

СТРУКТУРА ОРГАНИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ

УДК 548.31

СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ НОВЫХ ДИСУЛЬФАТОУРАНИЛАТОВ

© 2023 г. В. Н. Сerezькин^{1,*}, М. С. Григорьев², Д. С. Митина¹, Л. Б. Сerezькина¹¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

*E-mail: serezhkin@samsu.ru

Поступила в редакцию 27.01.2023 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 22.02.2023 г.

Проведены синтез и рентгеноструктурное исследование монокристаллов двух новых дисульфатоуранилатов: $\text{Rb}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$ (I) и $(\text{N}_2\text{H}_5)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]$ (II). В структурах I и II каждый ион уранила координирует в экваториальной плоскости четыре бидентатно-мостиковых сульфатогруппы и одну молекулу воды, образуя пентагонально-бипирамидальные комплексы с кристаллохимической формулой $AB_2^2M^1$ ($A = \text{UO}_2^{2+}$, $B^2 = \text{SO}_4^{2-}$, $M^1 = \text{H}_2\text{O}$). Установлено, что при одинаковом составе $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$ урансодержащие структурные единицы являются геометрическими изомерами: в I они имеют цепочечное, а в II – слоистое строение.

DOI: 10.31857/S0023476123600258, EDN: HZMMNJ

ВВЕДЕНИЕ

Сульфатсодержащие соединения уранила являются одной из важных и наиболее распространенных групп вторичных минералов урана [1, 2]. Это вызвано тем, что именно с образованием сульфаток комплексов уранила связан один из используемых методов вскрытия урансодержащих руд и материалов – сернокислотное выщелачивание [3]. Среди изученных комплексов независимо от природы и заряда внешнесферных катионов наиболее устойчивыми являются дисульфатоуранилаты. В их структуре атомы U(VI) проявляют пентагонально-бипирамидальную координацию и чаще всего образуют комплексные группировки $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$, которые описываются кристаллохимической формулой $AB_2^2M^1$ ($A = \text{UO}_2^{2+}$, $B^2 = \text{SO}_4^{2-}$, $M^1 = \text{H}_2\text{O}$) [4]. Обозначения типов координации лигандов и методика записи формулы представлены в [5]. Как известно, комплексы с одинаковой кристаллохимической формулой могут иметь разную топологию вследствие геометрической изомерии, которая обусловлена изменением реального числа (C_p) соседних атомов урана, связанных с базисным всеми мостиковыми лигандами. Максимальное теоретически возможное число соседних атомов урана (C_T) можно легко рассчитать на основании кристаллохимической формулы [5]. Поскольку для комплексов $AB_2^2M^1$ $C_T = 4$, для воз-

можных геометрических изомеров в общем случае $1 \leq C_p \leq C_T = 4$.

Почти половина из приблизительно сорока структурно охарактеризованных к настоящему времени дисульфатоуранилатов известна в виде слоистых комплексов с $C_p = 4$, другая половина имеет цепочечное строение с $C_p = 2$. Реже всего встречаются слоистые комплексы $AB_2^2M^1$ с $C_p = 3$ [6–8], хотя один из них – $(\text{NH}_4)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot \text{H}_2\text{O}$ – был сравнительно недавно охарактеризован как природный минерал бештаут [9]. Интересно, что давно известный $\text{K}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot \text{H}_2\text{O}$, при исследовании которого А. Беккерель еще в 1896 г. обнаружил явление радиоактивности, относится к изомерам с $C_p = 4$ [10, 11] и тоже только недавно был описан как минерал гешиберит [12]. Для известной серии изоморфных дисульфатоуранилатов двухвалентных металлов $R[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot \text{H}_2\text{O}$, где $R = \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Cd}$ [13–15], содержащих комплексы с $C_p = 2$, также недавно был обнаружен первый природный аналог, получивший название ритвельдит (при $R = \text{Fe}$) [16]. Интересно, что согласно [17] упомянутый выше $\text{K}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot \text{H}_2\text{O}$ является также единственным известным дисульфатоуранилатом с $C_p = 2$, который содержит одновалентные катионы. Четвертый теоретически возможный изомер с $C_p = 1$ вследствие специфики формы координационных полиэдров атомов U(VI) в дисульфатоуранилатах не реализуется.

Настоящая работа посвящена изучению строения новых дисульфатоуранилатов $\text{Rb}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2.75\text{H}_2\text{O}$ (**I**) и $(\text{N}_2\text{H}_5)_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (**II**).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез I. К навескам оксида урана(VI) (0.40 г, 1.4 ммоль) и сульфата рубидия (0.19 г, 0.7 ммоль) добавляли 8 мл воды и 2 мл 2н раствора серной кислоты. Полученную суспензию помещали в автоклав на 24 ч при температуре 140°C. Из полученного раствора при медленном испарении при комнатной температуре через шесть дней формировались игольчатые желтые кристаллы состава $\text{Rb}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 2.75\text{H}_2\text{O}$ (**I**) (найденно: U 34.71 мас. %; вычислено: U 34.87 мас. %).

Синтез II. В качестве исходных веществ использовали оксид урана(VI), моноиодоуксусную кислоту и сульфат гидразиния. К водному раствору моноиодоуксусной кислоты (0.7804 г (4.2 ммоль) в 7 мл воды) добавляли оксид урана(VI) (0.2 г, 0.7 ммоль) и перемешивали до полного растворения. Затем приливали водный раствор сульфата гидразиния (0.1818 г (1.4 ммоль) в 5 мл воды). Полученный ярко-желтый прозрачный раствор оставляли для медленной кристаллизации на воздухе. Через 25–30 дней формировались желтые кристаллы состава $(\text{N}_2\text{H}_5)_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (**II**) (найденно, %: U, 43.1; вычислено, %: U, 43.59).

Рентгеноструктурный анализ. Рентгенодифракционные эксперименты проведены при 100(2) К на автоматических дифрактометрах Bruker KAPPA APEX II для **I** и Bruker D8 QUEST PHOTON для **II**. Параметры элементарной ячейки уточнены по всему массиву данных [18]. В экспериментальные значения интенсивности рефлексов внесены поправки на поглощение с использованием программы SADABS [19]. Структуры расшифрованы методом сопряженного пространства, реализованном в программе SHELXT [20], и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов SHELXL-2018 [21] по R^2 по всем данным в анизотропном приближении смещений всех атомов, кроме водорода. Атомы водорода молекул воды в **I** не были локализованы. В структуре **II** атомы водорода молекулы воды найдены из разностного синтеза Фурье и уточнены с ограничением расстояний O—H и углов H—O—H и с $U_{\text{изо}} = 1.5U_{\text{экв}}(\text{O})$. Атомы водорода однозарядных катионов гидразиния размещены в геометрически вычисленных позициях с $U_{\text{изо}} = 1.2U_{\text{экв}}(\text{N})$, положения групп NH_2 и NH_3 разупорядочены.

Параметры рентгеноструктурного эксперимента и окончательные значения факторов недоуверности для кристаллов **I** и **II** приведены в табл. 1, характеристики основных длин связей и валентных углов полиэдров UO_7 — в табл. 2. Коор-

динационные числа (**КЧ**) атомов в структурах рассчитаны с помощью метода пересекающихся сфер [22]. Координаты атомов и параметры атомных смещений депонированы в Кембриджский центр кристаллографических данных под номерами CSD 2234382 и 2234383 для **I** и **II** соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура **I** содержит два независимых атома U(VI), которые занимают частные позиции $8e$ на осях C_2 . В структуре **II** только один независимый атом U(VI), располагающийся в частной позиции $4c$ с точечной симметрией C_3 . В обеих структурах координационным полиэдром атомов урана является пентагональная бипирамида UO_7 , на главной оси которой находятся атомы кислорода ионов UO_2^{2+} . Ионы уранила практически симметричны и линейны: так, в **I** расстояния U=O равны 1.774 или 1.777 Å, угол O—U—O равен 179.2° или 179.5°, а в **II** $d(\text{U}=\text{O}) = 1.773$ и 1.776 Å, угол O—U—O равен 179.8°. Объем полиэдров Вороного—Дирихле (**ПВД**) атомов урана, имеющих форму пентагональной призмы, в структуре **I** равен 8.95 и 9.09 Å³, а в **II** — 9.09 Å³, что в пределах 1.5σ совпадает со средним значением 9.2(2) Å³, установленным для атомов U(VI) в составе координационного полиэдра UO_n при $n = 6-9$ [23].

В структурах **I** и **II** присутствуют соответственно два и один независимых атомов S(VI), которые занимают общие позиции с точечной симметрией C_1 . Все атомы серы образуют тетраэдры SO_4^{2-} , длина связей S—O в которых лежит в области 1.44–1.50 Å. Объемы ПВД атомов серы в структурах **I** (5.54, 5.57 Å³) и **II** (5.59 Å³) в пределах σ совпадают со средним значением 5.5(1) Å³, установленным для атомов S(VI) в составе более тысячи кристаллографически неэквивалентных сульфат-ионов [24]. По отношению к атомам урана в структурах **I** и **II** все сульфат-ионы играют роль бидентатных мостиковых лигандов B^2 . Согласно [5] символ “ B ” (первая буква слова bidentate) характеризует общую дентатность сульфат-иона, которая в обсуждаемых структурах равна двум. Сульфат-ионы связаны с каждым атомом урана в **I** и **II** монодентатно, поэтому надстрочная цифра 2, указывающая общее число координированных атомов металла, находится в первой “монодентатной” позиции надстрочного символа типа координации лиганда. Кроме того, атом урана координирует атом кислорода одной молекулы воды, которая выступает в роли монодентатного концевой лиганда M^1 . В итоге в экваториальной плоскости каждого иона уранила находятся пять атомов кислорода, четыре из которых принадлежат сульфат-ионам, а один — молекуле воды. Поэто-

Таблица 1. Кристаллографические характеристики, данные эксперимента и результаты уточнения структур **I** и **II**

Параметр	I	II
Химическая формула	$\text{Rb}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$	$(\text{N}_2\text{H}_5)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]$
Сингония, пр. гр., Z	Ромбическая, $Cmca$, 16	Ромбическая, $Pnma$, 4
$a, b, c, \text{\AA}$	12.7414(2), 33.7526(6), 11.0187(2)	13.0764(5), 11.4298(4), 7.6063(3)
$V, \text{\AA}^3$	4738.65(14)	1136.84(7)
$D_x, \text{г/см}^3$	3.827	3.192
$\mu, \text{мм}^{-1}$	22.279	14.710
F_{000}	4888	1008
$T, \text{К}$	100(2)	
Излучение; $\lambda, \text{\AA}$	$\text{MoK}\alpha; 0.71073$	
Размер образца, мм	$0.20 \times 0.10 \times 0.10$	$0.14 \times 0.10 \times 0.08$
$\theta_{\text{max}}, \text{град}$	35.000	29.994
Пределы h, k, l	$-20 < h < 20, -54 < k < 46, -17 < l < 17$	$-18 < h < 18, -14 < k < 16, -10 < l < 10$
Число отражений: измеренных/независимых (N_1), $R_{\text{int}}/c I > 2\sigma(I)$ (N_2)	36624/5388; 0.0610/3642	20283/1731; 0.0503/1640
Метод уточнения	Полноматричный МНК по F^2	
Число уточняемых параметров	177	102
Весовая схема	$w = 1/[\sigma^2(F_o^2) + (0.0195P)^2 + 18.1738P]$, где $P = (F_o^2 + 2F_c^2)/3$	$w = 1/[\sigma^2(F_o^2) + 5.7319P]$, где $P = (F_o^2 + 2F_c^2)/3$
wR_2 по N_1	0.0617	0.0444
R_1 по N_2	0.0296	0.0204
S	1.005	1.239
$\Delta\rho_{\text{min}}/\Delta\rho_{\text{max}}, \text{э/}\text{\AA}^3$	$-2.755/1.319$	$-1.793/1.401$

му в соответствии с [5] урансодержащим комплексным группировкам в структурах **I** (рис. 1) и **II** (рис. 2) отвечает одинаковая кристаллохимическая формула $AB_2^2M^1$, где $A = \text{UO}_2^{2+}$, $B^2 = \text{SO}_4^{2-}$, $M^1 = \text{H}_2\text{O}$.

Несмотря на идентичные формулы урансодержащих комплексов в **I** и **II**, их строение, как видно из рис. 1 и 2, существенно различается. Различие вызвано разной топологией комплексов из-за геометрической изомерии, обусловленной изме-

нением параметра C_p . Так, в цепочечной структуре **I** (рис. 1) любой атом урана связан четырьмя мостиковыми сульфат-ионами только с двумя соседними атомами U (изомер с $C_p = 2$). В то же время в слоистой структуре **II** (рис. 2) каждый атом урана связан координированными сульфат-ионами уже не с двумя (как на рис. 1), а с четырьмя соседними атомами U (изомер с $C_p = 4$).

Из-за сравнительно невысокого качества кристаллов определить позиции атомов водорода в структуре **I** не удалось. В связи с этим отметим,

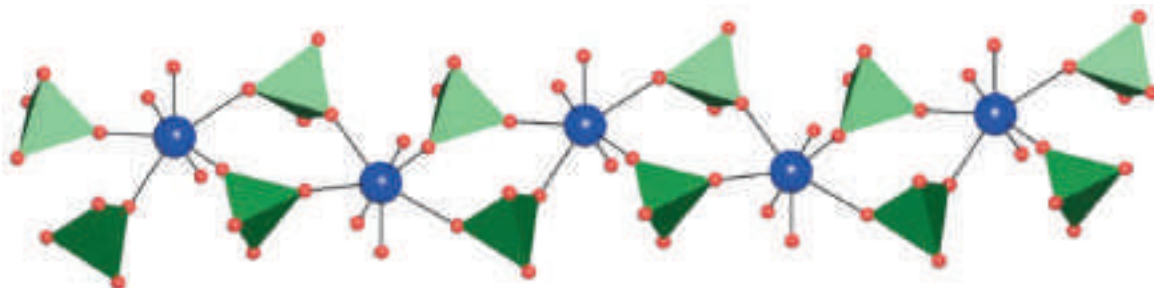


Рис. 1. Фрагмент цепочки $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$ с $C_p = 2$ в структуре кристаллов **I**. Большие кружки — атомы урана, малые — атомы кислорода. Атомы серы находятся внутри тетраэдров. Позиции атомов H молекул воды установить не удалось. Уранил-сульфатные цепи распространяются вдоль направления $[001]$.

Таблица 2. Основные геометрические параметры пентагональных бипирамид UO_7

Связь	$d, \text{\AA}$	$\Omega, \%^*$	Угол	$\omega, \text{град}$
Структура $\text{Rb}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$ (I)				
$\text{U1}-\text{O2} \times 2$	1.777(3)	21.20	$\text{O2}-\text{U1}-\text{O2}$	179.52(18)
$\text{U1}-\text{O10} \times 2$	2.333(3)	11.74	$\text{O10}-\text{U1}-\text{O9} \times 2$	73.67(10)
$\text{U1}-\text{O9} \times 2$	2.340(3)	11.89	$\text{O9}-\text{U1}-\text{O9}$	75.75(15)
$\text{U1}-\text{O1}$	2.428(4)	10.34	$\text{O10}-\text{U1}-\text{O1} \times 2$	68.55(7)
$\text{U2}-\text{O4} \times 2$	1.774(3)	21.37	$\text{O2}-\text{U2}-\text{O2}$	179.15(17)
$\text{U2}-\text{O13} \times 2$	2.362(3)	11.55	$\text{O12}-\text{U2}-\text{O11} \times 2$	74.37(10)
$\text{U2}-\text{O14} \times 2$	2.343(3)	12.03	$\text{O12}-\text{U2}-\text{O12}$	77.27(14)
$\text{U2}-\text{O3}$	2.458(4)	10.08	$\text{O11}-\text{U2}-\text{O2} \times 2$	67.29(7)
Структура $(\text{N}_2\text{H}_5)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]$ (II)				
$\text{U1}-\text{O1}$	1.776(4)	21.32	$\text{O1}-\text{U1}-\text{O2}$	179.83(17)
$\text{U1}-\text{O2}$	1.773(4)	21.43	$\text{O4}-\text{U1}-\text{O3} \times 2$	74.97(9)
$\text{U1}-\text{O3} \times 2$	2.350(2)	11.94	$\text{O3}-\text{U1}-\text{O3}$	75.02(12)
$\text{U1}-\text{O4} \times 2$	2.346(3)	11.79	$\text{O4}-\text{U1}-\text{O7} \times 2$	67.59(6)
$\text{U1}-\text{O7}$	2.482(4)	9.81		

* Ω — телесный угол (в процентах от полного телесного угла 4π ср), под которым общая грань ПВД соседних атомов видна из ядра любого из них.

что для соединений уранила с отсутствующими данными о координатах атомов Н известна зависимость телесных углов ($\Omega_{\text{O/O}}$) граней ПВД атомов кислорода, которые участвуют в образовании водородных связей $\text{O}-\text{H}/\text{O}$, от соответствующих этим связям межатомных расстояний $d(\text{O}\cdots\text{O})$ [25]. Согласно [25] эта зависимость описывается уравнением

$$\Omega_{\text{O/O}} = 49.1 - 12.4d(\text{O}\cdots\text{O}), \quad (1)$$

в котором значения $\Omega_{\text{O/O}}$ выражены в процентах от 4π ср, а $d(\text{O}\cdots\text{O})$ — в ангстремах. При дополни-

Таблица 3. Некоторые характеристики межатомных контактов, отвечающих возможным водородным связям в структуре $\text{Rb}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot 1.75\text{H}_2\text{O}$ (I)

Связь	$d(\text{O}\cdots\text{O})_{\text{эксп}}, \text{\AA}$	$\Omega_{\text{O/O}}, \%$	
		Эксперимент	Теория*
$\text{O1}-\text{H}\cdots\text{O16}$	2.671	15.00	15.98
$\text{O3}-\text{H}\cdots\text{O12}$	2.722	13.36	15.35
$\text{O5}-\text{H}\cdots\text{O2}$	3.026	11.09	11.58
$\text{O6}-\text{H}\cdots\text{O13}$	2.928	10.88	12.79
$\text{O7}-\text{H}\cdots\text{O11}$	3.067	10.49	11.07

* Значения $\Omega_{\text{O/O}}$ (теор.) рассчитаны по уравнению (1).

тельном анализе в структуре **I** были выявлены пять потенциально возможных водородных связей (табл. 3), для которых в согласии с [25] как рассчитанные по (1), так и экспериментальные значения $\Omega_{\text{O/O}} > 10\%$.

В отличие от **I** в структуре **II** были установлены координаты всех атомов Н. Однако поскольку некоторые из них (Н(2) и Н(6)) статистически с вероятностью 50% заселяют общие позиции с точечной симметрией C_1 , использовать метод молекулярных ПВД для анализа невалентных взаимодействий [26] в кристаллах **II** тоже нельзя. Поэтому в табл. 4 указаны только важнейшие параметры всех водородных связей в структуре $(\text{N}_2\text{H}_5)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]$ (**II**), которые были выявлены с помощью уравнения (1) при условии, что $\Omega_{\text{Y/O}} \geq 10\%$. Отметим, что геометрические характеристики иона N_2H_5^+ в кристаллах **II** согласуются с аналогичными параметрами, известными для структур, содержащих монопротонированные катионы гидразиния. В частности, в двух кристаллографически неэквивалентных ионах N_2H_5^+ структуры **II** $d(\text{N}-\text{N}) = 1.446(10)$ и $1.462(6) \text{\AA}$, тогда как в нитрате гидразиния $d(\text{N}-\text{N}) = 1.4468(11) \text{\AA}$ [27].

В организации структуры кристаллов **I** важную роль играют также ионно-ковалентные взаимодействия между ионами рубидия и атомами

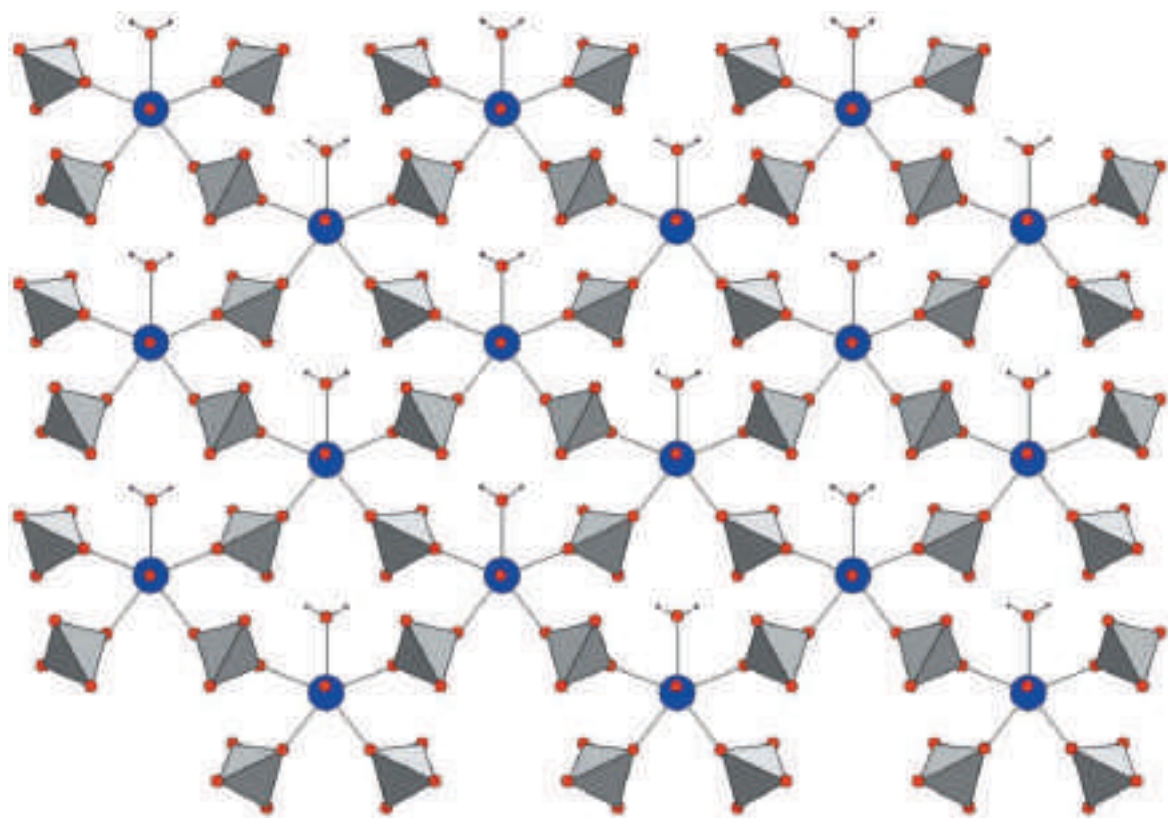


Рис. 2. Фрагмент слоя $[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]^{2-}$ с $C_p = 4$ в структуре кристаллов **II** (проекция вдоль направления $[100]$). Обозначения атомов совпадают с обозначениями рис. 1. Дополнительно показаны связи $\text{O}-\text{H}$ в молекулах воды, координированных атомами $\text{U}(\text{VI})$.

кислорода, входящими в состав ионов уранила, сульфат-ионов и внешнесферных молекул воды. В **I** имеются четыре кристаллографически разных атома рубидия, занимающие позиции $8f$ с точечной симметрией C_S . Атомы Rb образуют координационные полиэдры RbO_n ($n = 8-10$), в которых $d(\text{Rb}-\text{O}) = 2.88-3.40 \text{ \AA}$. Объемы ПВД атомов Rb в **I** ($21.6, 22.4, 22.1$ и $22.1 \text{ \AA}^3$) согласуются с аналогичными параметрами атомов Rb

(23.9 и $22.3 \text{ \AA}^3$) в структуре родственных кристаллов $\text{Rb}_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})] \cdot \text{H}_2\text{O}$ [28]. Соседние полиэдры RbO_n связаны между собой общими вершинами, ребрами и гранями в слое, которые располагаются параллельно плоскостям (100) . Поэтому структуру **I** в целом можно рассматривать как совокупность взаимно параллельных рубидий-кислородных слоев, между которыми располагаются уранил-сульфатные цепи (рис. 1). Эти цепи связаны между собой межцепочечными

Таблица 4. Основные геометрические характеристики водородных связей в структуре $(\text{N}_2\text{H}_5)_2[\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})]$ (**II**)

Связь $D-\text{H}\cdots\text{O}$	$d_{\text{эксп}}, \text{ \AA}$	$\Omega_{D/\text{O}}, \%^*$		$d(D-\text{H}), \text{ \AA}$	$d(\text{H}\cdots\text{O}), \text{ \AA}$	Угол $(D-\text{H}\cdots\text{O})$, град
		Эксп.	Теор.			
$\text{O7}-\text{H1}\cdots\text{O6}$	2.718	14.39	15.5	0.831	1.893	171.9
$\text{N1}-\text{H3}\cdots\text{O5}$	3.100	9.94	10.8	0.910	2.369	137.4
$\text{N1}-\text{H4}\cdots\text{O6}$	2.949	11.64	12.6	0.910	2.086	157.9
$\text{N3}-\text{H8}\cdots\text{O5}$	2.890	11.20	13.4	0.917	2.010	160.3

Примечание. D – донор.
* Значения $\Omega_{Y/\text{O}}$ (теор.) рассчитаны по уравнению (1).

водородными связями, характеристики которых указаны в первых двух строках табл. 3.

Рентгенодифракционные эксперименты проведены в ЦКП ФМИ ИФХЭ РАН при частичном финансировании Министерством науки и высшего образования РФ (тема № 122011300061-3), а также с использованием оборудования Центра молекулярных исследований ИНЭОС РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко Г.А. Кристаллохимия минералов урана. М.: Атомиздат, 1978. 216 с.
2. Gurzhiy V.V., Plášil J. // Acta Cryst. B. 2019. V. 75. № 1. P. 39.
3. Галкин Н.П., Сударииков Б.Н., Верятин У.Д. и др. Технология урана. М.: Атомиздат, 1964. 397 с.
4. Михайлов Ю.Н., Горбунова Ю.Е., Сerezhkina Л.Б. и др. // Журн. неорган. химии. 1997. Т. 42. № 9. С. 1413.
5. Serezhkin V.N., Vologzhanina A.V., Serezhkina L.B. et al. // Acta Cryst. B. 2009. V. 65. № 1. P. 45. <https://doi.org/10.1107/S0108768108038846>
6. Niinisto L., Toivonen J., Valkonen J. // Acta Chem. Scand. A. 1978. V. 32. P. 647.
7. Norquist A.J., Thomas P.M., Doran M.B., O'Hare D. // Chem. Mater. 2002. V. 14. P. 5179.
8. Jouffret L.J., Wylie E.M., Burns P.C. // J. Solid State Chem. 2013. V. 197. P. 160.
9. Pekov I.V., Krivovichev S.V., Yapaskurt V.O. et al. // Am. Mineral. 2014. V. 99. № 8–9. P. 1783.
10. Niinisto L., Toivonen J., Valkonen J. // Acta Chem. Scand. A. 1979. V. 33. P. 621.
11. Alekseev E.V., Suleimanov E.V., Chuprunov E.V. et al. // Crystallography Reports. 2006. V. 51. № 1. P. 29.
12. Plášil J., Hloušek J., Kasatkin A.V. et al. // Mineral. Magazine. 2015. V. 79. P. 205.
13. Сerezжкин В.Н., Сerezжкина Л.Б. // Журн. неорган. химии. 1978. Т. 23. № 3. С. 751.
14. Табаченко В.В., Сerezжкин В.Н., Сerezжкина Л.Б., Ковба Л.М. // Координац. хим. 1979. Т. 5. С. 1563.
15. Alekseev E.V., Suleimanov E.V., Chuprunov E.V., Fukin G.K. // Crystallography Reports. 2005. V. 50. P. 914.
16. Kampf A.R., Sejkora J., Witzke T. et al. // J. Geosciences. 2017. V. 62. P. 107.
17. Ling J., Sigmon G.E., Ward M. et al. // Z. Naturforsch. B: Chem. Sci. 2010. V. 225. № 6. P. 230.
18. SAINT-Plus (Version 7.68). Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA. 2007.
19. SADABS. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA.
20. Sheldrick G.M. // Acta Cryst. A. 2008. V. 64. № 1. P. 112.
21. Sheldrick G.M. // Acta Cryst. C. 2015. V. 71. № 1. P. 3.
22. Сerezжкин В.Н., Михайлов Ю.Н., Буслаев Ю.А. // Журн. неорган. химии. 1997. Т. 42. № 12. С. 2036.
23. Serezhkin V.N., Savchenkov A.V., Pushkin D.V., Serezhkina L.B. // Appl. Solid State Chem. 2018. № 2. P. 2. <https://doi.org/10.18572/2619-0141-2018-2-3-2-16>
24. Сerezжкин В.Н., Шишкина О.В., Сerezжкина Л.Б., Буслаев Ю.А. // Журн. неорган. химии. 1999. Т. 44. № 4. С. 616.
25. Сerezжкин В.Н., Вережкин А.Г., Смирнов О.П., Плехтин В.П. // Журн. неорган. химии. 2010. Т. 55. № 10. С. 1695.
26. Serezhkin V.N., Yu L., Savchenkov A.V. // Cryst. Growth Des. 2022. V. 22. P. 6717.
27. Grigoriev M.S., Moisy P., Den Auwer C., Charushnikova I.A. // Acta Cryst. E. 2005. V. 61. P. i216.
28. Serezhkina L.B., Mikhailov Yu.N., Gorbunova Yu.E. et al. // Rus. J. Inorg. Chem. 2004. V. 49. № 3. P. 364.