

## 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<sup>1</sup>, \*, д. чл. Л. А. Паутов<sup>1</sup>, д. чл. О. И. Сийдра<sup>2, 3</sup>, С. Махмадшариф<sup>4</sup>, В. Ю. Карпенко<sup>1</sup>, д. чл. П. Ю. Плечов<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>Кольский научный центр РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 Россия

<sup>4</sup>Институт 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, Tl-V и Sn. Минерал прозрачный бесцветный со стекляннным блеском, черта белая. Хрупкий, без спайности. Микротвердость 103 (разброс от 84 до 113) кг/мм<sup>2</sup>. Твердость по Мосу 3.  $D_{\text{изм}} = 2.93(2)$  и  $D_{\text{расч}} = 2.94$  г/см<sup>3</sup>. 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<sup>-1</sup>. Хасановит нерастворим в воде и этаноле, но растворим в HCl. Химический состав, изученный электронно-зондовым методом (мас. %): Na<sub>2</sub>O 4.54, K<sub>2</sub>O 13.81, Tl<sub>2</sub>O 1.80, MoO<sub>3</sub> 38.75, SO<sub>3</sub> 40.10, сумма 99.00. Эмпирическая формула в расчете на 10 атомов кислорода:  $\text{K}_{1.16}\text{Na}_{0.58}\text{Tl}_{0.03}\text{Mo}_{1.06}\text{S}_{1.98}\text{O}_{10}$ . 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,  $\beta = 99.1790(10)^\circ$ ,  $V = 882.10(4)$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$ . 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 (КНМК 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 металлоносностью 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, Алидодов, 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., 2022a), 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

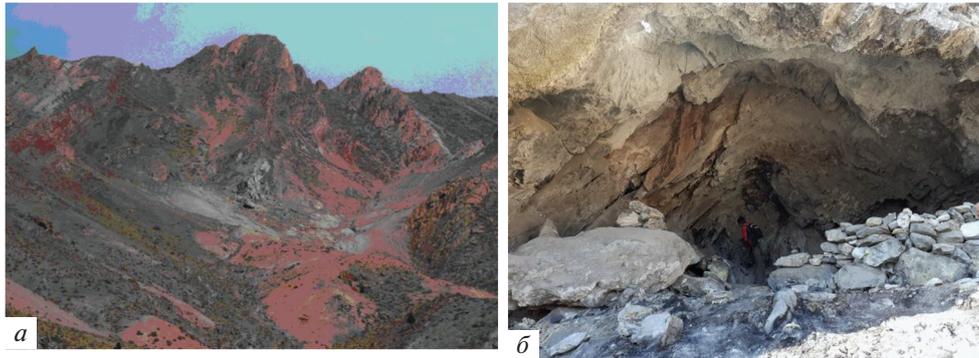


**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Кухи-Маликского участка Фан-Ягнобского каменноугольного месторождения. 1 – современные отложения: галечники, пески, щебень, валуны, глыбы; 2 – известняки, доломиты, мергели; 3 – песчаники, конгломераты, глины, известняки; 4 – конгломераты, песчаники, глины; 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, прослои песчаников 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: *a* – 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.

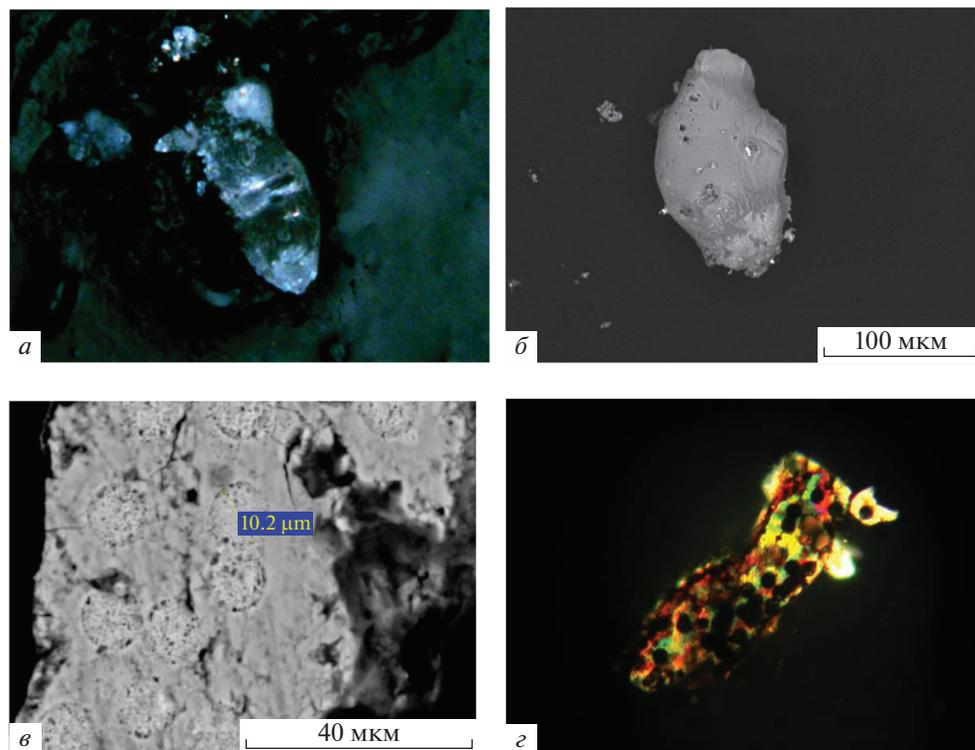
#### ОПИСАНИЕ МИНЕРАЛА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хасановит встречается в виде мелких (50–200 мкм) зерен (рис. 3) на обожженном алевролите в ассоциации с ангидритом, баритом, англезитом, молибдитом, самородным теллурием 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  $103\text{ кг/мм}^2$  с разбросом значений от 84 до  $113\text{ кг/мм}^2$ , 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,  $2.94\text{ г/см}^3$ . 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 Rspcstr (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 JXA-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  $M\alpha$ ),  $\text{CaMoO}_4$  (Mo  $L\alpha$ ) и  $\text{BaSO}_4$  (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
$\text{Na}_2\text{O}^*$	4.54	4.08–5.34	0.50	Жадеит синт.
$\text{K}_2\text{O}^*$	13.81	12.47–14.65	0.60	Микроклин 107
$\text{Ti}_2\text{O}$	1.80	1.30–1.96	0.35	TiBr
$\text{MoO}_3$	38.75	37.82–39.51	0.42	$\text{CaMoO}_4$
$\text{SO}_3$	40.10	39.00–41.51	0.32	$\text{BaSO}_4$
Сумма	99.00			

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

**КР (рамановская) спектроскопия.** Спектры комбинационного рассеяния света для хасановита (рис. 4) были получены на конфокальном рамановском микроскопе JY Horiba XPRoRA 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)  $-51^\circ\text{C}$ , 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. Съёмка осуществлялась в диапазоне от 200 до  $4000\text{ см}^{-1}$  с использованием спектральной решетки 1800T (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  $958\text{ см}^{-1}$  и соответствует симметричным валентным колебаниям в тетраэдрах  $[\text{SO}_4]^{2-}$ . Эту полосу можно деконволюировать на 4 одиночные моды ( $951, 956, 959$  и  $962\text{ см}^{-1}$ ). Колебания решетки в хасановите наблюдаются при  $232, 273$  и  $390\text{ см}^{-1}$ . Полоса при  $469\text{ см}^{-1}$  соответствует симметричному деформационному колебанию, а четыре пика при  $597, 624, 647$  и  $677\text{ см}^{-1}$  по всей видимости отражают антисимметричные деформационные колебания в  $[\text{SO}_4]^{2-}$ . Интенсивная полоса при  $1034\text{ см}^{-1}$  может быть отнесена к колебаниям в Mo-O в октаэдрах (Hardcatle, Wachs, 1990). Полосы при  $911, 916, 1184$  и  $1263\text{ см}^{-1}$  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  $\omega$  с шагом  $0.50^\circ$  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)

$I_{\text{meas}}$	$d_{\text{meas}}$	$d_{\text{calc}}$	$I_{\text{calc}}$	$hkl$		
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
<b>75</b>	<b>4.34</b>	<b>4.338</b>	<b>46</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
31	4.03	4.033	10	1	2	1
		3.650	15	2	2	0
<b>100</b>	<b>3.64</b>	<b>3.631</b>	<b>95</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
31	3.53	3.529	9	1	3	0
		3.506	13	1	0	2
58	3.44	3.437	50	0	3	1
<b>74</b>	<b>3.34</b>	<b>3.342</b>	<b>58</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>2</b>
		3.285	26	0	2	2
<b>63br</b>	<b>3.20</b>	<b>3.207</b>	<b>23</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
		3.180	10	2	2	1
13	3.01	3.010	1	3	1	1
		2.883	10	2	2	2
<b>73</b>	<b>2.879</b>	<b>2.879</b>	<b>37</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
		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

$I_{\text{meas}}$	$d_{\text{meas}}$	$d_{\text{calc}}$	$I_{\text{calc}}$	$hkl$		
		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

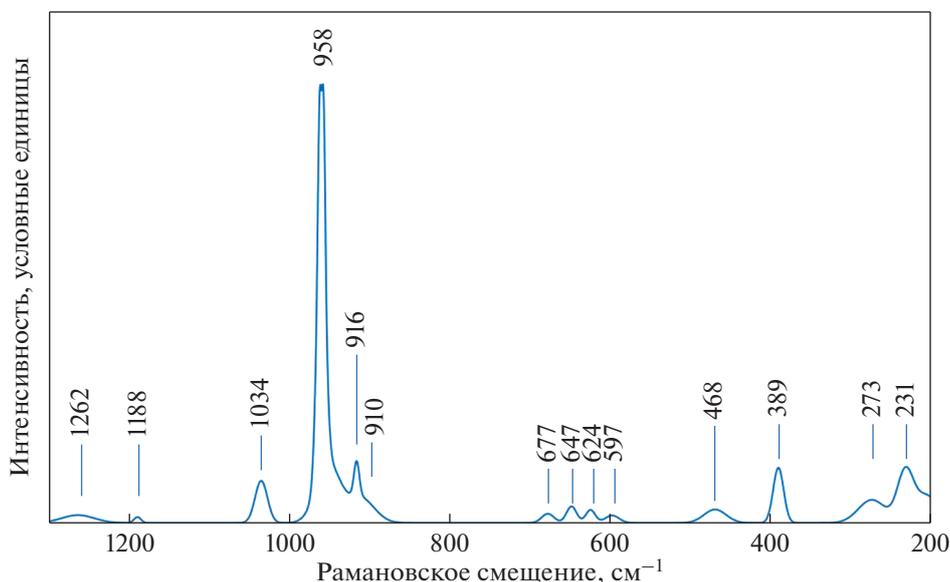


Рис. 4. КР-спектр хасановита.

Fig. 4. Raman spectrum of hasanovite.

$[a = 9.6225(2), b = 11.4049(3), c = 8.1421(2) \text{ \AA}, \beta = 99.179(1)^\circ, V = 882.10(4) \text{ \AA}^3, Z = 4; R_1 = 2.7\%$  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-O<sub>i</sub> 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

<b>Кристаллографические данные</b>	
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); $\beta$ (°)	9.6225(2), 11.4049(3), 8.1421(2) 99.179(1)
Объем эл. ячейки (Å <sup>3</sup> )	882.10(4)
$Z$	4
Рассчитанная плотность (г/см <sup>-3</sup> )	2.943
Коэффициент поглощения (мм <sup>-1</sup> )	3.148
Размеры кристалла (мм)	0.2 × 0.2 × 0.2
<b>Условия эксперимента</b>	
Температура (К)	293
Излучение, длина волны (Å)	Mo $K\alpha$ , 0.71073
$F(000)$	751
область $\theta$ (°)	2.144–37.751
$h, k, l$	–16→16, –19→18, –14→14
Всего отражений	15867
Независимых отражений ( $R_{\text{int}}$ )	4558 (0.02)
Независимых отражений с $F > 4\sigma(F)$	3698
<b>Уточнение структуры</b>	
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 ( $\text{\AA}$ ) of atoms in hasanovite

Атом	Позиция Вайкоффа	$x$	$y$	$z$	$U_{\text{eq}}$
Mo1	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 ( $\text{\AA}$ ) of atoms in hasanovite

Атом	$U^{11}$	$U^{22}$	$U^{33}$	$U^{23}$	$U^{13}$	$U^{12}$
Mo1	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	$\Sigma_{v,c}$
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
$\Sigma_{v,a}$	1.94	2.15	2.12	2.00	2.02	1.88	2.00	1.95	1.96	1.97	

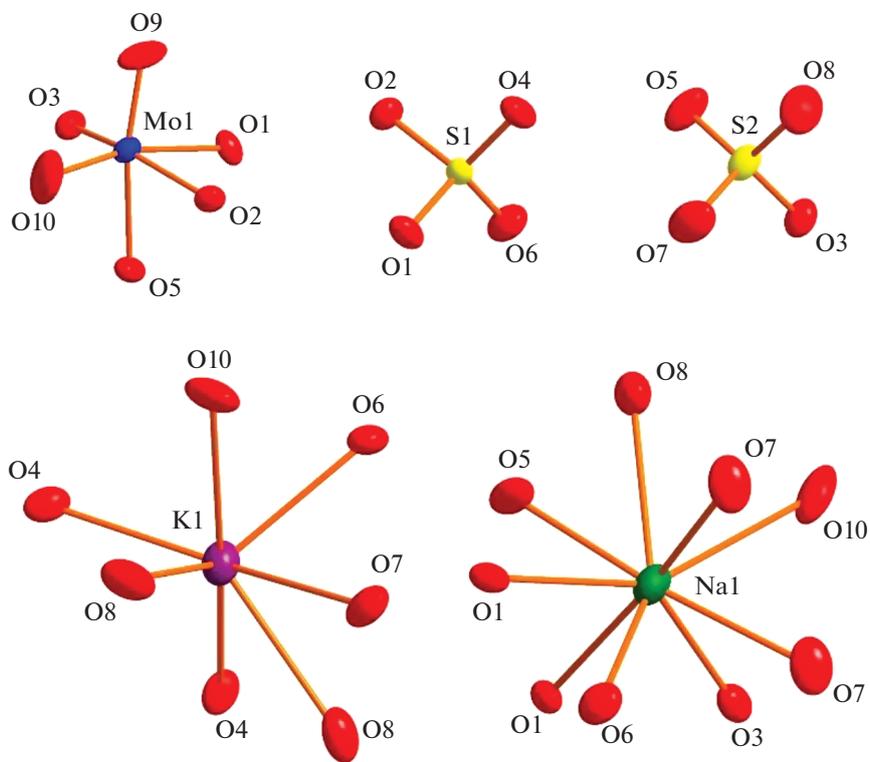


Рис. 5. Координация катионов в структуре хасановита.

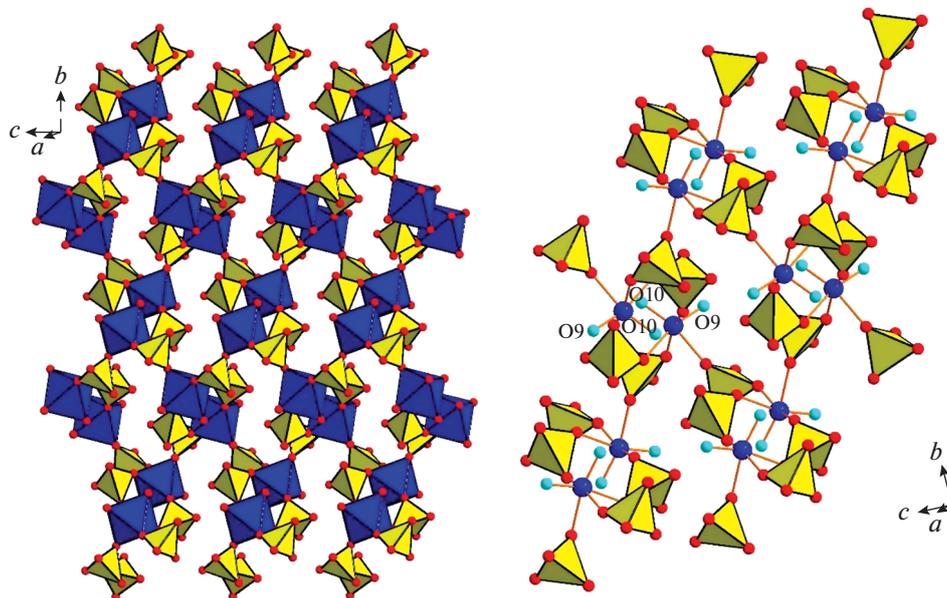
Fig. 5. Cation coordination environments in the structure of hasanovite.

$\text{K}_4\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_3$  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)
$\beta$ (°)	99.179(1)	112.194(1)
Объем эл. ячейки ( $\text{Å}^3$ )	882.10(4)	923.82
$Z$	4	4



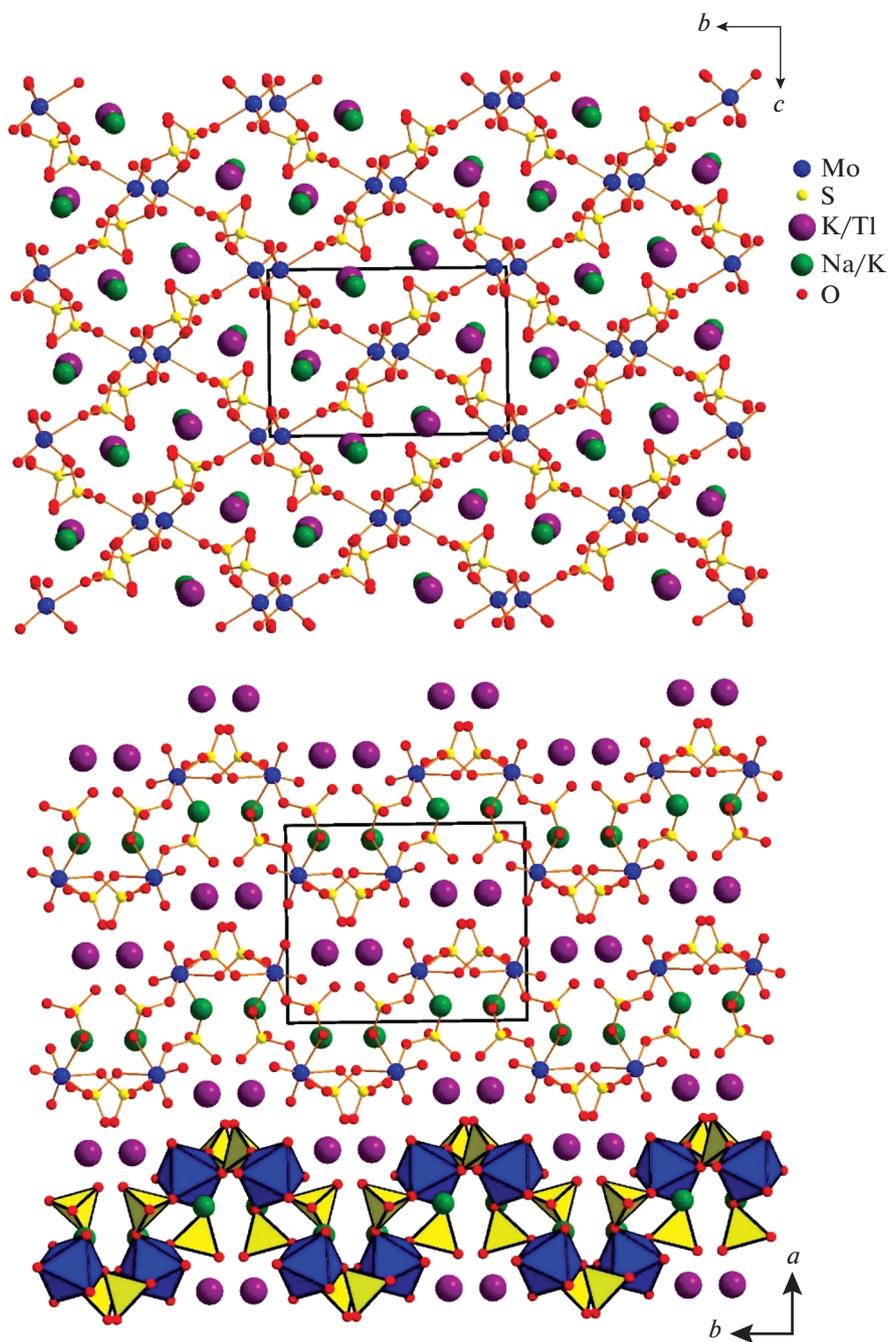
**Рис. 6.** Полиэдрическое представление слоя  $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$  в структуре хасановита (октаэдры  $\text{MoO}_6$  = синие, тетраэдры  $\text{SO}_4$  = желтые) (слева). Увеличенный фрагмент слоя с отмеченными голубым цветом атомами O9 и O10, принадлежащими молибдениловым катионам.

**Fig. 6.** Polyhedral representation of  $[\text{MoO}_2(\text{SO}_4)_2]^{2-}$  layer in hasanovite ( $\text{MoO}_6$  octahedra = blue,  $\text{SO}_4$  tetrahedra = yellow) (left). Enlarged fragment of the layer highlighting unshared with  $\text{SO}_4$  tetrahedra O9 and O10 oxygen atoms (marked by light-blue).

Хасановит образуется из газа при температуре выше  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . 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,  $\text{MoO}_3$ , 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  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$ .

#### 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 леговицита 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 Qspectr для автоматической обработки дебаеграмм // 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 алакраниита 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-Хаитской 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-секанинитовые 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<sup>a, \*</sup>, L. A. Pautov<sup>a</sup>, O. I. Siidra<sup>b, c</sup>,  
S. Makhmadsharif<sup>d</sup>, V. Yu. Karpenko<sup>a</sup>, and P. Yu. Plechov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Fersman Mineralogical Museum, RAS,  
Leninskiy pr., 18-2, Moscow, 119071 Russia*

<sup>b</sup>*Department of Crystallography, Saint Petersburg State University,  
University Emb., 7/9, Saint Petersburg, 119034 Russia*

<sup>c</sup>*Kola Science Center, RAS, Apatity, Murmansk Region, 184209 Russia*

<sup>d</sup>*Institute 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  $\mu\text{m}$ ) grains on a burnt siltstone in association with anhydrite, baryte, anglesite, molybdate, 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  $232 \text{ cm}^{-1}$ . Hasanovite is insoluble in water and ethanol but soluble in HCl. The chemical composition studied by electron microprobe (wt %) is:  $\text{Na}_2\text{O}$  4.54,  $\text{K}_2\text{O}$  13.81,  $\text{Tl}_2\text{O}$  1.80,  $\text{MoO}_3$  38.75,  $\text{SO}_3$  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 [ $d$ ,  $\text{\AA}$ ( $hkl$ )]: 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  $P2_1/c$ ,  $a = 9.6225(2)$ ,  $b = 11.4049(3)$ ,  $c = 8.1421(2) \text{ \AA}$ ,  $\beta = 99.1790(10)^\circ$ ,  $V = 882.10(4) \text{ \AA}^3$ ,  $Z = 4$ . 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 Tadshikistan. *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 Kihi-Malik 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 Tadjik-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. Physi.-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. Bonazzite 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 sublimations 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  $\text{MoO}_3$  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 sublimates 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 sublimates 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., Matsevsky 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*).