

КООРДИНАЦИОННЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ

УДК 548.31

ПЕРВЫЕ МОНОИОДАЦЕТАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ УРАНИЛА:
СИНТЕЗ И СТРОЕНИЕ

© 2022 г. Л. Б. СЕРЕЖКИНА^а, * Д. С. МИТИНА^а, А. В. ВОЛОГЖАНИНА^б, М. С. ГРИГОРЬЕВ^с,
Д. В. ПУШКИН^а, В. Н. СЕРЕЖКИН^а

^аСамарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева,
ул. Академика Павлова, 1, Самара, 443011 Россия

^бИнститут элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН,
ул. Вавилова, 28, Москва, 119991 Россия

^сИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский пр-т, 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

*e-mail: lserezh@samsu.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Проведены синтез, ИК-спектроскопическое, термографическое и рентгеноструктурное исследование кристаллов $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{mia})_3]_2(\text{NO}_3)$ (I) и $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{mia})_3]_2(\text{OH})$ (II), где *mia* – моноиодацетат-ион CH_2ICOO^- . Уранилсодержащим комплексам $[\text{UO}_2(\text{mia})_3]^-$ в структурах I и II отвечает кристаллохимическая формула $\text{A}(\text{B}^{01})_3$, где $\text{A} = \text{UO}_2^{2+}$, $\text{B}^{01} = \text{mia}$. С помощью метода молекулярных полиэдров Вороного–Дирихле проведен анализ невалентных взаимодействий в структуре кристаллов I. С учетом имеющихся литературных данных выяснено, что природа иодсодержащих карбоксилат-ионов (алифатические или ароматические) не влияет на геометрические характеристики ($d(\text{I}\cdots\text{O})$ и $\angle\text{C}-\text{I}\cdots\text{O}$) невалентных взаимодействий с участием атомов иода.

Ключевые слова: уранил, иодацетаты, кристаллическая структура, полиэдры Вороного–Дирихле

DOI: 10.31857/S0044457X22100427

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия активно исследуются карбоксилатные комплексы уранила, в том числе и ацетатуранилаты. Так, изучены кристаллические структуры около трехсот разных ацетатсодержащих комплексов уранила, некоторые из которых применяются при переработке урансодержащих руд и материалов [1–4]. В то же время сведения о галогензамещенных ацетатных комплексах уранила ограничены. Так, к настоящему времени изучено строение одного фторацетатного [5], четырех хлорацетатных [6, 7] и одного бромацетатного [8] комплексов уранила. Сведения о каких-либо иодацетатных комплексах уранила в литературе отсутствуют, хотя они представляют несомненный теоретический интерес с точки зрения участия катионов уранила в галогенных связях $\text{Y}\cdots\text{X}-\text{R}$, где атом галогена X участвует в образовании контакта за счет электрофильной области, R – атом или группа атомов, ковалентно связанная с атомом галогена, а Y – атом, обладающий нуклеофильной областью (например, НЭП или π -системой) [9]. Среди охарактеризованных галогенацетатных комплексов уранила

лишь в бромацетатном [8] реализуется укороченное расстояние $\text{U}=\text{O}\cdots\text{Br}$, и поскольку прочность галогенных связей усиливается в ряду $\text{F} < \text{Cl} < \text{Br} < \text{I}$ [10, 11], можно ожидать, что именно в иодацетатах уранила влияние галогенных связей на особенности супрамолекулярной структуры соединений U(VI) будет проявляться наиболее отчетливо. Поэтому данная работа посвящена изучению строения и некоторых свойств впервые синтезированных моноиодацетатных комплексов уранила $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{mia})_3]_2(\text{L})$, где *mia* = CH_2ICOO^- , а L = NO_3^- (I) или OH^- (II).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез I и II. В качестве исходных веществ использовали оксид урана(VI), моноиодуксусную кислоту и нитрат или сульфат гуанидиния.

К оксиду урана в количестве 0.2 г (0.7 ммоль) добавляли водный раствор моноиодуксусной кислоты (0.5203 г (3 ммоль) кислоты в 7 мл воды) и перемешивали до полного растворения. К полученному раствору добавляли 5 мл водного раствора нитрата гуанидиния (0.2559 г, 2 ммоль), pH

раствора отвечал 1. Мольное соотношение реагентов составляло 1 : 4 : 3. Через 2 сут из раствора выпадали желтые призматические кристаллы состава $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$ (**I**). Найдено, %: U 25.6; для **I** вычислено, %: U 25.2. Выход 69%.

Соединение **II** получено по аналогичной методике заменой нитрата гуанидиния сульфатом гуанидиния при мольном соотношении реагентов 1 : 6 : 2. Найдено, %: U 25.2; для $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{OH})$ вычислено, %: U 25.8. Выход 72%.

Дифференциальный термический и термогравиметрический анализ был проведен на дериватографе Shimadzu DTG-60 при скорости нагрева 10 град/мин. Навески составляли 7–8 мг. Прокаливание проводили до 900°C в платиновых тиглях с использованием Pt–Pt/Rh-термопары и эталона из прокаленного оксида алюминия в воздушной атмосфере.

ИК-спектры синтезированных соединений записывали на Фурье-спектрометре ФТ-801 в виде таблеток с KBr в диапазоне 4000–500 cm^{-1} . Отнесение полос поглощения проведено на основании литературных данных (табл. S1).

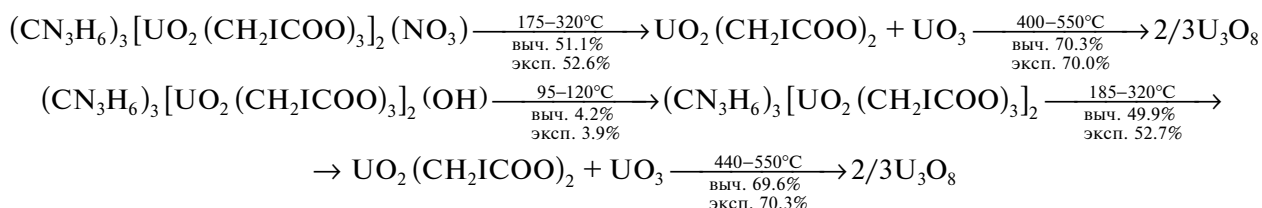
Рентгенодифракционные эксперименты проведены на автоматическом четырехкружном дифрактометре с двумерным детектором Bruker Quest при 100.0(2) К. Параметры элементарной ячейки уточнены по всему массиву данных [12]. В экспериментально определенные значения интенсивности рефлексов внесены поправки на поглощение с использованием программы SADABS [13]. Структуры расшифрованы методом сопря-

женного пространства, реализованным в программе SHELXT [14] и уточнены полноматричным методом наименьших квадратов SHELXL-2014 [15] по F^2 по всем данным в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Атом иода в структуре **II** разупорядочен по двум позициям с заселенностью 0.9 : 0.1. Атомы водорода помещены в геометрически рассчитанные положения и уточнены в модели “наездника” с изотропными тепловыми параметрами, равными $U_{\text{изо}} = 1.2U_{\text{эkv}}(X)$, где $U_{\text{эkv}}(X)$ – эквивалентные изотропные тепловые параметры атомов, с которыми связан атом водорода.

Параметры рентгеноструктурного эксперимента и окончательные значения факторов недоуверенности для кристаллов **I** и **II** приведены в табл. 1, характеристики основных длин связей и валентных углов полиэдров UO_8 – в табл. 2. Координационные числа атомов в структурах рассчитаны с помощью метода пересекающихся сфер [16]. Координаты атомов и величины температурных параметров депонированы в Кембриджском центре кристаллографических данных под номерами CCDC 2152380 и 2152381 для **I** и **II** соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Термическое разложение I и II можно охарактеризовать приведенными ниже схемами (над стрелками указаны интервалы температур превращения, под стрелками – вычисленная и экспериментальная потеря массы, выраженная в процентах от исходной навески):



На термограмме **I** эндоэффект (начало при 175°C, рис. 1а) переходит в экзотермический и сопровождается убылью массы, отвечающей образованию смеси $\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_2$ и UO_3 . Дальнейшее разложение происходит в интервале температур 440–550°C с присутствием экзотермического пика и образованием конечного продукта U_3O_8 .

Разложение **II** протекает в три стадии (рис. 1б), первую из которых можно отнести к удалению гидроксида гуанидиния. Дальнейшее нагревание в интервале 185–320°C приводит к получению тех же веществ, которые образуются на первой стадии разложения **I**. Сопровождается эта стадия

двумя эндоэффектами и экзоэффектом, переходящими друг в друга. Третья стадия, как и следовало ожидать, аналогична второй стадии разложения комплекса **I** и заканчивается образованием U_3O_8 .

В ИК-спектрах I и II присутствуют характеристические полосы поглощения, вызванные колебаниями ионов UO_2^{2+} [17], моноиодацетат-анионов [18], катионов гуанидиния [19], а также нитрат-ионов [17] и OH-групп [17] (табл. S1). Наличие дублетов при 928, 915 (**I**) и 927, 912 cm^{-1} (**II**), отвечающих асимметричным валентным колебаниям иона уранила, вероятно, обусловлено

Таблица 1. Кристаллографические данные, параметры эксперимента и уточнения структур I и II

| Параметр | I | II |
|---|--|---|
| Химическая формула | $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$ | $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{OH})$ |
| <i>M</i> | 1891.91 | 1846.91 |
| Сингония, пр. гр., <i>Z</i> | Тригональная, $R\bar{3}c$, 6 | |
| <i>a</i> = <i>b</i> , Å | 13.2797(2) | 12.8232(9) |
| <i>c</i> , Å | 41.0122(10) | 41.359(8) |
| <i>V</i> , Å ³ | 6263.5(2) | 5889.7(14) |
| <i>d_x</i> , г/см ³ | 3.009 | 3.124 |
| μ , мм ⁻¹ | 12.260 | 13.030 |
| <i>F</i> (000) | 5064 | 4932 |
| <i>T</i> , К | 100 | |
| Излучение, λ , Å | MoK α , 0.71073 | |
| Размер образца, мм | 0.22 × 0.15 × 0.09 | 0.28 × 0.22 × 0.2 |
| θ_{max} , град | 35.404 | 31.163 |
| Область <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i> | -15 < <i>h</i> < 21 -20 < <i>k</i> < 16 -65 < <i>l</i> < 61 | -18 < <i>h</i> < 18 -18 < <i>k</i> < 18 -52 < <i>l</i> < 59 |
| Число отражений: измеренных/независимых (<i>N</i> ₁), <i>R</i> _{int} / <i>c I</i> > 2 σ (<i>I</i>) (<i>N</i> ₂) | 30944/2948, 0.0471/2577 | 14837/2100, 0.0982/1711 |
| Метод уточнения | Полноматричный МНК по <i>F</i> ² | |
| Число уточняемых параметров | 81 | 79 |
| Весовая схема | $w = 1/[\sigma^2(F_o^2) + (0.0296P)^2 + 97.3187P]$, где $P = (F_o^2 + 2F_c^2)/3$ | $w = 1/[\sigma^2(F_o^2) + (0.0563P)^2 + 299.0131P]$, где $P = (F_o^2 + 2F_c^2)/3$ |
| Факторы недостоверности: | | |
| <i>wR</i> ₂ по <i>N</i> ₁ | 0.0746 | 0.1388 |
| <i>R</i> ₁ по <i>N</i> ₂ | 0.0323 | 0.0509 |
| <i>S</i> | 1.102 | 1.067 |
| Остаточная электронная плотность $\Delta\rho_{\text{max}}/\Delta\rho_{\text{min}}$, э/Å ³ | 2.764/-3.551 | 4.063/-4.484 |

Таблица 2. Основные геометрические параметры гексагональных бипирамид UO₈

| Связь | <i>d</i> , Å | Ω , %* | Угол | ω , град |
|---|--------------|---------------|----------------|-----------------|
| Структура $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$ (I) | | | | |
| U–O(1) | 1.782(4) | 22.01 | O(1)UO(2) | 180.0 |
| U–O(2) | 1.774(5) | 21.64 | O(4)UO(3) (×2) | 67.84(9) |
| U–O(3) (×3) | 2.507(3) | 9.06 | O(4)UO(3) (×3) | 52.32(9) |
| U–O(4) (×3) | 2.458(3) | 9.73 | O(4)UO(3) | 67.84(10) |
| Структура $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{OH})$ (II) | | | | |
| U–O(1) | 1.802(10) | 21.51 | O(1)UO(2) | 180.0 |
| U–O(2) | 1.796(12) | 21.35 | O(4)UO(3) (×3) | 52.8(2) |
| U–O(3) (×3) | 2.462(7) | 9.49 | O(4)UO(3) (×3) | 67.2(2) |
| U–O(4) (×3) | 2.458(7) | 9.56 | | |

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

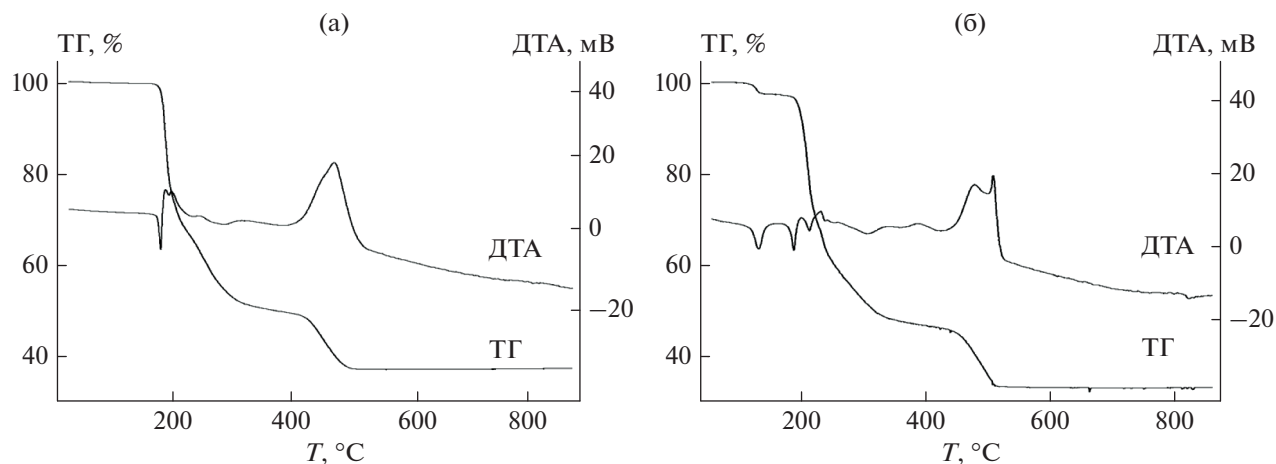


Рис. 1. Дериватограммы $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{mia})_3]_2(\text{NO}_3)$ (а) и $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{mia})_3]_2(\text{OH})$ (б).

участием, как показано будет ниже, только одного из двух уранильных атомов кислорода в образовании галогенных связей с атомами иода соседних комплексных группировок. Асимметричные и симметричные колебания карбоксильной группы в виде интенсивных узких пиков наблюдаются в областях (табл. S1), отвечающих их характеристическим колебаниям.

Изученные кристаллы имеют состав $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{L})$ и различаются только природой ацидолигандов L^- (соответственно нитрат-ион в **I** и гидроксид-ион в **II**). Если не учитывать природу L , то комплексы **I** и **II** можно считать изоструктурными (табл. 1). Оба вещества кристаллизуются в пр. гр. $R\bar{3}c$ и содержат в независимой части ячейки по одному кристаллографическому сорту атомов урана, которые расположены в частных позициях 12(c) с точечной симметрией C_3 , аниону CH_2ICOO^- в общем положении, половине катиона и 1/3 ацидолиганда (рис. 2). Координационным полиэдром атомов U(VI) является гексагональная бипирамида UO_8 , на главной оси которой находятся атомы кислорода группы UO_2^{2+} . В экваториальной плоскости бипирамиды располагается шесть атомов кислорода, принадлежащих трем разным ионам CH_2ICOO^- , каждый из которых связан с ураном бидентатно-циклически (тип координации $\text{V}^{01}-4$). В итоге в структурах **I** и **II** возникают урансодержащие комплексы $[\text{UO}_2(\text{mia})_3]^-$, которым соответствует кристаллохимическая формула (КХФ) $\text{A}(\text{V}^{01})_3$, где $\text{A} = \text{UO}_2^{2+}$, $\text{V}^{01} = \text{mia}^-$. Типы координации лигандов и опирающиеся на них КХФ записаны в соответствии с [20]. Отметим, что указанные гексагонально-бипирамидальные комплексы $[\text{UO}_2(\text{L})_3]^-$ являются наиболее характерным типом комплексов U(VI) с анионами однооснов-

ных насыщенных и ненасыщенных органических кислот [1, 21, 22].

Диоксокатионы UO_2^{2+} в изученных моноиодацетатах линейны. Объем полиэдров Вороного–Дирихле (ПВД) атомов урана, имеющих форму гексагональной призмы, для **I** и **II** составляет 9.55 и 9.48 \AA^3 соответственно, что хорошо согласуется со средним значением 9.3(4) \AA^3 , установленным для атомов U(VI) в координационных полиэдрах UO_n ($n = 5, 6, 7$ или 8) [23].

В изученных кристаллах комплексы $[\text{UO}_2(\text{mia})_3]^-$ и располагающиеся между ними катионы гуанидиния $\text{C}(\text{NH}_2)_3^+$, нитрат- (структура **I**) или гидроксид-ионы (структура **II**) связаны между собой в псевдогексагональные сдвоенные слои, параллельные плоскости (001) (рис. 3), за счет совокупности электростатических и невалентных взаимодействий. Анализ межмолекулярных невалентных взаимодействий проводили с помощью метода молекулярных полиэдров Вороного–Дирихле (ММПВД) [24] на примере структуры **I** (табл. 3), в которой отсутствует статистическое размещение атомов (в **II** некоторые атомы неметаллов разупорядочены, что затрудняет анализ с помощью ММПВД).

В кристаллах **I** содержатся атомы шести химических элементов, поэтому в структуре теоретически возможен 21 тип межмолекулярных контактов, которым должны отвечать грани ПВД нулевого ранга [24]. Однако реально в кристаллах **I** встречается только 11 типов межмолекулярных контактов. Судя по имеющимся данным, взаимное связывание комплексных ионов $[\text{UO}_2(\text{mia})_3]^-$, NO_3^- и $\text{C}(\text{NH}_2)_3^+$ в 3D-каркас структуры **I** происходит в основном за счет водородных связей (контакты Н/О, Н/И, Н/Н) и дисперсионных взаимодей-

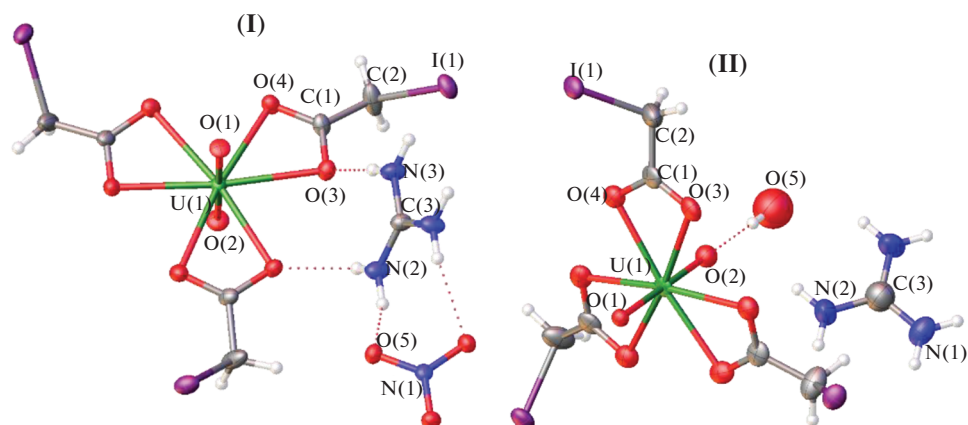


Рис. 2. Строение соединений $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$ (I) и $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{OH})$ (II) в представлении атомов эллипсоидами температурных смещений ($p = 50\%$). Подписаны неводородные атомы независимой части элементарной ячейки. Для II показано основное положение атома иода.

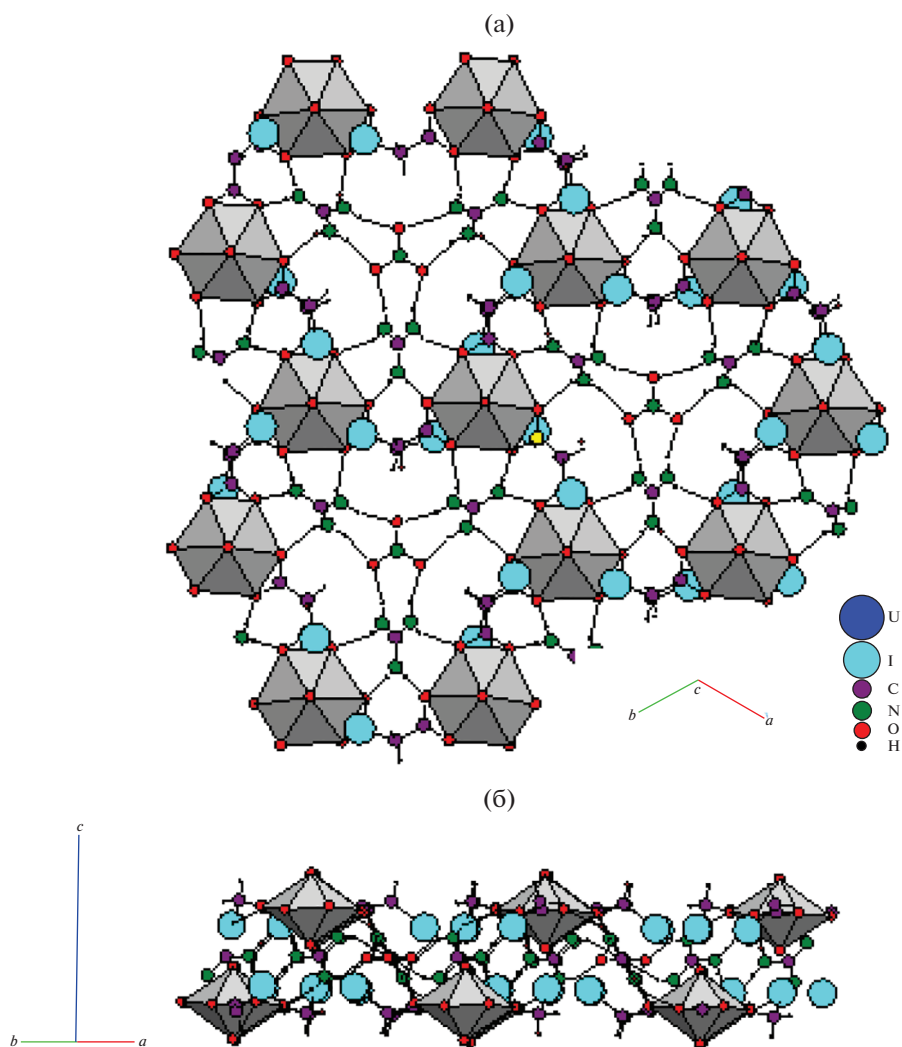


Рис. 3. Фрагмент слоя в структуре кристаллов $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$ (I): а – проекция слоя на плоскость (001); б – проекция слоя вдоль направления [110].

Таблица 3. Характеристики невалентных взаимодействий в структуре I по данным ММПВД* [23–25]

| Контакт A/Z | k_{AZ} | $d, \text{Å}$ | $S_{AZ}, \text{Å}^2$ | $\Delta_{AZ}, \%$ |
|-------------|----------|---------------|----------------------|-------------------|
| I/I | 30 | 4.498–4.609 | 64.82 | 5.25 |
| O/I | 48 | 3.320–4.538 | 101.99 | 8.26 |
| N/I | 48 | 3.614–4.387 | 31.99 | 2.59 |
| C/I | 36 | 3.964–4.626 | 45.18 | 3.66 |
| H/I | 120 | 3.279–4.737 | 196.87 | 15.94 |
| O/O | 18 | 3.024–3.484 | 19.07 | 1.54 |
| N/O | 4 | 2.755–2.755 | 7.30 | 0.59 |
| H/O | 192 | 2.072–4.037 | 525.22 | 42.53 |
| H/N | 48 | 2.659–4.519 | 28.29 | 2.29 |
| H/C | 72 | 2.814–3.556 | 30.87 | 2.50 |
| H/H | 120 | 2.270–4.574 | 183.37 | 14.85 |
| Сумма | 736 | 2.072–4.737 | 1234.96 | 100.00 |

* k_{AZ} – общее число граней с $PG = 0$ у МПВД состава $(\text{CN}_3\text{H}_6)_3[\text{UO}_2(\text{CH}_2\text{ICOO})_3]_2(\text{NO}_3)$; d – диапазон соответствующих меж-атомных расстояний A/Z; S_{AZ} – общая площадь граней указанного типа у ПВД атомов, содержащихся в одной формульной единице вещества; Δ_{AZ} – парциальный вклад (в процентах) соответствующих невалентных контактов A/Z в величину интегрального параметра $^0S = \sum S_{AZ}$ МПВД (указан в нижней строке).

ствий (H/H, I/I, H/C, O/O), которым отвечают соответственно суммарные парциальные вклады $\Delta_{AZ} \sim 61$ и 24% (табл. 3). Кроме того, существенную роль во взаимном связывании комплексов $[\text{UO}_2(\text{mia})_3]^-$ играют галогенные связи $\text{U}=\text{O}\cdots\text{I}-\text{C}$, в которых роль акцептора галогенной связи играет один из атомов кислорода иона уранила. Так, из табл. 3 видно, что парциальный вклад, отвечающий галогенным связям O/I, равен $\sim 8.3\%$ и занимает четвертое место, уступая только межмолекулярным взаимодействиям H/O, H/I и H/H. Дополнительным подтверждением связывающей природы галогенных связей $\text{U}=\text{O}\cdots\text{I}-\text{C}$ является величина телесного угла Ω грани I/O атомного ПВД (12.3 и 13.14% соответственно для I и II), поскольку для ряда галогенных связей с участием атомов брома было показано [25], что величина $\Omega(\text{I}/\text{Y}) \geq 10\%$ дает лишь 2% ложноположительных результатов, а в 98% случаев отвечает контактам, для которых в рамках теории Р. Бейдера “Атомы в молекулах” были обнаружены критические точки связи.

Из двух атомов кислорода иона уранила (O(1) и O(2)) в образовании галогенных связей в I участвует только O1, который образует по три симметрично эквивалентных контакта $\text{I}(1)\cdots\text{O}(1)=\text{U}$ с $d(\text{I}(1)\cdots\text{O}(1)) = 3.320(3) \text{Å}$ (94.9% суммы ван-дер-ваальсовых радиусов I и O), а угол $\text{C}(2)-\text{I}(1)\cdots\text{O}(1)$ равен $167.02(13)^\circ$. Аналогичная ситуация наблюдается и в структуре II, в которой $d(\text{I}(1)\cdots\text{O}(1)) = 3.130(5) \text{Å}$ (89.4% суммы ван-дер-ваальсовых радиусов), а углы $\text{C}(2)-\text{I}(1)\cdots\text{O}(1)$ равны $169.0(3)^\circ$. С учетом уже имеющихся в литературе данных [26, 27] полученные для I и II результаты показывают, что природа иодсодержащих карбоксилат-

ионов в комплексах уранила практически не влияет на геометрические характеристики невалентных взаимодействий с участием атомов иода. Так, в структурах комплексов U(VI), включающих иодсодержащие анионы некоторых ароматических карбоновых кислот [26, 27], $d(\text{I}\cdots\text{O})$ лежит в диапазоне 3.05–3.42 Å (соответственно от 87.1 до 97.7% суммы ван-дер-ваальсовых радиусов I и O [28]), при этом угол $\text{C}-\text{I}\cdots\text{O}$ изменяется от 174.3° до 163.3° .

Отметим также, что в известных комплексах уранила с ароматическими иодсодержащими карбоксилат-ионами в роли акцептора Y в галогенных связях $\text{Y}\cdots\text{I}-\text{C}$ обычно выступает один из двух атомов кислорода иона уранила. При этом во всех охарактеризованных комплексах одним из следствий образования связей $\text{U}=\text{O}\cdots\text{I}-\text{C}$ является неравноплечность иона уранила, поскольку мостиковая связь $\text{U}=\text{O}$ в составе фрагмента $\text{U}=\text{O}\cdots\text{I}$ длиннее, чем диаметрально противоположная концевая связь $\text{U}=\text{O}$. Заметим, что такая же неравноплечность реализуется и в изученных кристаллах с алифатическими карбоксилат-ионами, хотя различие длины связей $\text{U}=\text{O}$ для них невелико и поэтому в пределах 2σ они совпадают.

БЛАГОДАРНОСТЬ

РСА соединений был проведен при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования Центра молекулярных исследований ИНЭОС РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

1. *Loiseau T., Mihalcea I., Henry N., Volkringer C.* // *Coord. Chem. Rev.* 2014. V. 266–267. № 1. P. 69.
2. Комплексные соединения урана / Под ред. Черняева И.И. М.: Наука, 1964. 492 с.
3. *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements / Eds. Morss L.R. et al.* Springer, 2006. Ch. 10–12. P. 1444.
4. *Корольков Д.В., Скоробогатов Г.А.* Теоретическая химия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005. 503 с.
5. *Navaza A., de Rango C.* // *Acta Crystallogr.* 1983. V. 39. P. 1625.
6. *Alcock N.W., Flanders D.J.* // *Acta Crystallogr.* 1986. V. 42. P. 634.
7. *Savchenkov A.V., Uhanov A.S., Grigoriev M.S. et al.* // *Dalton Trans.* 2021. V. 50. P. 4210.
8. *Uhanov A.S., Sokolova M.N., Fedoseev A.M. et al.* // *ACS Omega.* 2021. V. 6. P. 21485.
9. *Desiraju G.R., Ho P.S., Kloo L. et al.* // *Pure Appl. Chem.* 2013. V. 85. P. 1711.
<https://doi.org/10.1351/PAC-REC-12-05-10>
10. *Cavallo G., Metrangolo P., Milani R. et al.* // *Chem. Rev.* 2016. V. 116. P. 2478.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00484>
11. *Барташевич Е.В., Цирельсон В.Г.* // *Успехи химии.* 2014. Т. 83. № 12. С. 1181.
<http://dx.doi.org/RCR4440?locatt=label:RUS>
12. SAINT-Plus (Version 7.68) // Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA. 2007.
13. SADABS. Bruker AXS Inc., Madison, Wisconsin, USA.
14. *Sheldrick G.M.* // *Acta Crystallogr.* 2015. V. 71A. № 1. P. 3.
15. *Sheldrick G.M.* // *Acta Crystallogr.* 2015. V. 71C. № 1. P. 3.
16. *Серезжкин В.Н., Михайлов Ю.Н., Буслев Ю.А.* // *Журн. неорган. химии.* 1997. Т. 42. № 12. С. 2036.
17. *Nakamoto K.* *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds.* Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009. Part B. 419 p.
18. *Katon J.E., Carll T.P.* // *J. Mol. Struct.* 1971. V. 7. P. 391.
19. *Drozd M.* // *Mater. Sci. Eng.* 2007. V. B136. P. 20.
20. *Serezhkin V.N., Vologzhanina A.V., Serezhkina L.B. et al.* // *Acta Crystallogr.* 2009. V. B65. Part 1. P. 45.
21. *Серезжкина Л.Б., Григорьев М.С., Кленов В.В. и др.* // *Кристаллография.* 2019. Т. 64. № 2. С. 252. [*Serezhkina L.B., Grigoriev M.S., Klepov V.V. et al.* // *Crystallography Reports.* 2019. V. 64. № 2. P. 270.]
22. *Klepov V.V., Serezhkina L.B., Serezhkin V.N., Alekseev E.V.* // *J. Solid State Chem.* 2016. V. 244. P. 100.
23. *Serezhkin V.N., Savchenkov A.V., Pushkin D.V., Serezhkina L.B.* // *Appl. Solid State Chem.* 2018. № 2. P. 2.
24. *Serezhkin V.N., Savchenkov A.V.* // *Cryst. Growth Des.* 2020. V. 20. P. 1997.
<https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01645>
25. *Vologzhanina A.V., Buikin P.A., Korlyukov A.A.* // *CrystEngComm.* 2020. V. 22. P. 7361.
<https://doi.org/10.1039/D0CE00288G>
26. *Kalaj M., Carter K.P., Cahill C.L.* // *Acta Crystallogr.* 2017. V. B73. P. 234.
<https://doi.org/10.1107/S2052520617001639>
27. *Carter K.P., Kalaj M., McNeil S. et al.* // *Inorg. Chem. Front.* 2021. V. 8. P. 1128.
<https://doi.org/10.1039/D0QI01319F>
28. *Bondi A.* // *J. Phys. Chem.* 1964. V. 68. № 3. P. 441.