгонах этих пожаров открыты шесть новых минеральных видов: раватит $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ (Nasdala, Pekov, 1993), фальгарит $\text{K}_4(\text{VO})_3(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2020), ермаковит $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$ (Karpenko et al., 2022), искандаровит $\text{Sb}_6\text{O}_7(\text{SO}_4)_2$ (Mirakov et al., 2022а), новиковит $(\text{NH}_4)_4(\text{Mo}_2^{6+}\text{Mo}_2^{5+})_4\text{O}_8(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2022) и описываемый в

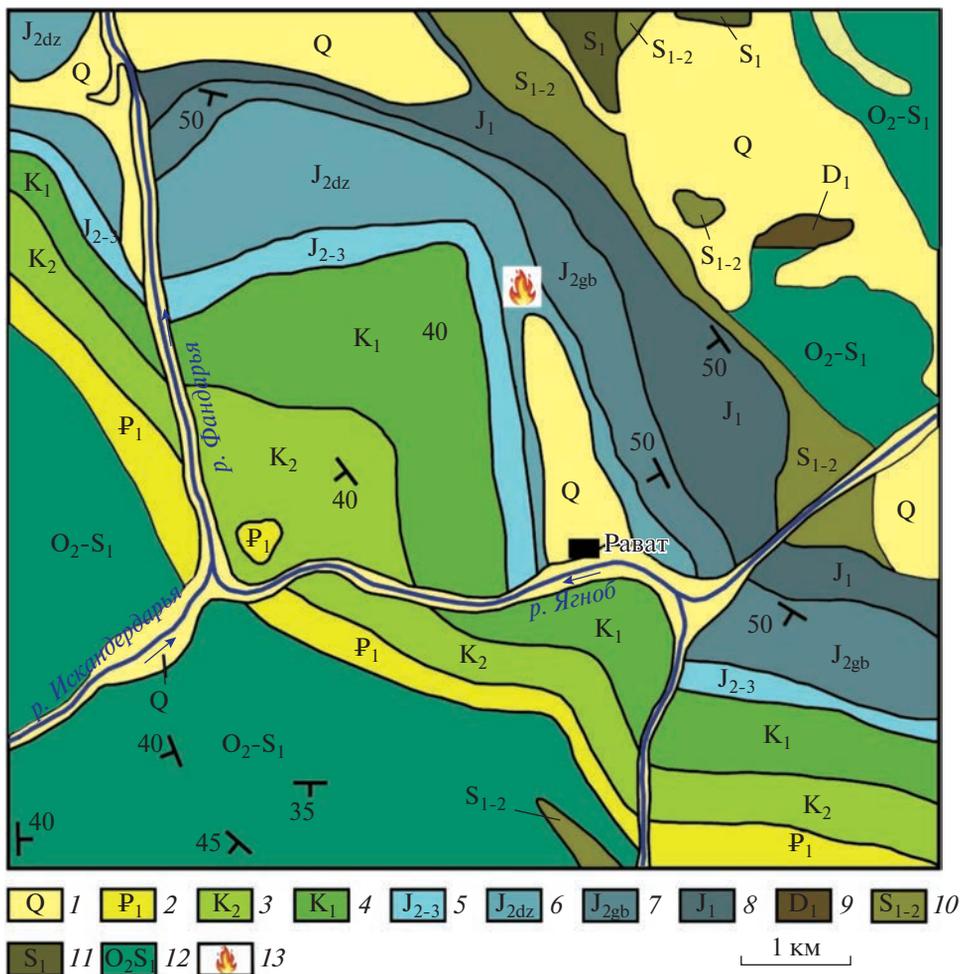


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кухи-Маликского участка Фан-Ягнобского каменноугольного месторождения. 1 – современные отложения: галечники, пески, щебень, валуны, глыбы; 2 – известняки, доломиты, мергели; 3 – песчаники, конгломераты, глины, известняки; 4 – конгломераты, песчаники, глины; 5 – конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты; 6 – угленосные отложения джижикрутской свиты. Песчаники с линзами конгломератов, алевролиты, углистые аргиллиты, пласты каменного угля; 7 – угленосные отложения габирудской свиты. Песчаники, алевролиты, аргиллиты; пласты каменного угля; 8 – аргиллиты, алевролиты, прослой известняков и углистых аргиллитов; 9 – известняки; 10 – известняки, доломиты, кремнистые и глинистые сланцы; 11 – сланцы, песчаники, известняки, кварциты; 12 – сланцы, известняки; 13 – местоположение подземного угольного пожара в верховьях сая Кухи-Малик. По материалам Р.В. Охунова и др. (2017).

Fig. 1. Geological scheme of the Kuhi-Malik area, Fan-Yagnob coal deposit.

настоящей статье хасановит $(K,Na)_2(MoO_2)(SO_4)_2$, краткие сведения о котором впервые были приведены в бюллетене КНМНК ММА (Mirakov et al., 2020a).

Хасановит был обнаружен при исследовании возгонов псевдофумарол из крупной полости, отмечавшейся в литературе под названием “Грот”, в скальном выходе в верховьях сая Кухи-Малик (рис. 2). Температура выходов газов из трещин пород в “Гро-

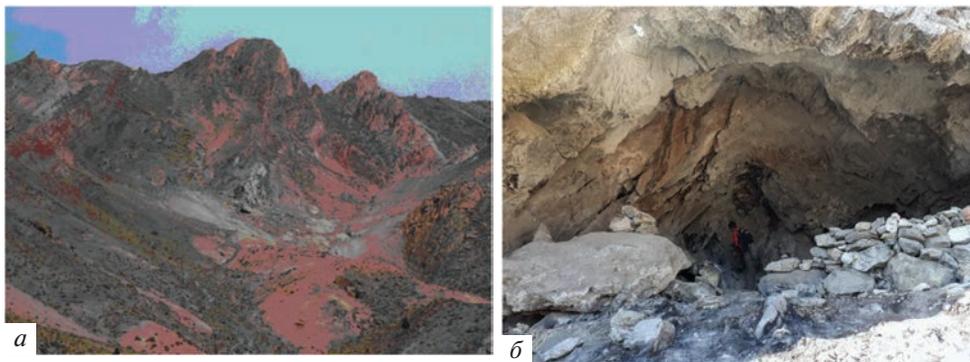


Рис. 2. Подземный природный угольный пожар в верховьях сая Кухи-Малик: *а* – вид на верховья сая. В центре снимка виден скальный выход с многочисленными выходами газов (псевдофумаролами); *б* – полость в скальном выходе, известная под названием “Грот”, в которой обнаружен хасановит.

Fig. 2. Underground coal fire at the upper reaches of the Kuhi-Malik.

те” достигает $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. При отборе образцов возгонов использовались противогазы, перчатки и длинные металлические щипцы. После остывания образцы упаковались в прочные пластиковые контейнеры с герметичными крышками.

ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хасановит встречается в виде мелких ($50\text{--}200\text{ мкм}$) зерен (рис. 3) на обожженном алевролите в ассоциации с ангидритом, баритом, англезитом, молибдитом, самородным теллуrom и недоизученными сульфатами Sb-K, K-Mg, Tl-V и Sn. Минерал прозрачный бесцветный со стекляннным блеском, черта белая. Хасановит хрупкий, без спайности. Микротвердость хасановита, измеренная на приборе ПМТ-3, тарированном по NaCl, при нагрузке 10 г по 5 замерам составляет 103 кг/мм^2 с разбросом значений от 84 до 113 кг/мм^2 , что соответствует твердости по шкале Мооса 3. Плотность, измеренная иммерсионным методом уравнивания зерен в тяжелых жидкостях (в смеси бромформа с йодистым метиленом), составила $2.93(2)\text{ г/см}^3$. Расчетная плотность для минерала состава, отвечающего эмпирической формуле, 2.94 г/см^3 . В длинно- и коротковолновом ультрафиолетовом свете минерал не люминесцирует.

Хасановит в проходящем свете бесцветный, плеохроизм не наблюдается, оптически двуосный, положительный. Измеренный на столике Федорова угол $2V = 50(3)^{\circ}$. Показатели преломления хасановита, определенные методом фокального экранирования на приборе ППМ-1 конструкции В.Г. Фекличева, следующие: $n_p = 1.584(2)$, n_m (расч.) = $1.590(3)$, $n_g = 1.620(2)$ (590 нм). Минерал нерастворим в воде и этаноле, но растворим при комнатной температуре в HCl (1 : 1).

Порошковая рентгенография. Рентгенограмма с поликристаллического образца хасановита получена в камере РКУ-86 на $\text{FeK}\alpha$ -излучении с Mn-фильтром и Ge в качестве внутреннего стандарта (табл. 2). Интенсивность отражений оценивалась путем фотометрирования оптической плотности отсканированной пленки с помощью программы Pspcstr (Зеленский и др., 2009). Параметры элементарной ячейки, рассчитанные по порошковым данным: $a = 9.638(9)$, $b = 11.392(5)$, $c = 8.140(6)\text{ \AA}$, $\beta = 99.14(5)^{\circ}$, $V = 882(1)\text{ \AA}^3$.

Химический состав хасановита изучался в лаборатории Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (Москва) с помощью электронно-зондового микроанализатора Superprobe JСХА-733 фирмы JEOL, оснащенного пятью волноводисперсионными

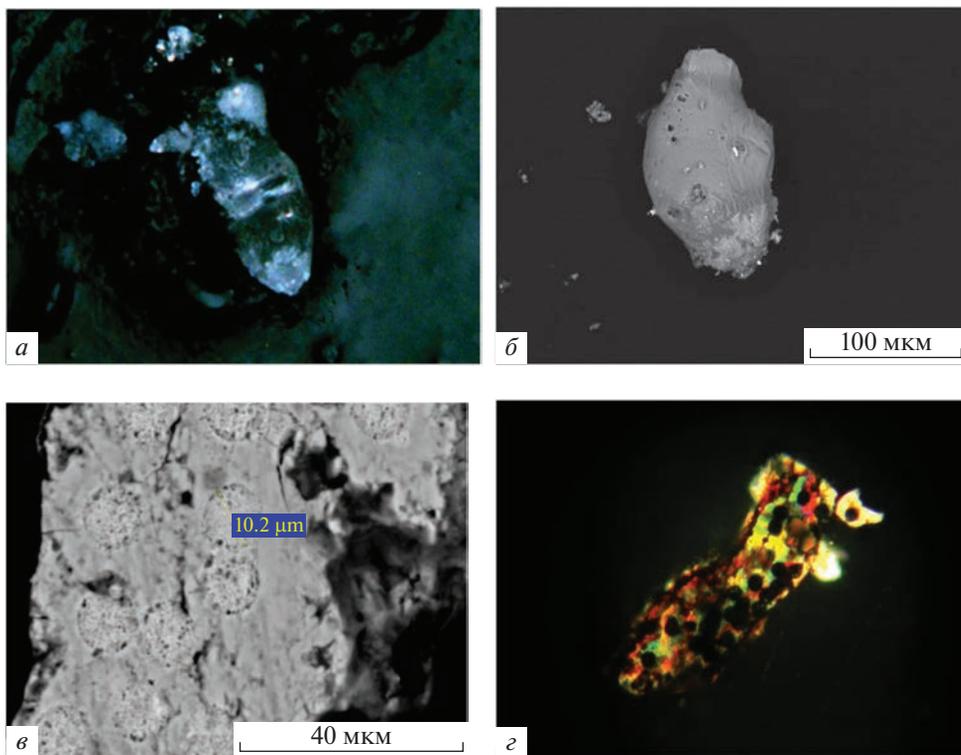


Рис. 3. *a* – вид прозрачного бесцветного зерна хасановита под бинокулярным микроскопом. Ширина поля зрения 0.5 мм; *б* – изображение зерна хасановита в режиме BSE с микровключениями в нем англезита (белые); *в, г* – круглые следы воздействия электронного зонда в местах анализа минерала, *в* – изображение в режиме отраженных электронов (BSE). В контурах круглых пятен видны многочисленные поры (черные точки), отсутствовавшие до проведения анализа; *г* – вид зерна минерала в проходящем свете при скрещенных николях. Темные круглые пятна – следы воздействия расфокусированного до 10 мкм электронного пучка – места анализов на волноводисперсионных спектрометрах.

Fig. 3. Grains of hasanovite.

ми спектрометрами и Si(Li)-энергодисперсионным спектрометром с ультратонким окном AWT-2 и системой анализа INCA Energy 350 фирмы Oxford Instruments. Анализы на волноводисперсионных спектрометрах (ВДС) проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 10 нА и диаметре пучка 10 мкм. В качестве стандартов использовались синтетический жадеит (Na $K\alpha$), микроклин № 107 (K $K\alpha$), TlBr (Tl $M\alpha$), CaMoO_4 (Mo $L\alpha$) и BaSO_4 (S $K\alpha$). Минерал неустойчив под электронным пучком, и на его поверхности остаются круглые следы воздействия электронного зонда в местах анализа (рис. 3, *в, г*). При анализе на волноводисперсионных спектрометрах наблюдалось занижение содержаний натрия и калия по сравнению с результатами анализов на энергодисперсионном спектрометре (ЭДС) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 1 нА и диаметре пучка 10 мкм. По этой причине содержания щелочных металлов в хасановите приводятся по результатам ЭДС-анализа, а остальных компонентов – по результатам ВДС-анализа (табл. 1). Эмпирическая формула хасановита, отвечающая усредненному составу, при расчете на 10 атомов кислорода: $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Tl}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$. Идеализированная формула, с учетом структурных данных, такова: $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$.

Таблица 1. Химический состав (мас. %) хасановита
Table 1. Chemical composition (wt %) of hasanovite

Компонент	мас. %	Диапазон содержаний	Стандартное отклонение	Стандарты
Na_2O^*	4.54	4.08–5.34	0.50	Жадеит синт.
K_2O^*	13.81	12.47–14.65	0.60	Микроклин 107
Ti_2O	1.80	1.30–1.96	0.35	TiBr
MoO_3	38.75	37.82–39.51	0.42	CaMoO_4
SO_3	40.10	39.00–41.51	0.32	BaSO_4
Сумма	99.00			

Примечание: * – среднее по ЭДС-анализам (минерал неустойчив под электронным пучком) (рис. 3, в, г).

КР (рамановская) спектроскопия. Спектры комбинационного рассеяния света для хасановита (рис. 4) были получены на конфокальном рамановском микроскопе JY Horiba XPlORA Jobin (кафедра петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ), оборудованного двумя лазерами (532 и 785 нм), на основе поляризационного микроскопа Olympus BX41. Рабочая температура CCD детектора (VAC Andor) -51°C , охлаждение производится с помощью элементов Пельтье. Накопление спектров проводилось при возбуждении лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 25 мВт (измеренная на образце 12 мВт), объективе $100\times$ (пространственное разрешение <1 мкм), размере щели спектрометра 100 мкм и конфокального отверстия 300 мкм. Съемка осуществлялась в диапазоне от 200 до 4000 см^{-1} с использованием спектральной решетки 1800Т (1800 линий на мм). Спектры накапливались на полированной поверхности кристаллов в произвольной ориентировке. Время накопления каждого окна спектра составляло 60 с. Визуальных повреждений анализируемой поверхности в этих условиях после взаимодействия с лазерным пучком не наблюдалось. Первичная обработка спектров выполнена в программе LabSpec, вер. 5.78.24 и Fityk, версия 1.3.1.

Наиболее интенсивная полоса в спектре наблюдается при 958 см^{-1} и соответствует симметричным валентным колебаниям в тетраэдрах $[\text{SO}_4]^{2-}$. Эту полосу можно деконволюировать на 4 одиночные моды ($951, 956, 959$ и 962 см^{-1}). Колебания решетки в хасановите наблюдаются при $232, 273$ и 390 см^{-1} . Полоса при 469 см^{-1} соответствует симметричному деформационному колебанию, а четыре пика при $597, 624, 647$ и 677 см^{-1} по всей видимости отражают антисимметричные деформационные колебания в $[\text{SO}_4]^{2-}$. Интенсивная полоса при 1034 см^{-1} может быть отнесена к колебаниям в Mo–O в октаэдрах (Hardcastle, Wachs, 1990). Полосы при $911, 916, 1184$ и 1263 см^{-1} не удалось однозначно интерпретировать. Отсутствие полос в интервале $1300\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ свидетельствует об отсутствии воды, гидроксильных групп и карбонатного аниона в структуре хасановита.

Монокристалльный рентгеноструктурный анализ. Монокристалл хасановита, отобранный для рентгеноструктурного анализа, был закреплен при помощи эпоксидной смолы на тонком стеклянном волокне и изучен на рентгеновском дифрактометре Bruker “Карра APEX DUO” с микрофокусной рентгеновской трубкой Mo- $\text{I}\mu\text{S}$ ($\lambda = 0.71073\text{ \AA}$), работающей при 50 кВ и 0.6 мА. Было собрано более полусферы трехмерных рентгеновских данных при сканировании по ω с шагом 0.50° и 30-секундной экспозицией. Собранные данные были проинтегрированы и скорректированы на поглощение с использованием модели мультисканирования в программном комплексе Bruker APEX. Кристаллическая структура (табл. 3) была уточнена в пространственной группе $P2_1/c$

Таблица 2. Рентгеновская порошковая диаграмма хасановита (d в Å)
Table 2. X-ray powder diffraction data (d in Å) for hasanovite (br = broad; vbr = very broad)

I_{meas}	d_{meas}	d_{calc}	I_{calc}	hkl		
3vbr	9.47	9.499	4	1	0	0
36	7.30	7.299	46	1	1	0
48	6.57	6.570	100	0	1	1
7	5.69	5.702	9	0	2	0
		4.889	14	1	2	0
40vbr	4.79	4.750	35	2	0	0
30br	4.63	4.651	27	0	2	1
75	4.34	4.338	46	1	2	1
31	4.03	4.033	10	1	2	1
		3.650	15	2	2	0
100	3.64	3.631	95	2	1	1
31	3.53	3.529	9	1	3	0
		3.506	13	1	0	2
58	3.44	3.437	50	0	3	1
74	3.34	3.342	58	2	0	2
		3.285	26	0	2	2
63br	3.20	3.207	23	2	1	2
		3.180	10	2	2	1
13	3.01	3.010	1	3	1	1
		2.883	10	2	2	2
73	2.879	2.879	37	2	3	1
		2.734	13	1	3	2
50br	2.729	2.731	5	1	4	0
		2.717	12	3	1	1
13br	2.624	2.623	10	1	4	1
		2.621	3	1	1	3
40vbr	2.571	2.577	17	1	3	2
		2.551	12	2	2	2
8br	2.513	2.512	6	3	2	1
44	2.436	2.435	6	1	2	3
		2.433	10	3	3	0
5br	2.388	2.412	6	3	3	1
		2.394	2	2	4	1
23br	2.341	2.333	12	4	1	1
19br	2.273	2.272	8	1	2	3
28	2.205	2.204	3	3	3	2
		2.204	2	4	0	2
24br	2.162	2.164	2	4	1	2
12	2.096	2.095	8	2	3	3
11	2.059	2.056	6	4	2	2
8vbr	2.002	2.001	3	1	1	4

Таблица 2. Окончание

I_{meas}	d_{meas}	d_{calc}	I_{calc}	hkl		
		1.9970	3	3	4	1
30	1.972	1.9732	6	$\bar{1}$	5	2
		1.9666	7	$\bar{2}$	0	4
22	1.909	1.9098	4	$\bar{4}$	1	3
8	1.851	1.8508	5	3	5	0
6	1.825	1.8248	2	4	4	0
9	1.800	1.8033	5	1	6	1
16	1.744	1.7440	6	$\bar{3}$	5	2
9vbr	1.715	1.7129	2	$\bar{5}$	3	1
4	1.671	1.6711	1	$\bar{4}$	0	4
		1.6521	2	$\bar{5}$	3	2
17	1.650	1.6520	5	$\bar{3}$	3	4
10	1.626	1.6245	2	3	5	2
5br	1.608	1.6058	2	1	7	0
23vbr	1.592	1.5918	5	0	1	5
		1.5870	4	$\bar{6}$	1	1
9vbr	1.573	1.5723	2	3	6	1
		1.5709	2	3	1	4
3	1.551	1.5530	4	$\bar{1}$	6	3
3vbr	1.534	1.5283	2	$\bar{2}$	7	1
		1.5255	4	6	2	0
5	1.517	1.5176	4	$\bar{1}$	5	4
3br	1.501	1.5050	1	$\bar{6}$	2	2
		1.4954	2	6	1	1
4	1.484	1.4840	3	4	6	0
		1.4829	4	$\bar{3}$	2	5
4	1.464	1.4638	2	3	3	4
5	1.446	1.4484	3	$\bar{5}$	4	3
		1.4461	1	$\bar{3}$	6	3
7	1.429	1.4294	2	$\bar{3}$	5	4
3vbr	1.410	1.4140	2	$\bar{1}$	4	5
7vbr	1.396	1.3958	2	$\bar{3}$	7	2
		1.3833	1	4	2	4
3br	1.383	1.3831	1	1	8	1
6vbr	1.365	1.3654	3	2	8	0
3vbr	1.353	1.3570	1	7	0	0
		1.3504	3	$\bar{5}$	6	1

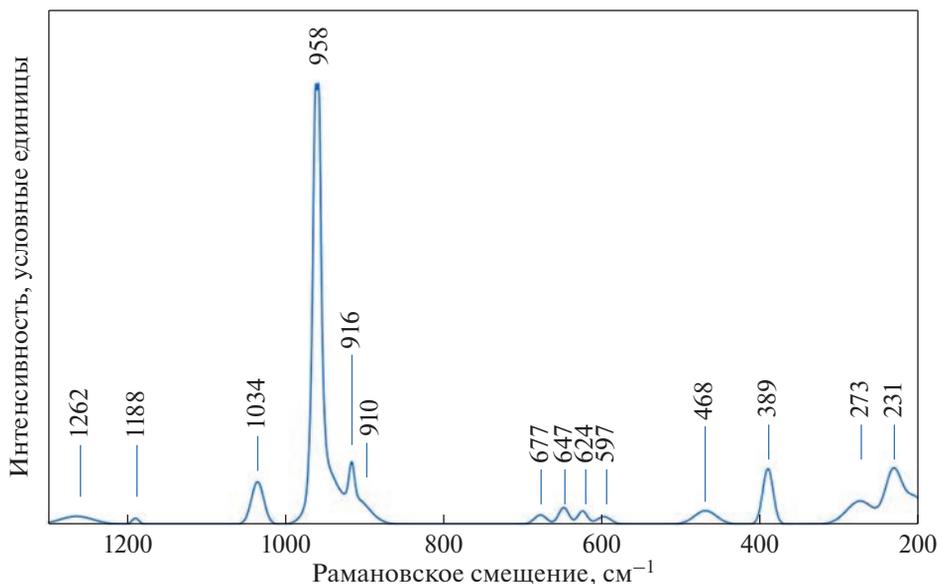


Рис. 4. КР-спектр хасановита.

Fig. 4. Raman spectrum of hasanovite.

[$a = 9.6225(2)$, $b = 11.4049(3)$, $c = 8.1421(2)$ Å, $\beta = 99.179(1)^\circ$, $V = 882.10(4)$ Å³, $Z = 4$; $R_1 = 2.7\%$ для 3698 независимых рефлексов с $|F_o| \geq 4\sigma F$] с помощью комплекса программ SHELXL (Sheldrick, 2015). Все атомы были уточнены анизотропно. Координаты атомов, параметры их смещений, некоторые длины связей и суммы валентных усилий приведены в табл. 4, 5, 6 и 7 соответственно. Суммы валентных усилий рассчитаны с использованием параметров из работы (Gagné, Hawthorne, 2015). Файл со структурной информацией по кристаллической структуре хасановита депонирован в базу данных CCDC под номером 2210217.

Кристаллическая структура хасановита содержит одну симметрично-независимую позицию Mo, две позиции S и две позиции A ($A =$ щелочной металл) (рис. 5). Каждая из позиций S^{6+} тетраэдрически координируется четырьмя атомами кислорода. Атом молибдена имеет искаженную октаэдрическую координацию четырьмя атомами кислорода общими с группами SO_4 и двумя концевыми кислородными лигандами (позиции O9 и O10). Расстояния Mo-O₇ до атомов O9 и O10 составляют 1.6684(16) и 1.6786(18) Å соответственно. Эти кислородные лиганды молибдениловой группы находятся в *цис*-ориентации один относительно другого; угол O-Mo-O составляет 104.1°.

Позиции щелочных металлов A имеют высокие координационные числа. Позиция K1 совместно заселена калием и таллием: $K_{0.9697(6)}Tl_{0.0303(6)}$, тогда как позиция Na1 заселена натрием и калием в таком соотношении: $Na_{0.772(7)}K_{0.228(7)}$. Уточненные заселенности данных позиций по данным рентгеноструктурного анализа находятся в хорошем соответствии с данными химического анализа (см. выше).

Октаэдры MoO_6 и тетраэдры SO_4 объединяются друг с другом через общие кислородные вершины с образованием слоев, показанных на рис. 6. Слои сильно гофрированы и имеют большие полости (рис. 7), так что образуются каналы, параллельные

Таблица 3. Кристаллографические параметры и параметры уточнения кристаллической структуры хасановита**Table 3.** Crystal data and refinement parameters for hasanovite

Кристаллографические данные	
Формула по результатам уточнения	$\text{K}_{1.19}\text{Na}_{0.78}\text{Ti}_{0.03}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$
Пространственная группа	$P2_1/c$
Параметры a, b, c (Å); β (°)	9.6225(2), 11.4049(3), 8.1421(2) 99.179(1)
Объем эл. ячейки (Å ³)	882.10(4)
Z	4
Рассчитанная плотность (г/см ⁻³)	2.943
Коэффициент поглощения (мм ⁻¹)	3.148
Размеры кристалла (мм)	0.2 × 0.2 × 0.2
Условия эксперимента	
Температура (К)	293
Излучение, длина волны (Å)	Mo $K\alpha$, 0.71073
$F(000)$	751
область θ (°)	2.144–37.751
h, k, l	–16→16, –19→18, –14→14
Всего отражений	15867
Независимых отражений (R_{int})	4558 (0.02)
Независимых отражений с $F > 4\sigma(F)$	3698
Уточнение структуры	
Метод уточнения	Метод наименьших квадратов в полноматричном приближении F^2
Весовая схема a, b	0.023300, 0.874600
$R_1 [F > 4\sigma(F)]$, $wR_2 [F > 4\sigma(F)]$	0.027, 0.065
R_1 all, wR_2 all	0.038, 0.061

оси a . Калий-доминантные позиции располагаются между слоями, в то время как позиции A , заселенные преимущественно натрием, находятся под выступами в гофрированном слое.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В возгонах природного подземного угольного пожара на Фан-Ягнобском каменноугольном месторождении в урочище Кухи-Малик обнаружен новый безводный молибдат-сульфат калия и натрия хасановит $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$. Он является К-Na-упорядоченным аналогом известного синтетического соединения $\text{K}_2\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al., 1998) (табл. 8). До открытия хасановита безводных молибдат-сульфатов щелочных металлов среди минералов не было известно. Синтетические соединения схожего состава, но со стехиометрией, отличной от хасановита, были описаны ранее:

Таблица 4. Координаты (x, y, z) и параметры смещений ($U_{\text{экв}}, \text{\AA}^2$) атомов в кристаллической структуре хасановита**Table 4.** Coordinates and equivalent displacement parameters (\AA) of atoms in hasanovite

Атом	Позиция Вайкоффа	x	y	z	U_{eq}
Мо1	4e	0.25421(2)	0.05120(2)	-0.00051(2)	0.02232(4)
S1	4e	0.35121(4)	0.18896(4)	-0.32156(5)	0.02069(7)
S2	4e	-0.07592(5)	0.11173(4)	-0.22126(6)	0.02612(9)
K1*	4e	0.64614(5)	0.15800(4)	-0.56423(6)	0.03997(15)
Na1**	4e	-0.07637(9)	-0.13844(7)	-0.39490(11)	0.0398(3)
O1	4e	0.24351(13)	0.28323(13)	-0.35951(17)	0.0275(3)
O2	4e	0.34807(14)	0.15826(12)	-0.14073(15)	0.0258(2)
O3	4e	-0.11485(15)	-0.00623(13)	-0.15163(18)	0.0301(3)
O4	4e	0.49056(13)	0.23132(15)	-0.32957(18)	0.0333(3)
O5	4e	0.06038(16)	0.14647(15)	-0.1243(2)	0.0385(4)
O6	4e	0.31037(18)	0.08829(15)	-0.42522(19)	0.0373(3)
O7	4e	-0.0638(2)	0.08896(18)	-0.39272(19)	0.0457(4)
O8	4e	-0.18053(19)	0.19787(16)	-0.2031(3)	0.0489(4)
O9	4e	0.39737(17)	0.00717(18)	0.1279(2)	0.0464(4)
O10	4e	0.2207(3)	-0.05901(16)	-0.1378(3)	0.0595(6)

* $\text{K}_{0.9697(6)}\text{Ti}_{0.0303(6)}$;** $\text{Na}_{0.772(7)}\text{K}_{0.228(7)}$.**Таблица 5.** Анизотропные тепловые параметры атомов в кристаллической структуре хасановита**Table 5.** Anisotropic displacement parameters (\AA) of atoms in hasanovite

Атом	U^{11}	U^{22}	U^{33}	U^{23}	U^{13}	U^{12}
Мо1	0.02593(7)	0.01897(6)	0.02251(6)	0.00301(5)	0.00521(5)	0.00305(5)
S1	0.01830(15)	0.02718(19)	0.01664(14)	0.00120(14)	0.00295(11)	0.00368(13)
S2	0.02181(17)	0.0296(2)	0.02466(18)	0.00948(16)	-0.0031(1)	-0.0031(2)
K1	0.0370(2)	0.0465(3)	0.0378(2)	0.00731(18)	0.00990(16)	0.00933(18)
Na1	0.0500(5)	0.0240(4)	0.0489(5)	-0.0019(3)	0.0183(4)	-0.0010(3)
O1	0.0206(5)	0.0309(7)	0.0318(6)	0.0109(5)	0.0064(5)	0.0069(5)
O2	0.0309(6)	0.0290(6)	0.0176(5)	0.0026(5)	0.0040(4)	0.0001(5)
O3	0.0262(6)	0.0295(7)	0.0346(7)	0.0104(6)	0.0048(5)	-0.0031(5)
O4	0.0179(5)	0.0505(9)	0.0319(7)	0.0094(6)	0.0054(5)	0.0026(5)
O5	0.0289(7)	0.0392(8)	0.0413(8)	0.0145(7)	-0.0133(6)	-0.0101(6)
O6	0.0462(9)	0.0370(8)	0.0270(6)	-0.0101(6)	0.0004(6)	0.0034(7)
O7	0.0600(11)	0.0510(10)	0.0242(7)	0.0072(7)	0.0015(7)	-0.0157(9)
O8	0.0389(9)	0.0382(9)	0.0700(12)	0.0167(9)	0.0099(8)	0.0095(7)
O9	0.0317(7)	0.0574(11)	0.0516(10)	0.0288(9)	0.0108(7)	0.0201(7)
O10	0.1002(18)	0.0294(9)	0.0545(12)	-0.0158(8)	0.0294(12)	-0.0137(10)

Таблица 6. Некоторые межатомные расстояния (Å) в кристаллической структуре хасановита
Table 6. Selected interatomic distances (Å) in hasanovite

Mo1-O9	1.6684(16)	K1-O8	2.714(2)
Mo1-O10	1.6786(18)	K1-O4	2.7331(16)
Mo1-O2	1.9846(13)	K1-O4	2.7392(15)
Mo1-O3	2.0313(14)	K1-O6	2.8433(18)
Mo1-O1	2.2208(13)	K1-O7	3.019(2)
Mo1-O5	2.2530(15)	K1-O10	3.130(2)
		K1-O8	3.173(2)
S1-O4	1.4366(14)		
S1-O6	1.4419(16)	Na1-O7	2.4234(19)
S1-O1	1.4911(13)	Na1-O5	2.4613(18)
S1-O2	1.5184(13)	Na1-O6	2.5476(19)
		Na1-O3	2.5628(18)
S2-O8	1.4310(19)	Na1-O7	2.596(2)
S2-O7	1.4428(17)	Na1-O1	2.8785(17)
S2-O5	1.4730(14)	Na1-O1	2.9561(16)
S2-O3	1.5295(15)	Na1-O8	3.099(2)
		Na1-O10	3.386(3)

Таблица 7. Расчет валентных усилий в кристаллической структуре хасановита
Table 7. Bond-valence values (*v.u.*) for hasanovite

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	Σv_c
Mo	0.40	0.79	0.69		0.37				1.96	1.90	6.11
K1		0.02		$0.18 \times 2 \rightarrow \downarrow$		0.14	0.09	0.19 0.06		0.07	0.93
Na1	0.06 0.05		0.13		0.16	0.13	0.18 0.12	0.04			0.87
S1	1.43	1.34		1.64		1.61					6.02
S2			1.30		1.49		1.61	1.66			6.06
Σv^a	1.94	2.15	2.12	2.00	2.02	1.88	2.00	1.95	1.96	1.97	

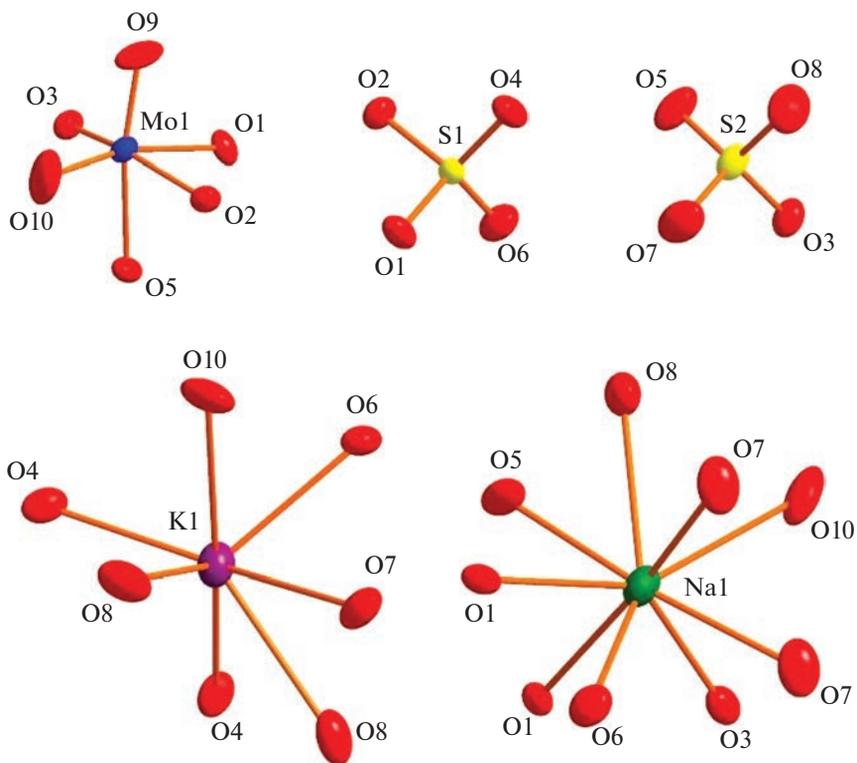


Рис. 5. Координация катионов в структуре хасановита.

Fig. 5. Cation coordination environments in the structure of hasanovite.

$\text{K}_4\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_3$ и $\text{Na}_4\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_3$ (Cline Schaeffer, Berg, 2008a, b). Помимо этого, известно несколько синтетических полиморфов безводного $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$ (Christiansen et al., 2001; Betke, Wickleder, 2011).

Таблица 8. Сравнение кристаллографических параметров хасановита и синтетического соединения $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al. 1998)

Table 8. Crystallographic data for hasanovite and synthetic $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ (Noerbygaard et al., 1998)

	Хасановит	$\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$
Пространственная группа	$P2_1/c$	$P2_1/c$
$a(\text{Å})$	9.6225(2)	9.0144(3)
$b(\text{Å})$	11.4049(3)	12.4540(4)
$c(\text{Å})$	8.1421(2)	8.8874(3)
β (°)	99.179(1)	112.194(1)
Объем эл. ячейки (Å^3)	882.10(4)	923.82
Z	4	4

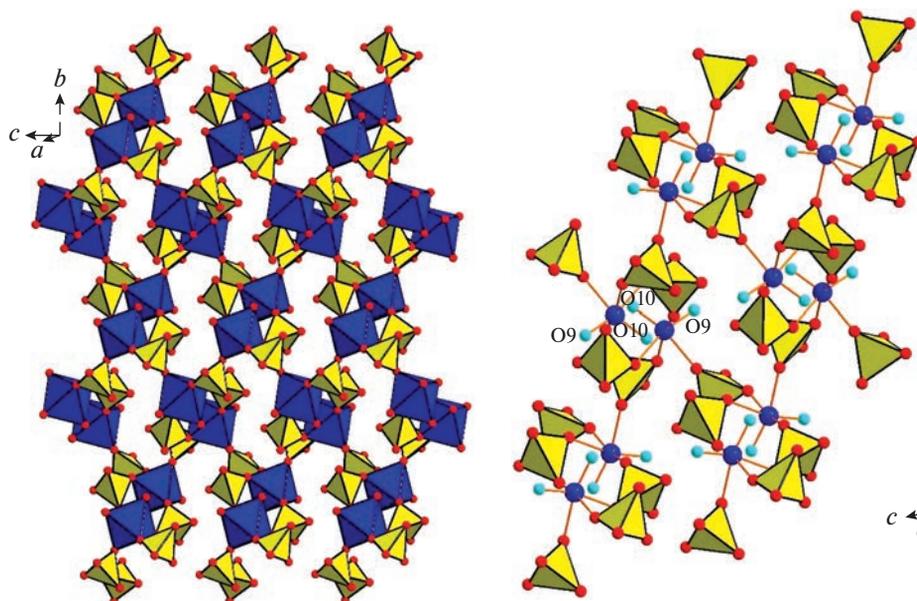


Рис. 6. Полиэдрическое представление слоя $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ в структуре хасановита (октаэдры MoO_6 = синие, тетраэдры SO_4 = желтые) (слева). Увеличенный фрагмент слоя с отмеченными голубым цветом атомами O9 и O10, принадлежащими молибдениловым катионам.

Fig. 6. Polyhedral representation of $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$ layer in hasanovite (MoO_6 octahedra = blue, SO_4 tetrahedra = yellow) (left). Enlarged fragment of the layer highlighting unshared with SO_4 tetrahedra O9 and O10 oxygen atoms (marked by light-blue).

Хасановит образуется из газа при температуре выше 300°C . Молибденовая минерализация широко развита в возгонах подземного пожара на Фан-Ягнобском угольном месторождении. В полевых условиях ее часто можно распознать по характерному посинению только что извлеченных из горячей зоны образцов при их остывании на воздухе. По литературным данным, методами рентгенофлуоресцентного и спектрального анализов молибден в повышенных содержаниях установлен во вмещающих угольные пласты железистых песчаниках и алевролитах (Новиков, Супрычев, 1986; Новиков и др., 1989). Из собственных минералов молибдена, кроме молибдита, MoO_3 , новиковита $(\text{NH}_4)_4(\text{Mo}_2^{6+}\text{Mo}_2^{5+})_4\text{O}_8(\text{SO}_4)_5$ (Pautov et al., 2022) и хасановита, $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$, в образцах возгонов этого подземного пожара нами также обнаружены другие молибдат-сульфатные фазы, которые в настоящее время находятся в стадии исследования. Представляется возможным предположить, что распространенности сульфатных минералов в возгонах угольных пожаров Кухи-Малика способствует каталитическая роль соединений молибдена в окислении SO_2 в SO_3 .

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ Ш.Ё. Ёрова, А.Р. Файзиева и М.А. Шодибекова и ресурсный центр СПбГУ “Рентгенодифракционные методы исследования” за техническую поддержку при выполнении структурных исследований хасановита.

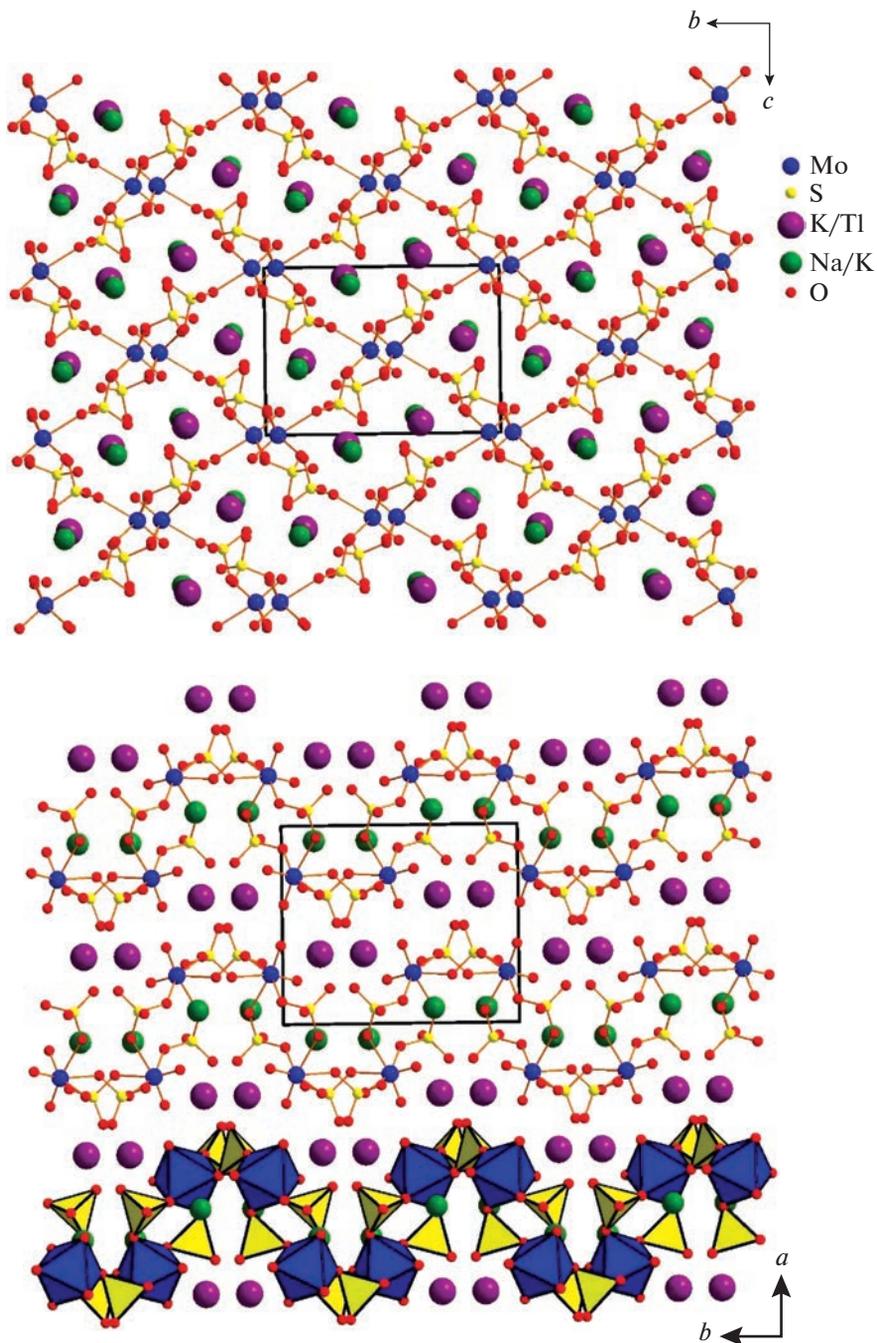


Рис. 7. Проекция кристаллической структуры хасановита вдоль оси a (вверху) и оси c (внизу). Показана элементарная ячейка.

Fig. 7. General projection of the crystal structure of hasanovite along the a axis (above) and c axis (below). The unit cell is outlined.

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**. Вып. 35. С. 191–194.
- Белаковский Д.И., Новиков В.П., Паутов Л.А., Супрычев В.В.* Первая находка летовицита на территории СССР (Центральный Таджикистан) // Докл. АН 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 горящие 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.
- Зеленский М.Е., Мацеевский А.Б., Пеков И.В.* Программа Qsрestg для автоматической обработки дебаграмм // ЗРМО. **2009**. Т. 138. № 4. С. 103–112.
- Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Мираков М.А., Сийдра О.Й., Махмадишариф С., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю.* Находка бонанциита и алакранита в возгонах природного подземного угольного пожара в урочище Кухи-Малик, Таджикистан // Новые данные о минералах. **2021**. Вып. 55. Вып. 4. С. 82–93.
- Мираков М.А., Файзиев А.Р., Паутов Л.А.* Самородный селен в продуктах подземного пожара Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан) // Докл. АН Респ. Таджикистан. **2017**. Т. 60. № 9. С. 456–460.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Махмадишариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р.* Пауфлерит $\beta\text{-VO}(\text{SO}_4)$ в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик (Рават) на Фан-Ягнобском угольном месторождении, Таджикистан // Новые данные о минералах. **2019**. Вып. 53(4). С. 114–121.
- Мираков М.А., Паутов Л.А., Карпенко В.Ю., Махмадишариф С., Шодибеков М.А.* Первая находка ртутных минералов – тиманнита и киновари в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан) // Новые данные о минералах. **2020**. Вып. 54(4). С. 96–106.
- Новиков В.П., Супрычев В.В., Бабаев М.А.* Нашатырь из возгонов подземного пожара на Раватском угольном месторождении (Центральный Таджикистан) // Докл. 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.* Пожар, которому тысяча лет // Наука и жизнь. **1989**. № 9. С. 30–32.
- Новиков В.П.* Органические производные угольного пожара на Фан-Ягнобском месторождении // Изв. АН Респ. 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.
- Паутов Л.А., Мираков М.А., Махмадишариф 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**. Вып. 53(4). С. 95–99.
- Фозилов Дж.Н., Алидодов Б.А.* Элементы-примеси в углях каменноугольного месторождения Фан-Ягноб // Изв. АН Респ. Таджикистан. Отд. физ.-мат., хим., геол. и техн. наук. **2017**. Т. 167(2). С. 101–110.
- Хасанов А.Х.* Геотектонические условия образования субщелочнобазальтоидных трубок взрыва в складчатых областях (на примере Гиссаро-Алая) // Докл. АН СССР. **1972**. Т. 203(5). С. 1195–1197.
- Хасанов А.Х.* Геология и возраст метаморфических формаций Гарм-Хайтской зоны (Центральный Таджикистан) // Изв. АН Тадж. ССР. Отд. физ.-мат. и геол.-хим. наук. **1978**. Т. 3. С. 106–109.
- Хасанов А.Х.* Изотопный состав углерода графита в связи с возрастом метаморфических комплексов Гармского массива (Южный Тянь-Шань) // Вестник Таджикск. национ. ун-та. Серия естественных наук. **2015**. Т. 1/1(156). С. 294–299.
- Шарыгин В.В., Сокол Э.В., Белаковский Д.И.* Фаялит-секанинаитовые паралавы Раватского угольного пожара (Центральный Таджикистан) // Геология и геофизика. **2009**. Т. 50(8). С. 910–932.

Hasanovite $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$, a New Mineral from Natural Underground Coal Fires at the Fan-Yagnob Coal Deposit, Tajikistan

M. A. Mirakov^{a, *}, L. A. Pautov^a, O. I. Siidra^{b, c},
S. Makhmadsharif^d, V. Yu. Karpenko^a, and P. Yu. Plechov^a

^aFersman Mineralogical Museum, RAS,
Leninskiy pr., 18-2, Moscow, 119071 Russia

^bDepartment of Crystallography, Saint Petersburg State University,
University Emb., 7/9, Saint Petersburg, 119034 Russia

^cKola Science Center, RAS, Apatity, Murmansk Region, 184209 Russia

^dInstitute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology, Academy of Sciences
of the Republic of Tajikistan, st. Aini, 267, Dushanbe, 734063 Tajikistan

*e-mail: mirakov.bobish@mail.ru

The new mineral hasanovite $\text{KNa}(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$ was discovered in sublimates of a natural underground coal fire at the Fan-Yagnob coal deposit in the upper reaches of the Kuhi-Malik ravine in the Aini district, Central Tajikistan. The mineral is named in honor of the petrographer Abdurahim Hasanovich Hasanov (born 1933). Hasanovite occurs as small (50–200 μm) grains on a burnt siltstone in association with anhydrite, baryte, anglesite, molybdenite, native tellurium, and understudied Sb-K, K-Mg, Tl-V, and Sn sulfates. The mineral is transparent, colourless with a vitreous luster and white streak. It is brittle, with no cleavage. VHN 103 (range from 84 to 113). The Mohs' hardness is 3. $D_{\text{meas}} = 2.93(2)$ and $D_{\text{calc}} = 2.94 \text{ g/cm}^3$. Hasanovite is colourless in transmitted light, pleochroism is not observed; it is optically biaxial (+), $2V = 50(3)^\circ$, $\alpha = 1.584(2)$, $\beta(\text{calc.}) = 1.590(3)$, $\gamma = 1.620(2)$ (590 nm). Strong lines in the Raman spectrum are as follows: 1034, 958, 916, 648, 469, 390, 273 and 232 cm^{-1} . Hasanovite is insoluble in water and ethanol but soluble in HCl. The chemical composition studied by electron microprobe (wt %) is: Na_2O 4.54, K_2O 13.81, Tl_2O 1.80, MoO_3 38.75, SO_3 40.10, total 99.00. The empirical formula, calculated on the basis of O = 10 atoms per formula unit, is $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Tl}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$. The strongest lines in the powder X-ray diffraction pattern are [d, Å(I, %)(hkl)]: 7.30(36)(110); 6.57(48)(011); 4.34(75)(121); 3.64(100)(211); 3.44(58)(031); 3.34(74)(202, 022); 3.20(63)(212); 2.879(73)(231); 2.729(50)(140); 2.436(44)(123). Hasanovite is monoclinic, space group is $P2_1/c$, $a = 9.6225(2)$, $b = 11.4049(3)$, $c = 8.1421(2)$ Å, $\beta = 99.1790(10)^\circ$, $V = 882.10(4)$ Å³, $Z = 4$. The crystal structure ($R_1 = 2.7\%$) is close to the structure of synthetic $\text{K}_2(\text{MoO}_2)(\text{SO}_4)_2$. The holotype specimen of hasanovite is deposited in the collection of the Fersman Mineralogical Museum of RAS (Moscow), registration number 5568/1.

Keywords: hasanovite, sulfates, molybdates, sublimates, underground coal fire, Kukhi-Malik, Ravat, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan

REFERENCES

- Betke U., Wickleder M.S. Sulfates of the refractory metals: crystal structure and thermal behavior of $\text{Nb}_2\text{O}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$, $\text{WO}(\text{SO}_4)_2$, and two modifications of $\text{Re}_2\text{O}_5(\text{SO}_4)_2$. *Inorg. Chem.* **2011**. Vol. 50. P. 858–872.
- Belakovski D. Die Mineralien der brennenden Kohleflöze von Ravat in Tadzhikistan. *Lapis.* **1990**. Jg. 15(12). S. 21–26 (in German).
- Belakovskiy D.I., Moskalyov I.V. Ammonia nitrate from the products of coal fire at the Kihimalik tract (Central Tadzhikistan). *New data on minerals.* **1988**. Vol. 35. P. 191–194 (in Russian).
- Belakovskiy D.I., Novikov V.P., Pautov L.A., Suprychev V.V. The first find of letovicite on the territory of the USSR (the Central Tajikistan). *Doklady Tadzhik. Acad. Sci.* **1988**. Vol. 31(9). P. 603–606 (in Russian).
- Christiansen A.F., Fjellvag H., Kjekshus A., Klewe B. Synthesis and characterization of molybdenum(VI) oxide sulfates and crystal structures of two polymorphs of $\text{MoO}_2(\text{SO}_4)$. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* **2001**. Iss. 6. P. 806–815.

Cline Schaeffer S.J., Berg R.W. Catena-Poly[tetrasodium [[cis-dioxido-trans-bis(sulfato-kappaO)molybdate(VI)]-mu-sulfato-kappa(2)O:O']]]. *Acta Cryst.* **2008a**, E64, i73.

Cline Schaeffer S.J., Berg R.W. Tetrapotassium cis-dioxido-trans-bis(sulfato-kappa O)sulfato(kappa(2)O,O') molybdate (VI). *Acta Cryst.* **2008b**, E 64, i20.

Ermakov N.P. Pasrud-Yagnobskoye coal deposit and firing mines of the Kan-Tag mountain. In: On geology of coal deposits of Tadzhikistan. In: *Materials of Tajik-Pamir Expedition 1933*. **1935**. XII. P. 47–66 (in Russian).

Fozilov Dj.N., Alidodov D.A. Elements of the impurities in coal coalfield background Yagnob. *News Acad. Sci. of the Republic of Tajikistan*. **2017**. Vol. 167. P. 101–110 (in Russian).

Hardcastle F.D., Wachs I.E. Determination of molybdenum–oxygen bond distances and bond orders by Raman spectroscopy. *J. Raman spectr.* **1990**. Vol. 10. P. 683–691.

Hasanov A.H. Geotectonic conditions of formation of subalkaline basaltoid explosion tubes in the orogeny areas (on the example of Gissaro-Alai). *Doklady USSR Acad. Sci.* **1972**. Vol. 203(5). P. 1195–1197 (in Russian).

Hasanov A.H. Geology and age of the metamorphic formations of the Garm-Hoit zone. *Proc. Tadjhik. Acad. Sci. Dep. Phys.-Math. and Geol.-Miner. Sci.* **1978**. Vol. 3. P. 106–109 (in Russian).

Hasanov A.H. Isotopic composition of graphitic carbon and age of metamorphic complexes of Garm rock massif (South Tien-Shan). *Harold Tadjhik. National Univers. Ser. Natur. Sci.* **2015**. Vol. 1/1(156). P. 294–299 (in Russian).

Karpenko V.Yu., Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Makhmadsharif S., Shodibekov M., Plechov P.Yu. Bonazziite and alacranite from sublimates of the natural underground coal fire at Kukhi-Malik tract, Tajikistan. *New data on minerals*. **2021**. Vol. 54(4). P. 82–93 (in Russian).

Karpenko V.Y., Pautov L.A., Siidra O.I., Mirakov M.A., Zaitsev A.N., Plechov P.Yu., Makhmadsharif S. Ermakovite $(\text{NH}_4)(\text{As}_2\text{O}_3)_2\text{Br}$, a new exhalative arsenite bromide mineral from the FanYagnob coal deposit, Tajikistan. *Miner. Mag.* **2022** (in press).

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. *Eur. J. Miner.* **2020a**. Vol. 32. P. 495–499.

Mirakov M.A., Pautov L.A., Siidra O.I., Karpenko V.Y., Plechov P.Y., Borisov A.S.: Iskandarovite, IMA 2022-034, in: CNMNC Newsletter 68, *Eur. J. Miner.* **2022a**. Vol. 34.

Mirakov M.A., Faiziev A.R., Pautov L.A. Native selenium in products of the underground fire of the Fan-Yagnob coal field (the Central Tajikistan). *Doklady Acad. Sci. Tadjhik. Republic.* **2017**. Vol. 60(9). P. 456–460 (in Russian).

Mirakov M.A., Pautov L.A., Karpenko V.Yu., Faiziev A.R., Mahmadsharif S. Pauflerite $\beta\text{-VO}(\text{SO}_4)$ from sublimates of the natural underground fire in the Kukhi-Malik (Ravat) tract, Fan-Yagnob coal deposit, Tadzhikistan. *New data on minerals*. **2019**. Vol. 53(4). P. 114–120 (in Russian).

Mirakov M.A., Pautov L.A., Mahmadsharif S. Karpenko V.Yu., Shodibekov M.A. The first find of mercury minerals - tiemannite and cinnabar in the sublimates of a natural underground fire in the Kuhi-Malik tract at the Fan-Yagnob coal. *New data on minerals*. **2020**. Vol. 54(4). P. 96–106 (in Russian).

Nasdala L., Pekov I.V. Ravatite $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$, a new organic mineral species from Ravat, Tadzhikistan. *Eur. J. Miner.* **1993**. Vol. 5. P. 699–706.

Noerbygaard T., Berg R.W., Nielsen K. The reaction between MoO_3 and molten $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ forming $\text{K}_2\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2$, studied by Raman and IR spectroscopy and X-ray crystal structure determination. *Electrochem. Soc. Proc.* **1998**. Vol. 98. P. 553–573.

Novikov V.P. The organic derivatives of the coal fire at Fan-Yagnobskoye deposit. *Proc. Tadjhik. Acad. Sci. Dep. Earth Sci.* **1994**. Vol. 4(7). P. 51–58 (in Russian).

Novikov V.P. The fire, that is a thousand years. *Nature and Life*. **1989**. N 9. P. 30–32 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V. Conditions of the modern mineral genesis at the underground firing coals at Fan-Yagnobskoye deposit. *Mineralogy of Tadzhikistan*. **1986**. Vol. 7. P. 91–104 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V., Babayev M.A. Salammoniac from sublimates of the underground coal fire at the Ravat coal deposit (Central Tadzhikistan). *Doklady Tadjh. SSR Acad. Sci.* **1979**. Vol. 12. P. 687–690 (in Russian).

Novikov V.P., Suprychev V.V., Salikhov F.S. Some geochemical specific of the supergene mineral origin in the conditions of the modern coal fire on the example of Fan-Yagnobskoye deposit. *Mineralogy of Tadzhikistan*. **1989**. Vol. 8. P. 107–118 (in Russian).

Okhunov R.V., Yorov Z.Yo., Negmatov I.I. Reference atlas of the Fan-Yagnob coal deposit. Dushanbe, **2017**. 170 p. (in Russian).

Pautov L.A., Mirakov M.A., Mahmadsarif S., Karpenko V.Yu., Faiziev A.R. The find of native tellurium in the sublimate of a natural underground fire at the Fan-Yagnob coal deposit (Tadzhikistan). *New data on minerals*. **2019**. Vol. 53(4). P. 95–99 (*in Russian*).

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Faiziev A.R., Nazarchuk E.V., Karpenko V.Y., Makhmadsharif S. Falgarite, $K_4(VO)_3(SO_4)_5$, a new mineral from sublimate of a natural underground coal fire at the tract of Kukhi-Malik, Fan-Yagnob coal deposit, Tajikistan. *Miner. Mag.* **2020**. Vol. 84(3). P. 455–462.

Pautov L.A., Mirakov M.A., Siidra O.I., Chukanov N.V., Borisov A.S., Karpenko V.Y., Plechov, P.Y., Makhmadsharif, S. Novikovite, IMA 2022-067. CNMNC Newsletter 70, *Eur. J. Miner.* **2022**. 34.

Sharygin V.V., Sokol E.V., Belakovskii D.I. Fayalite-sekaninaite paralava from the Ravat coal fire (central Tajikistan). *Russian Geol. Geophys.* **2009**. Vol. 50(8). P. 910–932 (*in Russian*).

Vadilo P.S. The underground fire in Central Tadzhikistan. *Priroda*. **1958**. N 8. P. 88–91 (*in Russian*).

Zelensky M.E., Matseevsky A.B., Pekov I.V. The computer program QSPECTR for processing X-ray powder diffraction films, obtained from the Debye-Scherrer camera. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. Vol. 138(4). P. 75–80 (*in Russian*).