

КООРДИНАЦИОННЫЕ
СОЕДИНЕНИЯ

УДК 548.73+546.94

ВНУТРИКОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДИОКСОМОЛИБДЕНА(VI)
С АЛКОГОЛЬМИНАМИ АРОМАТИЧЕСКИХ О-ОКСИАЛЬДЕГИДОВ.
КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА
2-ГИДРОКСИНАФТИЛИДЕНМОНОЭТАНОЛИМИНА (H_2L)
И СОЛЬВАТИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА $[MoO_2(L) \cdot C_5H_5N]$

© 2020 г. В. С. Сергиенко^{a, b, *}, В. Л. Абраменко^c, М. Д. Суражская^a

^aИнститут общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Ленинский пр-т, 31, Москва, 119071 Россия

^bВсероссийский институт научной и технической информации РАН, ул. Усиевича, 20, Москва, 125190 Россия

^cОдесский национальный университет им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082 Украина

*e-mail: sergienko@igic.ras.ru

Поступила в редакцию 09.10.2019 г.

После доработки 20.11.2019 г.

Принята к публикации 27.11.2019 г.

Синтезировано основание Шиффа, производное 2-гидроксинафталальдегида и моноэтанолamina (H_2L), и внутрикомплексное соединение диоксомолибдена(VI) $[MoO_2(L) \cdot C_5H_5N]$ (I). Строение H_2L и I установлено методами ИК-спектроскопии и РСА. В мономерной молекуле I атом Мо имеет октаэдрическую координацию двумя оксолигандами ($Mo=O$ 1.683(4) и 1.697(3) Å), двумя атомами О депротонированных гидроксогрупп спиртового ($Mo-O(4)$ 1.919(4) Å) и альдегидного ($Mo-O(3)$ 1.962(3) Å) фрагментов, а также атомом N тридентатного бис(хелатного) двухзарядного лиганда L^{2-} ($Mo-N_L$ 2.262(4) Å) и атомом N молекулы пиридина ($Mo-N_{Py}$ 2.496(4) Å). Связи $Mo-N_L$ и $Mo-N_{Py}$ существенно удлинены вследствие структурного проявления трансвлияния кратносвязанных оксолигандов. Молекула H_2L в свободном состоянии кристаллизуется в хиноидной (кето-аминной) таутомерной форме, а в комплексе I координирована в дважды депротонированной бензоидной (енол-иминной) форме.

Ключевые слова: синтез, ИК-спектроскопия, рентгеноструктурный анализ, диоксокомплексы молибдена(VI), 2-гидроксинафтилиденмоноэтанолмин

DOI: 10.31857/S0044457X20040169

ВВЕДЕНИЕ

Интерес исследователей к комплексным соединениям диоксомолибдена(VI) с азометинами — основаниями Шиффа — обусловлен возможностью их практического использования в качестве эффективных катализаторов в реакциях эпоксицирования олефинов при комнатной температуре [1–7], ингибиторов в реакциях окисления альдегидов кислородом воздуха [8], полифункциональных присадок к смазочным материалам [9, 10], а также в качестве моделей для изучения механизма действия молибденсодержащих энзимов в биосистемах [11–15]. В теоретическом плане оксиазометины представляют интерес как прототропные системы, позволяющие получать на их основе комплексы различного типа и строения [16].

Салицилиденалкогольимины (H_2L) — производные ароматических о-оксиальдегидов и аминоспиртов — представляют собой потенциально тридентатные двухосновные о-оксиазометины и

при взаимодействии с солями d-металлов могут образовывать несколько типов внутрикомплексных соединений (ВКС) мономерного ($[ML_n]$, $[M(HL)_n]$), ди- ($[ML_n]_2$) или олигомерного ($[ML_n]_m$) строения, проявляя при этом би- или тридентатную функцию [17–21]. Для диоксомолибдена(VI) с алкогольиминами к настоящему времени получены ВКС, в которых лиганд координирован центральным атомом тридентатно в дважды депротонированной форме.

В работе [22] детально рассмотрены методы получения комплексов диоксомолибдена(VI) с салицилиденалкогольиминами двух типов: MoO_2L и $MoO_2L \cdot Z$, где Z — нейтральные донорные молекулы. На основании данных ИК- и ПМР-спектроскопии авторы [22] пришли к выводу, что комплексы MoO_2L представляют собой полимеры с мостиковой связью $Mo=O \rightarrow Mo$, легко разрушаемой при взаимодействии с Z с образованием мономеров $MoO_2L \cdot Z$. Отмечена подвиж-

ность лигандов Z – при нагревании на воздухе они отщепляются и при определенных условиях могут быть замещены на другие O- или N-доноры.

Позже [17, 18] по результатам РСА мы установили, что сольватированные комплексы диоксомолибдена(VI) с замещенными салицилиденмоноэтанолимидами $\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{MeOH}$ имеют *цис*-октаэдрическое строение с координацией лигандов через азометиновый атом азота и два атома кислорода депротонированных гидроксогрупп альдегидного и спиртового фрагментов. Шестую вершину в октаэдре занимает атом кислорода молекулы метанола. При этом молекулы в структурах ВКС попарно объединены в centrosymmetric псевдодимеры почти линейными межмолекулярными водородными связями. К аналогичным выводам о строении сольватоккомплексов $\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{Solv}$ пришли авторы [23] на основании данных РСА ряда ВКС диоксомолибдена(VI) с монозамещенными салицилиденалкогольимидами. Для ВКС MoO_2L методом РСА ими подтверждено линейное полимерное строение.

Данные РСА свидетельствуют о том, что связи донорных молекул Solv, в частности метанола, с атомом молибдена существенно удлинены (ослаблены) вследствие статистического трансвлияния кратносвязанных оксолигандов *цис*- MoO_2 -группы, что объясняет легкость десольватации комплексов с образованием олигомеров, разрушаемых при добавлении донорных растворителей [17, 18]. В настоящей работе представлены результаты ИК-спектроскопического и рентгеноструктурного исследования строения алкогольимида – производного 2-гидроксиафтаальдегида и моноэтанолamina (H_2L) – и нового сольватированного комплекса диоксомолибдена(VI) [$\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{C}_5\text{H}_5\text{N}$] (I) ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ – молекула пиридина).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез H_2L проводили конденсацией 2-гидроксиафтаальдегида и моноэтанолamina в кипящем этаноле. Выход соединения составил 78%. После перекристаллизации из этанола вещество представляет собой желтые иглы, $t_{\text{пл}} = 155\text{--}156^\circ\text{C}$.

	C	H	N
Найдено, %:	72.45;	6.18;	6.46.
Для $\text{C}_{13}\text{H}_{13}\text{NO}_2$			
вычислено, %:	72.54;	6.09;	6.51.

ИК-спектры H_2L (ν , cm^{-1}): 3310 ш, 1645, 1620, 1545, 1515, 1490, 1405, 1360, 1320, 1260, 1230, 1210, 1182, 1164, 1143, 1095, 1070, 1028, 970, 940, 874, 830, 743, 720, 635, 552, 535, 498, 440.

Синтез I осуществляли методом лигандного обмена между ацетилацетонатом молибденила и азометином в присутствии пиридина [18]. К горячему раствору 0.326 г (0.001 моля) $\text{MoO}_2(\text{Acac})_2$ в 20 мл метанола добавляли по каплям метанольный раствор 0.001 моля азометина, кипятили реакционную смесь в течение 10–15 мин, добавляли 2–3 мл пиридина, упаривали раствор до объема 10 мл и оставляли при комнатной температуре для кристаллизации в эксикаторе над CaCl_2 . Выход комплекса составил 85%. При перекристаллизации комплекса [$\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{MeOH}$] из пиридина также образуется соответствующий кристаллический сольватоккомплекс [$\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{C}_5\text{H}_5\text{N}$] (I).

	C	H	N	Mo
Найдено, %:	51.58;	3.92;	6.53;	22.78.
Для $\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{MoN}_2\text{O}_4$				
вычислено, %:	51.44;	3.84;	6.67;	22.83.

ИК-спектры [$\text{MoO}_2\text{L} \cdot \text{C}_5\text{H}_5\text{N}$] (ν , cm^{-1}): 1634 пл, 1626, 1590, 1550, 1507, 1345, 1295, 1255, 1245, 1188, 1165, 1144, 1094, 1047, 982, 968, 928, 910, 900, 827, 794, 770, 752, 720, 700, 643, 575, 490, 450.

Элементный анализ комплекса на содержание молибдена проводили, как и в [17], по стандартной методике. Анализ соединений на содержание углерода, водорода и азота проводили на анализаторе Carlo-Erba 1106 Elemental Analyzer CHN.

ИК-спектры азометина и комплекса регистрировали на спектрометре ИКС-29 в области 3600–400 cm^{-1} (суспензии в вазелиновом масле).

РСА H_2L и I выполнен на автоматическом дифрактометре Enraf–Nonius CAD 4 при 293(2) K (CuK_α -излучение, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, графитовый монохроматор, Ω -сканирование). Структуры расшифрованы прямым методом и уточнены полноматричным анизотропным МНК по F^2 для всех неводородных атомов (SHELXL-97 [24]). Атомы Н(1N) и Н(2O) в структуре H_2L уточнены изотропно, остальные атомы водорода в обеих структурах помещены в рассчитанные позиции и уточнены по схеме “наездника”. Кристаллографические характеристики в структуре H_2L и I приведены в табл. 1, основные длины связей и валентные углы – в табл. 2. Структурные характеристики для H_2L и I депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 195340 и 195341 соответственно).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально установлено, что состав комплекса I не зависит от соотношения реагирующих компонентов и природы растворителей. Проведение реакции в этилацетате, ацетонитри-

Таблица 1. Кристаллографические характеристики, данные эксперимента и уточнения структуры H₂L и I

Параметр	H ₂ L	I
<i>M</i>	215.24	420.27
Сингония, пр. гр.	Моноклинная, <i>C2/c</i>	Ромбическая, <i>P2₁2₁2₁</i>
Параметры ячейки:		
<i>a</i> , Å	16.0332(10)	6.3282(10)
<i>b</i> , Å	4.9749(10)	11.361(2)
<i>c</i> , Å	28.0859(10)	23.268(5)
β, град	104.982(10)	
<i>V</i> , Å ³	2164.1(5)	1672.8(5)
<i>Z</i> , ρ _{выч} , г/см ³	8, 1.321	4, 1.669
μ, мм ⁻¹	0.724	6.645
<i>F</i> (000)	912	848
Размер кристалла, мм	0.15 × 0.08 × 0.03	0.25 × 0.10 × 0.05
θ _{min} –θ _{max} , град	5.71–64.96	4.33–69.94
Интервалы индексов:	–18 ≤ <i>h</i> ≤ 18 –5 ≤ <i>k</i> ≤ 5 –33 ≤ <i>l</i> ≤ 33	–7 ≤ <i>h</i> ≤ 7 –13 ≤ <i>k</i> ≤ 13 –28 ≤ <i>l</i> ≤ 28
Число отражений		
измеренных	6675	12237
независимых	1831	3166
<i>R</i> _{int}	0.1133	0.1704
Комплектность по θ, %	99.99	99.99
<i>GOOF</i>	0.972	1.048
<i>T</i> _{min} , <i>T</i> _{max}	0.8992, 0.9786	0.2874, 0.7323
<i>N</i> (число уточняемых параметров)	154	227
<i>R</i> _{<i>hkl</i>} , <i>I</i> ≥ 2σ(<i>I</i>)	<i>R</i> 1 = 0.0487, <i>wR</i> 2 = 0.1061	<i>R</i> 1 = 0.0360, <i>wR</i> 2 = 0.0887
<i>R</i> _{<i>hkl</i>} (по всем отражениям)	<i>R</i> 1 = 0.1029, <i>wR</i> 2 = 0.1291	<i>R</i> 1 = 0.0385, <i>wR</i> 2 = 0.0903
Остаточная электронная плотность ρ _{max} /ρ _{min} , е/Å ³	0.199, –0.198	0.767, –0.989

ле или этаноле в присутствии пиридина приводит к образованию комплекса одного состава – [MoO₂(L) · C₅H₅N], представляющего собой кристаллы желто-лимонного цвета, нерастворимые в неполярных и малополярных растворителях, но растворимые при нагревании в диметилформамиде, диметилсульфоксиде, пиридине. Выдерживание комплекса в изотермическом режиме при 150°C приводит к его десольватации. При температуре свыше 300°C комплекс разлагается, не плавясь.

В ИК-спектре I наблюдается характерное для внутрикомплексных соединений металлов с азотинами низкочастотное смещение полосы валентных колебаний связи C=N на 11 см⁻¹ по сравнению с ее положением в спектре свободного лиганда (1645 см⁻¹). В области 3100–3600 см⁻¹ в спектре I исчезает широкая интенсивная полоса

поглощения валентных колебаний OH-групп спиртового фрагмента с максимумом ~3300 см⁻¹, что с учетом результатов элементного анализа указывает на участие в координации депротонированной спиртовой гидроксогруппы. В спектре комплекса наблюдается смещение серии полос в области ~1000–1605 см⁻¹, отвечающих колебаниям связей гетерокольца координированной молекулы пиридина [25]. Интенсивные полосы при 928 и 900 см⁻¹ относятся к симметричным и асимметричным валентным колебаниям связи Mo=O *цис*-MoO₂-группы. В области низких частот в ИК-спектре комплекса I появляются новые полосы поглощения при 643 и 575 см⁻¹, которые следует отнести к валентным колебаниям связей Mo–N_L и Mo–O_L соответственно [18].

На основании экспериментальных результатов с учетом литературных данных [10, 17–19, 26–30]

Таблица 2. Основные межатомные расстояния (Å) и валентные углы (град) в структуре соединений H₂L и I

Связь	<i>d</i> , Å	Угол	ω, град
H ₂ L			
N(1)–C(3)	1.294(3)	C(3)N(1)C(2)	124.9(2)
N(1)–C(2)	1.457(3)	N(1)C(3)C(4)	124.0(2)
C(5)–O(1)	1.283(3)	N(1)C(2)C(1)	111.5(2)
C(1)–O(2)	1.417(3)	O(1)C(5)C(4)	122.4(2)
		O(1)C(5)C(6)	119.82(19)
		O(2)C(1)C(2)	109.5(16)
I			
Mo(1)–O(2)	1.683(4)	O(2)Mo(1)O(1)	106.6(2)
Mo(1)–O(1)	1.697(3)	O(2)Mo(1)O(4)	100.23(17)
Mo(1)–O(4)	1.919(4)	O(1)Mo(1)O(4)	97.15(16)
Mo(1)–O(3)	1.962(3)	O(2)Mo(1)O(3)	99.97(16)
Mo(1)–N(2)	2.262(4)	O(1)Mo(1)O(3)	96.17(16)
Mo(1)–N(1)	2.469(4)	O(4)Mo(1)O(3)	151.44(15)
O(4)–C(16)	1.426(5)	O(2)Mo(1)N(2)	161.62(18)
N(1)–C(11)	1.325(8)	O(1)Mo(1)N(2)	91.70(16)
C(18)–N(2)	1.294(5)	O(4)Mo(1)N(2)	75.57(13)
N(2)–C(17)	1.479(7)	O(3)Mo(1)N(2)	78.90(14)
O(3)–C(2)	1.340(5)	O(2)Mo(1)N(1)	84.91(17)
		O(1)Mo(1)N(1)	168.28(15)
		O(4)Mo(1)N(1)	82.51(14)
		O(3)Mo(1)N(1)	79.40(14)
		N(2)Mo(1)N(1)	76.84(13)
		C(2)O(3)Mo(1)	139.5(3)
		C(16)O(4)Mo(1)	116.9(3)
		O(4)C(16)C(17)	107.1(4)
		O(3)C(2)C(1)	123.7(4)
		O(3)C(2)C(3)	115.3(4)
		C(11)N(1)C(15)	117.6(5)
		C(11)N(1)Mo(1)	120.9(3)
		C(15)N(1)Mo(1)	121.6(4)
		N(2)C(18)C(1)	124.1(5)
		N(1)C(11)C(12)	124.2(5)
		N(1)C(15)C(14)	121.4(6)
		C(18)N(2)C(17)	118.2(4)
		C(18)N(2)Mo(1)	130.7(4)
		C(17)N(2)Mo(1)	111.0(2)
		N(2)C(17)C(16)	106.1(4)

можно предположить, что комплекс I имеет типичное для диоксокаатионов группы VIB октаэдрическое строение с двумя кратносвязанными оксолигандами в *цис*-положении друг к другу. В *транс*-позициях к оксолигандам, в соответствии с “правилом самосогласованности” [26], располо-

жены донорные атомы N азометиновой группы и координированной молекулы пиридина. Остальные две вершины октаэдра в ВКС занимают два атома O депротонированных гидроксогрупп альдегидного и спиртового фрагментов в *цис*-позициях к оксолигандам. Результаты PCA комплекса I подтверждают это предположение.

В мономерной молекуле (рис. 1) атом молибдена имеет октаэдрическую координацию двумя оксолигандами O(1), O(2), двумя атомами кислорода O(3), O(4) и атомом азота N(2) тридентатного *бис*(хелатного) двухзарядного лиганда (L)²⁻, а также атомом N(1) молекулы пиридина (Py). В *транс*-позициях к лигандам O(оксо) расположены, в соответствии с “правилом самосогласованности” [26], нейтральные атомы N(2) и N(1) лигандов L и Py соответственно. Связи Mo–N(2) (2.262(4) Å) и Mo–N(1) (2.469(4) Å) существенно удлиненны вследствие структурного проявления трансвлияния кратносвязанных оксолигандов. При этом связи Mo–N(1) и Mo–N(2) до атомов азота пиридина и лиганда L существенно (на 0.207 Å) различаются по длине. Связи Mo–O(оксо) (1.683(4), 1.697(3) Å) типичны по длине и соответствуют увеличенной кратности. Связи Mo–O(3,4)(L)_{*цис*} достаточно короткие – 1.962(4), 1.919(3) Å. Атом Mo смещен из центра октаэдра MoO₄N₂ к ребру O(1,оксо)–O(2,оксо): валентные углы O(оксо)Mo(O,N)_{*цис*}, за исключением (O(2)MoN(1) 84.9(2)°), больше идеальной величины 90° (91.7(2)°–100.2(2)°), противоположные углы (O,N)Mo(O,N) заметно меньше 90° (75.6(1)–82.5(1)°). Самый большой валентный угол в структуре I – O(1)MoO(2) (106.6°) – увеличен из-за отталкивания кратносвязанных оксолигандов. Углы между противоположными донорными атомами лигандов O(1)MoN(1) (168.3(2)°), O(2)MoN(2) (161.6(2)°), O(3)MoO(4) (151.4(2)°) в разной степени отклоняются от идеального значения 180°. При координации тридентатного лиганда L с атомом металла замыкаются два сопряженных по связи Mo–N(2) хелатных цикла: шестичленный MoNC₃O и пятичленный MoNC₂O. В структуре I нет коротких межмолекулярных расстояний, меньших сумм ван-дер-ваальсовых радиусов соответствующих атомов.

Строение молекулы H₂L показано на рис. 2. В структуре имеется достаточно прочная внутримолекулярная водородная связь (ВВС) N(1)–H(1N)...O(1) (N(1)–H(1N) 0.93(3), H(1N)...O(1) 1.82(3), N(1)...O(1) 2.563(3) Å, угол N(1)H(1N)O(1) 136(2)°), замыкающая шестичленный H-цикл NHOC₃. Аналогичные ВВС N–H...O (и H-циклы NHOC₃) присутствуют в молекулах 3-метокси-5-бром-X (HL¹) и 3-нитро-X (HL²) [31], где X = салицилиден-2-фурфурилимин (N–H 0.86 и 1.07, H...O 1.91 и 1.87, N...O 2.595 и 2.624 Å, углы NHO 135° и 124° для HL¹ и HL² со-

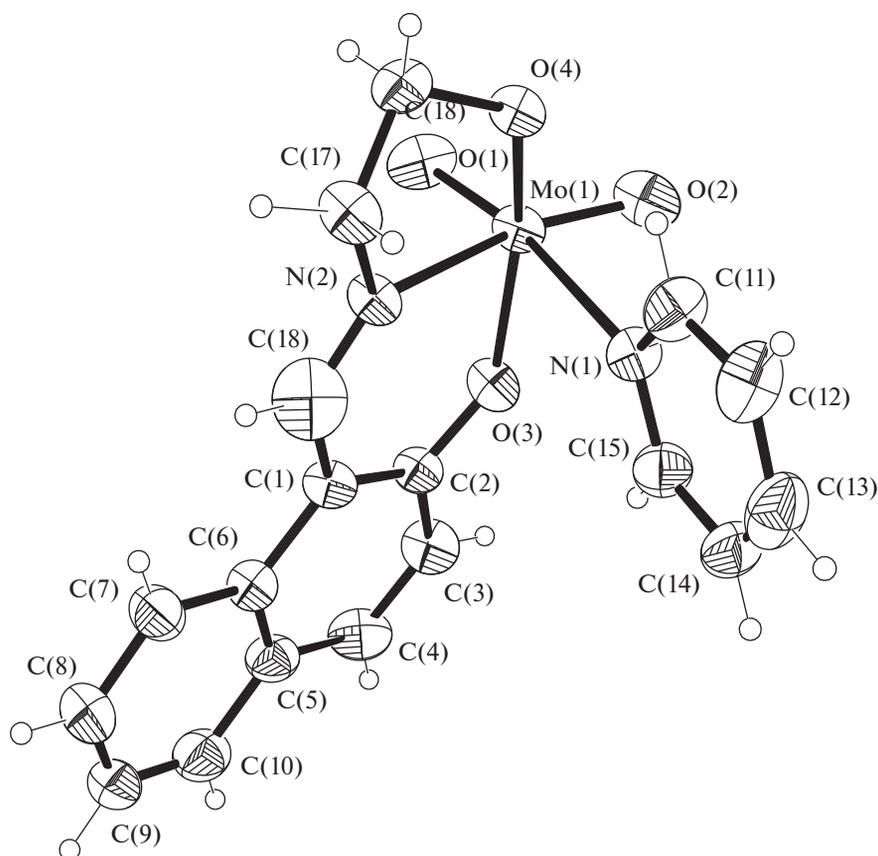


Рис. 1. Строение молекулы I. Эллипсоиды тепловых колебаний атомов приведены с 50%-ной вероятностью.

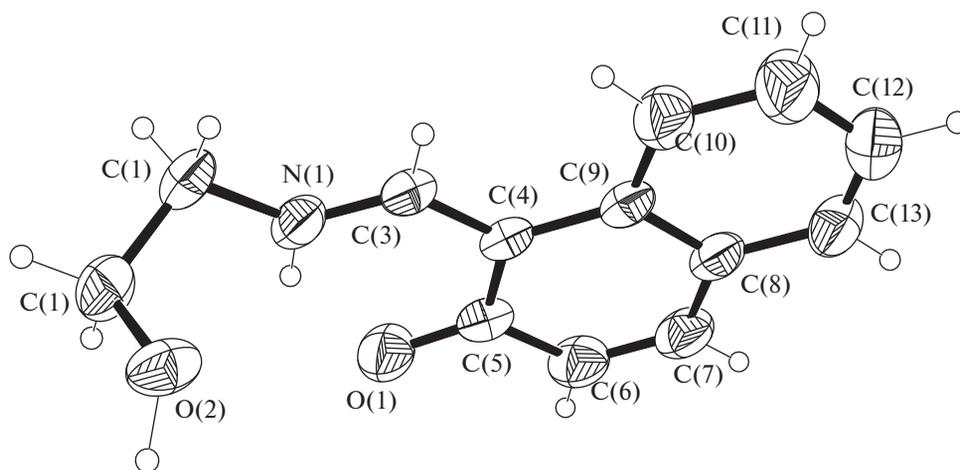


Рис. 2. Строение молекулы H_2L . Эллипсоиды тепловых колебаний атомов приведены с 50%-ной вероятностью.

ответственно). Отметим, что повышенная кратность связей $N(1)-C(3)$ (1.294(3) Å) и $O(1)-C(5)$ (1.283(3) Å) в структуре H_2L свидетельствует о реализации таутомерной хиноидной (кето-аминной) формы. При координации дважды депротонированного лиганда L^{2-} с металлом в комплексе I имеет место существенное изменение одного гео-

метрического параметра. Связь $O(3)-C(2)$ (1.340(5) Å) заметно (на 0.057 Å) удлиняется по сравнению с аналогичной связью $O(1)-C(5)$ (1.283(3) Å) в молекуле H_2L , что указывает на координацию лиганда в комплексе I в бензоидной (енол-иминной) форме. В кристалле H_2L помимо вышеописанной ВВС имеют место прочные меж-

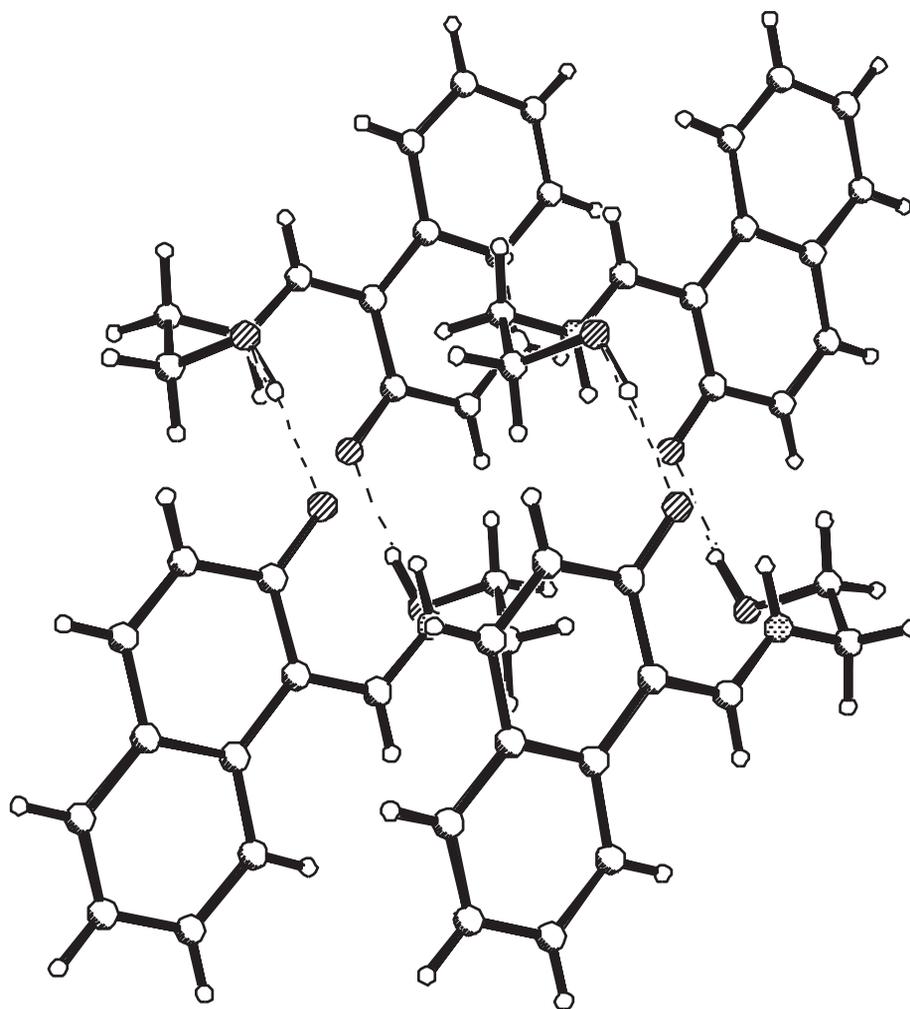


Рис. 3. Объединенные водородными связями (показаны пунктиром) цепочки молекул H_2L .

молекулярные ВС $\text{O}(2)\text{--H}(2\text{O})\dots\text{O}(1)^{\#1}$ ($-x + 2, -y, -z + 1$) ($\text{O}(2)\text{--H}(2\text{O})$ 0.98(3), $\text{H}(2\text{O})\dots\text{O}(1)^{\#1}$ 1.75(3), $\text{O}(2)\dots\text{O}(1)^{\#1}$ 2.695(2) Å, угол $\text{O}(2)\text{H}(2\text{O})\text{O}(1)^{\#1}$ 161(2)°, объединяющие молекулы в зигзагообразные 1D-цепочки (рис. 3).

Результаты экспериментальных исследований и имеющиеся литературные данные позволяют сделать вывод об однотипном строении внутрикомплексных соединений диоксомолибдена(VI) с салицилиденалкогольимидами, в структуре которых лиганды координированы центральным атомом в дважды депротонированной енол-иминной таутомерной форме, проявляя, таким образом, тридентатную функцию. В комплексах молекулярного типа – аддуктах $\text{MoO}_2\text{Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{L}$ –салицилиденалкогольимины, по данным ИК-спектроскопических исследований, напротив, координированы монодентатно через карбонильный атом кислорода хиноидной (кето-аминной) формы [32].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Рентгеноструктурный анализ проведен в ЦКП ФМИ ИОНХ РАН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОНХ РАН в области фундаментальных научных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schachner J.A., Mösch-Zanetti N.C., Peuronen A. et al. // Polyhedron. 2017. V. 134. P. 73.
2. Hossain Md.K., Schachner J.A., Haukka M. et al. // Polyhedron. 2017. V. 134. P. 275.
3. Sui Y., Zeng X., Fang X. et al. // J. Mol. Catal. A: Chem. 2007. V. 270. № 1–2. P. 61.
4. Bruno S.M., Balula S.S., Valente A.A. et al. // J. Mol. Catal. A: Chem. 2007. V. 270. № 1–2. P. 185.
5. Romanowski G., Kira J. // Polyhedron. 2016. V. 117. P. 352.

6. *Sobczak J.M., Ziołkowski J.* // Appl. Catal. A: Gen. 2003. V. 248. № 1–2. P. 261.
7. *Głowiak T., Jerzykiewicz L., Sobczak J.M. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 2003. V. 356. P. 387.
8. *Liimatainen J., Lehtonen A., Sillanpää R.* // Polyhedron. 2000. V. 19. № 9. P. 1133.
9. *Данилов А.М.* Применение присадок в топливах для автомобилей. М.: Химия, 2000. 232 с.
10. *Абраменко В.Л.* Координационная химия оксо- и диоксогалогенидов молибдена(6+) и вольфрама(6+). Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. 204 с.
11. *Cordas C.M., Moura J.J.G.* // Coord. Chem. Rev. 2019. V. 394. P. 53.
12. *Kazemi Z., Rudbari H., Sahihi M. et al.* // Polyhedron. 2019. V. 170. P. 70.
13. *Rakshit S., Palit D., Hazari S.K.S. et al.* // Polyhedron. 2016. V. 117. P. 224.
14. *Hussein M.A., Guan T.S., Haque R.A. et al.* // Polyhedron. 2015. V. 85. P. 93.
15. *Rudbari H.A., Khorshidifard A., Askari B. et al.* // Polyhedron. 2015. V. 100. P. 180.
16. *Гарновский А.Д., Васильченко И.С., Гарновский Д.А.* Современные аспекты синтеза металлокомплексов. Основные лиганды и методы. Ростов-на-Дону: ЛаПО, 2000. 355 с.
17. *Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Порай-Кошиц М.А., Гарновский А.Д.* // Журн. структур. химии. 1990. Т. 31. № 5. С. 54.
18. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Mikhailov Y.U. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2014. V. 59. № 11. P. 1259. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Михайлов Ю.Н., Суржеская М.Д.* // Журн. неорган. химии. 2014. Т. 59. № 11. С. 1503.] <https://doi.org/10.1134/003602361411020>
19. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Churakov A.V. et al.* // Crystallogr. Rep. 2014. V. 59. № 4. P. 523. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Чураков А.В. и др.* // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 4. С. 589.] <https://doi.org/10.1134/S106377451404018X>
20. *Kessisoglou D.P., Li X., Butler W.M. et al.* // Inorg. Chem. 1987. V. 26. № 15. P. 2487.
21. *Zabierowski P., Szklarzewicz J., Kurpiewska K. et al.* // Polyhedron. 2013. V. 49. № 1. P. 74.
22. *Rajan G.C., Chakravorty A.* // Inorg. Chem. 1981. V. 20. № 3. P. 660.
23. *Nakajima K., Yokoyama K., Kano T. et al.* // Inorg. Chim. Acta. 1998. V. 282. № 2. P. 209.
24. *Sheldrick G.M.* // Acta Crystallogr. 2008. V. 64. № 1. P. 112.
25. *Беллами Л.* Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. литер., 1963. 592 с.
26. *Порай-Кошиц М.А.* // Izv. Jugosl. Cent. Kristallogr. 1974. V. 9. P. 19.
27. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2017. V. 62. № 7. P. 900. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 7. С. 920.] <https://doi.org/10.1134/S0036023617070208>
28. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E., Churakov A.V.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2017. V. 62. № 2. P. 175. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е., Чураков А.В.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 2. С. 180.] <https://doi.org/10.1134/S0036023617020152>
29. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E., Churakov A.V.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2017. V. 62. № 12. P. 1563. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е., Чураков А.В.* // Журн. неорган. химии. 2017. Т. 62. № 12. С. 1569.] <https://doi.org/10.1134/S003602361712019>
30. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 1. P. 28. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е.* // Журн. неорган. химии. 2018. Т. 63. № 1. С. 32.] <https://doi.org/10.1134/S003602361801014X>
31. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E.* // Crystallogr. Rep. 2019. V. 65. № 1. P. 43. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 53.] <https://doi.org/10.1134/S002346120010233>
32. *Sergienko V.S., Abramenko V.L., Gorbunova Y.E. et al.* // Russ. J. Coord. Chem. 2019. V. 65. № 12. P. 653. [*Сергиенко В.С., Абраменко В.Л., Горбунова Ю.Е. и др.* // Коорд. химия. 2019. Т. 45. № 12. С. 756.] <https://doi.org/10.1134/S013234X19110070>